

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.014

基于电压行波极性特征的新能源送出线路保护方案

叶远波¹, 章昊¹, 王同文¹, 宋祥艳³, 苏毅², 郑涛³

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 3. 华北电力大学(新能源电力系统国家重点实验室), 北京 102206)

摘要: 新能源经交流线路送出时, 由于其弱馈性和受控特性, 传统的工频量保护难以适用, 而行波保护能够在新能源控制系统介入导致故障特性发生较大变化之前完成故障识别, 是目前解决新能源送出线路工频量保护问题的有效途径之一。然而现有的单端行波保护方案无法准确识别区内近端故障和区内末端故障, 因此文中分析了区内和区外故障情况下行波的折反射过程, 并利用电压行波零模分量与线模分量到达保护安装处的时间差对故障位置进行初判; 针对基于时间差难以准确识别的区内近端故障和区内末端故障, 进一步挖掘电压行波的极性特征, 利用首个反极性的电压行波和故障初始电压行波到达保护安装处的时间差与故障位置的关系来识别区内近端故障, 利用前2个电压行波的极性关系来识别区内末端故障。仿真结果表明, 该方案能够快速识别区内外故障, 并且具有较好的耐过渡电阻能力。

关键词: 新能源线路; 行波保护; 电压行波; 小波变换; 极性比较; 单端量保护

中图分类号: TM771

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)01-0127-09

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 我国能源结构正在逐步转型^[1-4]。截至2022年12月底, 我国风电装机容量约3.7亿kW, 同比增长11.2%; 光伏发电装机容量约3.9亿kW, 同比增长28.1%^[5]。以风电场为例, 新能源仍须经由交流线路并入电力系统^[6], 为了保障高比例新能源接入场景下电力系统的安全稳定运行, 目前亟须研究适用于新能源交流送出线路的保护方案。

与传统电源相比, 新能源电源故障特性存在较大差异^[7-8], 导致新能源输电线路发生故障时故障电流幅值受限以及基频特征不明显。因此, 以工频量为基础的保护方案对于新能源交流送出线路可能存在不适用的情况。

行波保护能够在控制系统介入前完成故障识别, 动作速度快, 是目前解决新能源送出线路工频量保护问题的有效途径之一^[9-10]。目前关于行波保护的研究已取得大量成果。文献[11]根据故障线路与非故障线路首波头特性差异, 利用相关法进行区内外故障判断, 但该方案对波形特征有较高依赖性, 在故障特征不明显时可能拒动。文献[12]基于线路边界对高频分量的阻塞作用, 通过提取反行波在线路内外侧的高频分量来判别区内外故障。文献[13]基于零模分量的色散特征, 通过构建 Logistic

函数对零模行波进行拟合来提取故障信息, 实现区内外故障的判断, 但该方案依赖于线路两端的边界元件。文献[14]基于电压行波线模分量与零模分量在线路上的传输时差进行故障识别, 但零模分量受线路衰减和色散作用影响, 波速具有不确定性, 故上述时间差可能误差较大。文献[15]基于首个同极性的电压行波提出测距式行波保护方案, 但该方案由于采样率的限制难以准确识别近端故障。文献[16]基于区间分割的思路, 通过测量波头到达时间差进行测距式行波保护。文献[17]根据零模行波与线模行波到达保护安装处的时间, 提出一种不受波速影响的双端故障识别方案, 但双端量保护对装置的同步性能要求较高, 成本较高。

综上, 针对现有的单端行波保护方案无法准确识别区内近端故障和末端故障的问题, 文中利用电压行波零模分量与线模分量到达保护安装处的时间差对故障位置进行初判; 通过分析区内近端故障、区内末端故障和区外首端故障情况下电压行波的折反射过程, 进一步挖掘电压行波的极性特性; 利用首个反极性的电压行波和故障初始电压行波到达保护安装处的时间差与故障位置的关系进一步识别区内近端故障; 利用前2个电压行波的极性关系进一步识别区内末端故障和区外近端故障。

1 交流线路故障行波传播特性分析

图1为一种典型的220kV新能源交流送出线路。文中研究对象为线路MN, 规定线路的正方向

收稿日期: 2023-08-21; 修回日期: 2023-11-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2401003)

为母线指向线路; R_1 为配置在母线 M 处的保护装置; f_2 为区内故障; f_1 为反方向区外故障; f_3 为正方向区外故障。

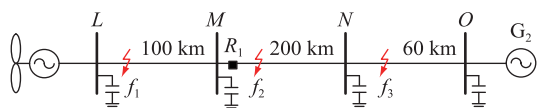


图 1 典型 220 kV 新能源交流送出线路
Fig.1 A typical 220 kV renewable energy AC transmission line

1.1 电压行波的折反射系数

输电线路发生故障后,电压行波将从故障点向线路两端传播。行波在母线以及故障点处将会发生折反射^[18]。根据行波的传播方向,规定由线路指向母线的行波为反行波,由母线指向线路的行波为前行波。为消除三相线路之间的耦合,采取凯伦贝尔变换^[19]将其解耦成零模分量和线模分量。图 2 为线路 MN 上发生故障时,线模故障分量的彼得逊等效电路。图中, Z_{c1} 、 Z_{cM} 分别为线路波阻抗以及母线 M 对地容抗; $Z_2 = Z_{c1}Z_{cM}/(Z_{c1} + Z_{cM})$; ΔU_f 为初始电压行波幅值。

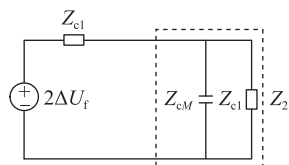


图 2 f_2 发生故障时边界 M 处彼得逊等效电路
Fig.2 Peterson equivalent circuit at boundary M when fault occurs at f_2

根据图 2 所示彼得逊等效电路可以求解出电压行波在边界 M 处的折反射系数^[20]及其取值范围分别为:

$$\alpha_M = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_{c1}} = \frac{2Z_{cM}}{2Z_{cM} + Z_{c1}} \in (0, 1) \quad (1)$$

$$\beta_M = \frac{Z_2 - Z_{c1}}{Z_2 + Z_{c1}} = \frac{-Z_{c1}}{Z_{c1} + 2Z_{cM}} \in (-1, 0) \quad (2)$$

式中: α_M 、 β_M 分别为电压行波在边界 M 处的折、反射系数。

同理,电压行波在故障点处的折反射系数及其取值范围^[20]为:

$$\alpha_f = \frac{2Z_f}{Z_f + Z_{c1}} = \frac{2R_f}{2R_f + Z_{c1}} \in (0, 1) \quad (3)$$

$$\beta_f = \frac{Z_f - Z_{c1}}{Z_f + Z_{c1}} = \frac{-Z_{c1}}{2R_f + Z_{c1}} \in (-1, 0) \quad (4)$$

式中: α_f 、 β_f 分别为电压行波在故障点处的折、反射系数; $Z_f = Z_{c1}R_f/(Z_{c1} + R_f)$; R_f 为过渡电阻。

由式(1)一式(4)可知,电压行波在故障点处和

母线处的反射系数均小于 0,折射系数均大于 0。

1.2 正向故障和反向故障识别

根据文中规定的方向,线路正向故障时,来自故障点的初始电压反行波首先到达 R_1 处,并由母线反射产生电压前行波,由于反射过程比较迅速,这 2 个波头信号时差很短。当线路发生反方向故障时,由背侧线路传向本段线路的故障初始电压前行波首先到达 R_1 处,而 R_1 处检测到的首个初始电压反行波是来自对端母线的反射波,该初始电压反行波需要经过 2 倍线路长度的传输距离到达保护安装处,使得初始电压前行波与初始电压反行波间的时间差较长。因此,可利用保护安装处检测到初始电压前行波和电压反行波的时间差进行故障方向判别,其判据^[21]可设置为:

$$\Delta T = t_r - t_b < K_{rel}\delta_{set} \quad (5)$$

$$\delta_{set} = \frac{2L_1}{v_1} \quad (6)$$

式中: L_1 为线路 MN 的长度; t_r 、 t_b 分别为初始电压前行波与反行波到达时刻; v_1 为线模行波的波速度; K_{rel} 为可靠系数,文中 $K_{rel} \in (0.8, 0.9)$ 。

1.3 正向区内故障和区外故障识别

由于线模行波和零模行波具有不同的波速度,当线路发生故障时,线模行波先于零模行波到达保护安装处,因此可以通过检测零模和线模分量中的故障初始行波到达保护安装处的时间差初步估算故障距离。线路 MN 末端故障时,保护安装处检测到的初始零模和线模电压行波的时间差为:

$$\Delta t_{set} = \frac{v_1 - v_0}{v_1 v_0} L_1 \quad (7)$$

式中: v_0 为零模电压行波在输电线路上的传播速度。 Δt_{set} 即为保护判据的整定值。

由式(7)可知,时间差与故障距离成正比,因此将检测到的零模分量和线模分量到达保护 R_1 处的时差 Δt_{01} 与 Δt_{set} 进行比较即可识别区内故障和区外故障。若 $\Delta t_{01} > \Delta t_{set}$,说明发生了区外故障;反之, $\Delta t_{01} \leq \Delta t_{set}$,则说明发生了区内故障。

综上,可利用初始零模和线模电压行波的时间差判别正向区内和区外故障。但由于采样率的限制,近端故障时可能无法准确捕获初始零模和线模电压行波,进而导致误判;同时,相对于波速较稳定的线模分量,零模分量具有较强的依频特性,可能会导致难以准确区分区内末端故障和区外近端故障。因此,文中利用初始零模和线模电压行波时间差初判故障位置,然后引入辅助判据进一步识别区内近端故障、区内末端故障和区外近端故障。

1.4 区内近端故障识别

区内近端故障时,行波在故障点与母线间快速折反射,为准确提取波头信号,保护装置须使用更高的采样率,但过高的采样率对设备的硬件要求也更高,目前在技术上存在较多阻碍。因此,单独利用时间差识别故障可能会有较大误差,须增加辅助判据进一步识别故障。文中选用色散效应较弱的线模行波进一步分析故障行波传播特性。图3为区内近端故障时,线模电压行波的网格图。

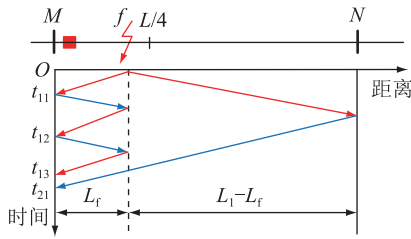


图3 区内近端故障时行波网格图

Fig.3 Grid diagram of traveling wave in case of internal near-end fault

分析图3可知,区内近端故障时,初始线模电压行波将在保护安装处和故障点之间发生多次折反射,此时保护安装处检测到的故障点反射波 $\Delta U_{M,f}$ 的表达式^[16]为:

$$\Delta U_{M,f} = \Delta U_f \beta_M^x \beta_f^x e^{-\gamma(2x+1)L_f} \quad (8)$$

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \quad (9)$$

式中: L_f 为故障距离; x 为行波在故障点处的反射次数; γ 为线路的传输系数; ω 为角频率; R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 分别为送出线路单位长度的电阻、电感、电导和电容。

同理可得对端母线反射波 $\Delta U_{M,N}$ 的表达式为:

$$\Delta U_{M,N} = \Delta U_f \beta_N \alpha_f e^{-\gamma(2L_1-L_f)} \quad (10)$$

式中: β_N 为电压行波在母线N处的反射系数。

由于母线以及故障点处电压行波反射系数都小于0,因此式(8)中故障点的反射波与故障初始电压行波极性相同,式(10)中对端母线的反射波与故障初始电压行波极性相反。

根据图3中电压行波的传输路径可知,区内近端故障时,对端母线反射的电压行波与故障点初始电压行波间有较长的时间差,且对端母线反射的电压行波与故障点初始电压行波极性相反,两者间的波形差异较明显,因此可利用首个反极性电压行波进一步判别故障。根据保护安装处检测到首个反极性电压行波和初始电压行波的时间以及两者的传输路径可得故障距离为:

$$L_f = L_1 - \frac{v_1(t_{21} - t_{11})}{2} \quad (11)$$

式中: t_{21} 为首个反极性电压行波到达保护安装处的时间; t_{11} 为故障初始行波到达保护安装处的时间。

综上,根据式(11)可计算出故障距离,在此基础上考虑一定的裕度,若 $L_f \leq 0.5L_1$,则发生了区内故障;反之,若 $L_f > 0.5L_1$,则可能出现行波波头未能准确捕获的情况,行波保护方案可靠性下降,只能交由工频量保护处理。

1.5 区内末端故障和区外近端故障识别

由于区内末端故障与区外近端故障时 Δt_{01} 差异较小,可能存在无法准确识别的问题,因此利用电压行波的极性特征进一步判别故障。图4为区内末端发生故障时,线模电压行波网格图。

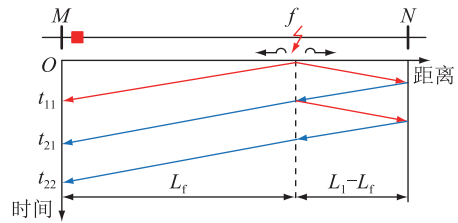


图4 区内末端故障时行波网格图

Fig.4 Grid diagram of traveling wave in case of internal remote-end fault

根据图4可知,母线M处检测到的第2个电压行波为母线N的反射波,此时保护安装处检测到的前2个电压反行波的表达式为:

$$\begin{cases} \Delta U_{M1} = \Delta U_f e^{-\gamma L_f} \\ \Delta U_{M2} = \Delta U_f \beta_N \alpha_f e^{-\gamma(2L_1-L_f)} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(1)一式(4)中折射系数和反射系数的取值范围可知:区内末端故障时,母线M处检测到的前2个电压行波极性相反。

图5为区外近端故障时,线模电压行波的网格图,图中 L_2 为线路NO的长度。

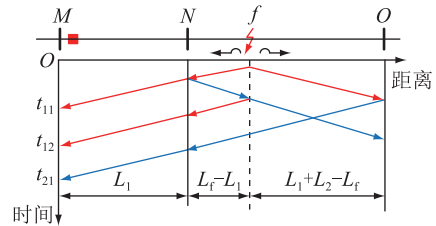


图5 区外近端故障时行波的网格图

Fig.5 Grid diagram of traveling wave in case of external near-end fault

根据图5可知,母线M处检测到的第2个波为故障点的反射波,此时保护安装处检测到的前2个电压反行波的表达式为:

$$\begin{cases} \Delta U_{M1} = \Delta U_f \alpha_N e^{-\gamma L_f} \\ \Delta U_{M2} = \Delta U_f \beta_N \beta_f \alpha_N e^{-\gamma(3L_f-2L_1)} \end{cases} \quad (13)$$

式中： α_N 为电压行波在母线 N 处的折射系数。

根据式(1)一式(4)中折射系数和反射系数的取值范围可知：区外近端故障时，保护安装处检测到的前 2 个电压行波极性相同。

综上，区内末端故障时，到达保护 R_1 处的前 2 个电压波极性相反；区外近端故障时，到达保护 R_1 处的前 2 个电压波极性相同。

2 基于电压行波极性特征的新能源送出线路保护方案

2.1 行波信号的提取

文中方案利用电压行波零模、线模分量到达时间差和电压行波极性特征进行故障识别，因此行波波头的正确标定是方案的基础。小波变换模极大值 (wavelet transform modulus maximum, WTMM) 能够准确描述信号的奇异特性^[22]，因此文中利用 3 阶 B 样条函数的小波变换提取电压行波的波头。

小波变换将信号进行多尺度分解，不同频带下的小波系数可代表相应的频段，其中近似系数对应信号的低频分量，细节系数对应信号的高频信息，因此小波变换能够起到滤波的作用。

图 6 为输电线路零、线模波速随频率变化曲线。由图 6 可知，线模行波的色散效应弱，波速随频率变化特征也不明显。在 10 kHz 以上的频带范围内，当频率变化时，线模行波的波速始终能够达到 2.937×10^8 m/s。零模行波的依频特性强，波速随频率变化比较明显，频率越高，零模行波和线模行波的波速越接近，考虑到波速稳定能够提高保护判据的准确性，因此须对零模分量中的低频分量进行滤除。在 10 kHz 以上的频带范围内，零模波速差别较小，始终保持在 2.736×10^8 m/s 以上，但随着频率升高，零模波速逐渐接近线模波速，可能无法准确提取出线模分量与零模分量，同时零模高频分量的衰减特性明显，当故障距离较远时，高频分量衰减明显导致波头难以准确识别，因此对高频分量也要加以限制^[19]。考虑到零模分量的频率特性以及零模波头高频分量的有效范围是 3~20 kHz^[23]，文中将零模分量的频率限制在 10~20 kHz 内。

文中选取的采样率为 200 kHz，信号经过 3 层小波分解后，在 0~12.5 kHz 内，主要表现为原始信号的低频部分；在 12.5~25 kHz 内，主要表现为原始信号的高频部分^[24]。因此，文中计算时线模波速采用 2.937×10^8 m/s，零模波速采用 2.736×10^8 m/s。

2.2 保护动作判据

线路发生故障时，首先利用保护 R_1 处检测到的

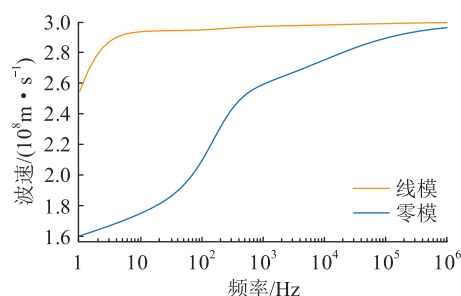


图 6 输电线路模分量传播速度

Fig.6 Transmission line modulus propagation velocity

首个初始电压前行波和首个初始电压反行波的到达时间差来判别故障方向，然后利用零模、线模到达时间差初判故障位置，对于线路近端和末端故障，须增加额外的故障识别判据。

令 $k = \Delta t_{01} / \Delta t_{set}$ ，可分为以下情况。

(1) 检测到 $k < 0.1$ ，此时可能存在行波波头未能准确捕获的情况，须采用辅助判据进一步判别故障位置。记录首个反极性的电压行波到达时间，并根据式(11)计算故障距离，考虑到一定裕度，当计算出的 $L_f \leq 0.5L_1$ 时，即可判别出区内故障；若计算出的 $L_f > 0.5L_1$ ，则可能由于近端故障波头难以准确捕获导致计算结果与初判矛盾，最终由工频量保护处理。

(2) 检测到 $0.1 \leq k \leq 0.9$ ，直接判别为区内故障。

(3) 检测到 $0.9 < k \leq 1.1$ ，此时无法准确判别是线路末端故障还是下级线路近端故障，借助辅助判据，采用 WTMM 定量描述保护安装处检测到的前 2 个电压行波的极性，用 $M_i (i=1, 2)$ 来表示，其定义如式(14)所示。

$$M_i = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 个电压行波极性为正} \\ -1 & \text{第 } i \text{ 个电压行波极性为负} \end{cases} \quad (14)$$

将前 2 个电压行波的极性进行比较，即可识别是区内故障还是内外故障，故障识别判据如式(15)所示。

$$M_1 M_2 = \begin{cases} -1 & \text{区内故障} \\ 1 & \text{区外故障} \end{cases} \quad (15)$$

(4) 检测到 $k > 1.1$ ，直接判别为区外故障。

2.3 保护方案流程

文中提出的基于首个反极性电压行波的新能源送出线路保护方案如图 7 所示。

3 仿真实验

基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建图 1 所示的 220 kV 新能源交流送出线路模型。线路 MN、LM

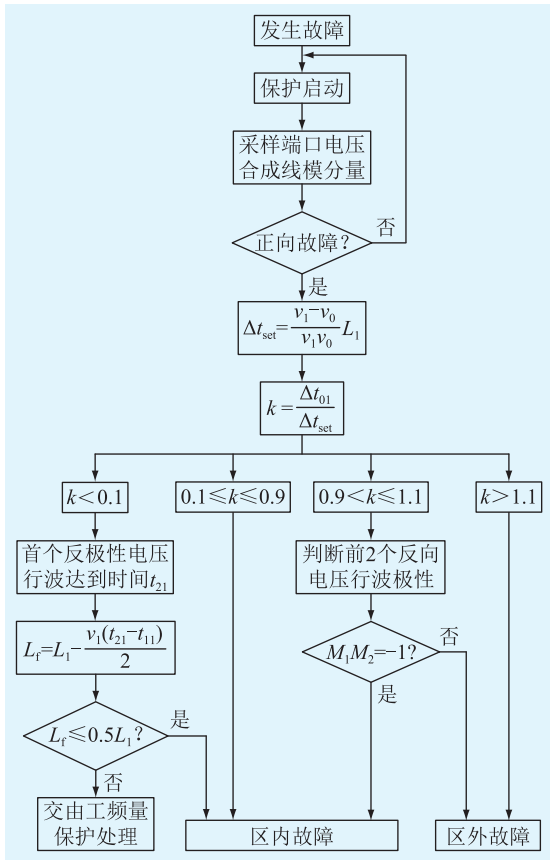


图7 基于电压行波极性特征的保护方案流程

Fig.7 Flow chart of protection scheme based on polarity characteristics of voltage traveling waves

和 NO 的长度分别为 200 km、100 km 和 60 km。新能源模型参数详见文献[9]。文中选用 3 阶 B 样条函数的小波变换提取电压行波波头,并选取故障后 1.5 ms 时间窗内的数据进行分析。

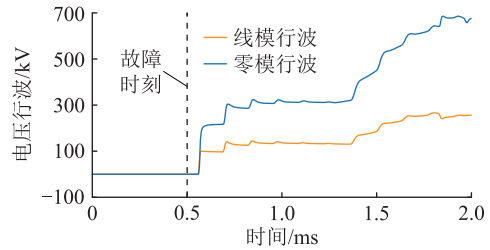
3.1 区内近端故障

在距离 M 端 10 km 的 f_2 处设置 A 相接地故障,故障电阻为 20 Ω ,故障时刻为 0.5 ms。仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知,区内近端故障时,零模与线模行波几乎同时到达保护安装处,此时 $k < 0.1$,各次行波浪涌间的时间间隔很短,因此须增加辅助判据确认区内故障。

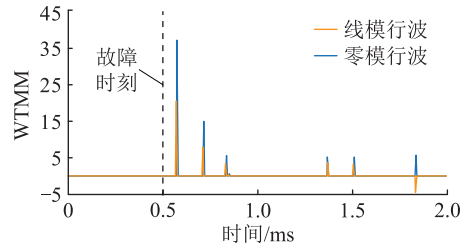
近端故障时线模电压行波的小波变换结果如图 9 所示。由图 9 可知,母线 M 处检测到的首个反极性电压行波与首行波时间间隔较长,且幅值变化明显,因此可准确提取这 2 个波头的到达时间。此时故障首行波与首个反极性电压行波到达时间分别为 0.541 ms 与 1.866 ms,通过式 (11) 可以计算得到 $L_f = 9.67$ km,此时可以直接判断为区内故障。

3.2 区内中点故障

在故障距离 100 km 的 f_2 处设置 A 相接地故障,故障电阻为 20 Ω ,仿真结果如图 10 所示。



(a) 近端故障时电压行波



(b) 电压行波经小波变换结果

图8 区内近端故障时电压行波及其小波变换结果

Fig.8 Voltage traveling wave in case of internal near-end fault and its wavelet transform results

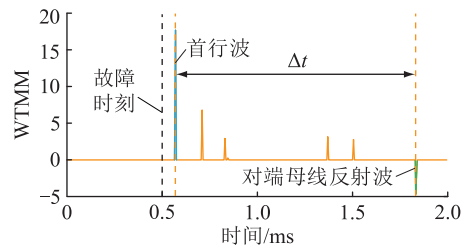
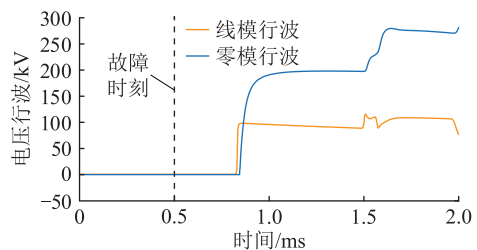
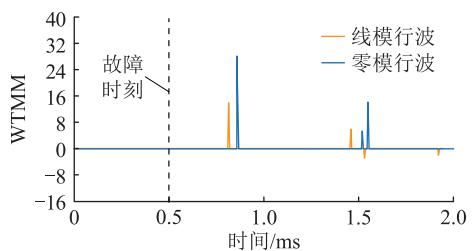


图9 区内近端故障时线模电压行波的小波变换结果

Fig.9 Wavelet transform results of line mode voltage traveling wave in case of internal near-end fault



(a) 区内故障时电压行波



(b) 电压行波经小波变换结果

图10 区内中点故障时电压行波及其小波变换结果

Fig.10 Voltage traveling wave and its wavelet transform results in case of internal midpoint fault

由图 10(b) 可知,线模电压行波与零模电压行波到达时间分别为 0.821 ms 与 0.843 ms,算得 $k = 0.434$,此时可直接判为区内故障。

3.3 区内末端故障

分别在距离 N 端 10 km 的 f_2 和 f_3 位置处设置故障电阻为 20 Ω 的 A 相接地故障,区内末端故障与区外近端故障的仿真结果如图 11、图 12 所示。

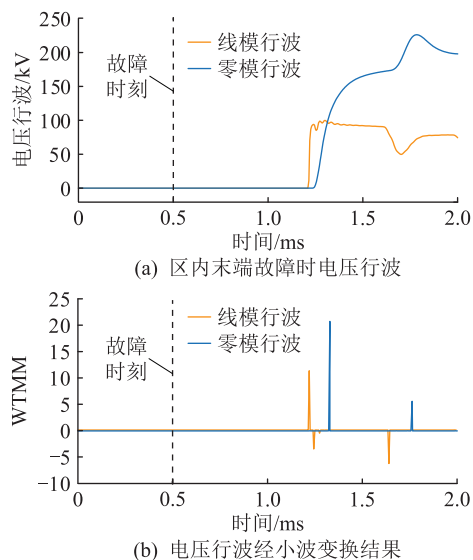


图 11 区内末端故障时电压行波及其小波变换结果
Fig.11 Voltage traveling wave and its wavelet transform results in case of internal remote-end fault

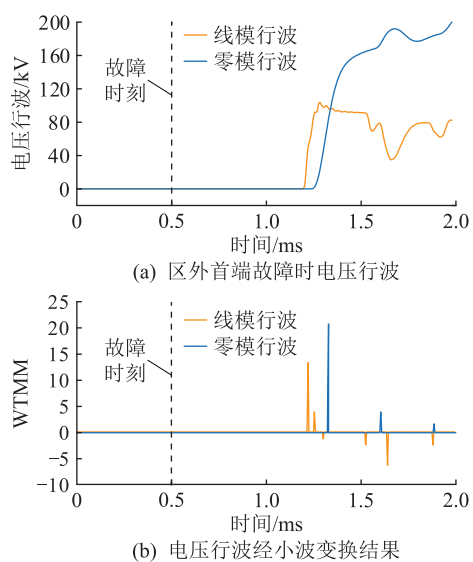


图 12 区外近端故障时电压行波及其小波变换结果
Fig.12 Voltage traveling wave and its wavelet transform results in case of external near-end fault

由图 11、图 12 可知,对于区内末端故障以及下级线路首端故障,保护装置检测到的线模行波与零模行波到达时间差近乎相等,此时无法准确判别出区内外故障,因此须增加额外的辅助判据识别末端故障。区内末端故障与区外近端故障时线模电压行波的小波变换结果分别如图 13、图 14 所示。

由图 13、图 14 可知,区内末端故障时,保护 R_1 处检测到的前 2 个行波极性相反;区外近端故障时,

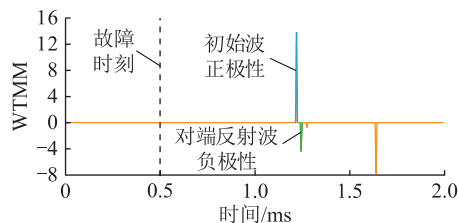


图 13 区内末端故障时线模行波的小波变换结果
Fig.13 Wavelet transform results of line mode traveling wave in case of internal remote-end fault

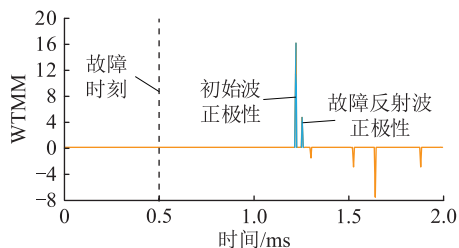


图 14 区外近端故障时线模行波的小波变换结果
Fig.14 Wavelet transform results of line mode traveling wave in case of external near-end fault

到达保护安装处的前 2 个行波极性相同。通过该方法可以有效识别区内末端故障与区外近端故障。

3.4 区外远端故障

在距离 N 端 50 km 的 f_3 处设置故障电阻为 20 Ω 的 A 相接地故障,仿真结果如图 15 所示。

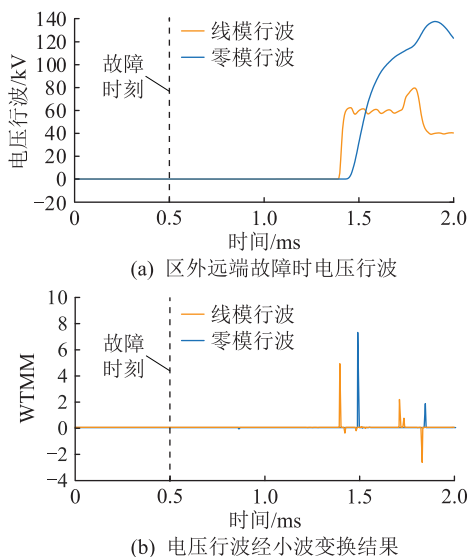


图 15 区外远端故障时电压行波及其小波变换结果
Fig.15 Current traveling wave and its wavelet transform results in case of external remote-end fault

通过图 15(b)可以得到线模电压行波与零模电压行波到达时间分别为 1.342 ms 与 1.413 ms,算得 $k=1.425$,此时可以直接判断为区外故障。

3.5 保护性能分析

3.5.1 抗过渡电阻能力分析

为验证不同过渡电阻对文中方案的影响,以电

压行波线模分量为分析对象,在区内 40 km 处设置 A 相接地故障,过渡电阻分别设置为 20、100、200 Ω ,得到电压行波波形及其 WTMM 结果见图 16。

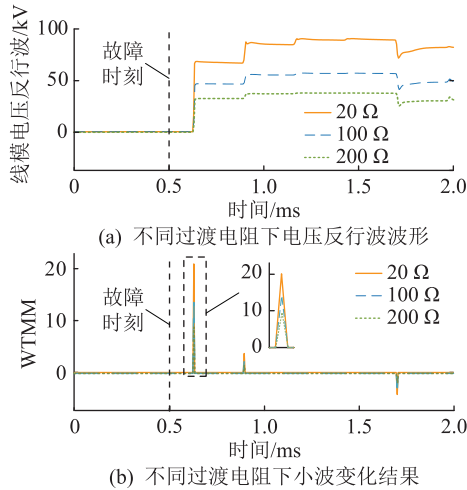


图 16 不同过渡电阻对保护的影响

Fig.16 Influence of different transition resistances

由图 16 可知,随着过渡电阻的增大,电压行波幅值减小,但是各行波波头到达保护安装处的时间并不会发生改变。经 200 Ω 电阻接地时,利用 WTMM 仍能准确标定各行波波头到达时刻及其极性,因此文中方案具有较好的耐过渡电阻能力。

3.5.2 线路长度影响分析

为分析文中方案对不同线路长度的适应性,将线路 MN 的长度分别设置为 100、200 km。分别在距 M 端 5%、40%、98%、102%以及 120%线路长度处设置 A 相接地故障,经仿真得到保护方案的动作结果如表 1 所示。

表 1 不同线路长度下仿真结果

Table 1 The simulation results under different line lengths

线路长度/ km	故障位置	k	L_f /km	M_1M_2	保护动作 结果
100	5%	0	4.86	\	√
	40%	0.398	\	\	√
	98%	0.974	\	-1	√
	102%	1.112	\	1	×
	120%	1.632	\	\	×
200	5%	0	9.67	\	√
	40%	0.412	\	\	√
	98%	0.986	\	-1	√
	102%	1.164	\	1	×
	120%	1.892	\	\	×

注:“\”表示未使用该故障特征量;“√”表示保护正确动作;“×”表示保护不动作。

由表 1 可知,对于 100 km 以及 200 km 的线路,

文中方案均能正确识别故障。但当线路长度进一步减小时,行波在线路上传播时间较短,其折反射过程较快,此时行波波头不能准确捕获的概率增大,行波保护可靠性降低,可交由工频量保护处理。

3.5.3 采样率影响分析

在选定的时间窗内,更高采样率下获得的采样点也更密集,有利于准确提取故障暂态特征量,从而避免行波波头未准确捕获的情况。从保护装置研制的实际情况出发,目前南瑞、四方等主流厂家的继电保护装置采样率最高可达 200 kHz。因此,对于文中采用的 200 kHz 采样率,当前保护厂家的硬件系统能够支持,同时也能够保证行波波头极性与到达时间的准确提取,从而实现故障的准确识别。

4 结论

文中针对传统工频量保护方案在新能源场景下难以适用的问题,提出基于电压行波极性特征的新能源送出线路保护方案。文中方案利用保护装置检测到的首个线模电压行波与零模电压行波到达时差初判故障位置;利用首个反极性的电压行波和故障初始电压行波到达保护安装处的时间差与故障位置的关系识别区内近端故障;利用前 2 个电压行波的极性关系识别区内末端故障和区外近端故障。主要结论如下:

(1) 发生正向故障时,保护安装处测得的首个与故障初始行波极性相反的行波必然是来自对端母线的反射波;

(2) 区内末端故障时,保护安装处测得的前 2 个电压行波极性相反;区外近端故障时,保护安装处测得的前 2 个电压行波极性相同;

(3) 文中方案须利用电压行波,但是电容式电压互感器对电压行波检测有一定影响,可采用电子式电压互感器或利用电容式电压互感器二次测量电压反演复现一次电压行波信号,后续需进一步开展相关研究工作。

致谢

本文得到国网安徽省电力有限公司科技项目(521200220009)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 田江南,安源,常德生,等. 碳中和背景下我国新型电力系统构建过程中的问题与建议[J]. 电力勘测设计,2022(7): 67-70.

TIAN Jiangan, AN Yuan, CHANG Desheng, et al. Problems and suggestions in the construction of China's new power system under the background of carbon neutrality[J]. Electric Power Survey & Design,2022(7):67-70.

- [2] 汤亮亮. 新型电力系统接地关键技术及展望[J]. 电瓷避雷器,2023(1):1-10.
TANG Liangliang. Key technologies review and prospect of grounding in new type power system[J]. Insulators and Surge Arresters,2023(1):1-10.
- [3] 贾宏杰,穆云飞. 新型电力系统中的综合能源关键技术[J]. 全球能源互联网,2023,6(5):445-446.
JIA Hongjie, MU Yunfei. Key technologies of integrated energy in new power system[J]. Journal of Global Energy Interconnection,2023,6(5):445-446.
- [4] 陈维江,赵国亮. 以新能源为主体的新型电力系统关键技术和装备[J]. 全球能源互联网,2022,5(1):1.
CHEN Weijiang, ZHAO Guoliang. Key technology and equipment of new power system based on renewable energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection,2022,5(1):1.
- [5] 国家能源局. 国家能源局发布 2022 年全国电力工业统计数据[J]. 电力勘测设计,2023(1):24.
National Energy Administration. National Energy Administration released statistical data of national electric power industry in 2022[J]. Electric Power Survey & Design,2023(1):24.
- [6] 郑黎明,贾科,毕天姝,等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(20):20-32.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. Power System Protection and Control,2021,49(20):20-32.
- [7] 毕天姝,刘素梅,薛安成,等. 逆变型新能源电源故障暂态特性分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):165-171.
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault characteristics of inverter-interfaced renewable energy sources [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(13):165-171.
- [8] 刘轶,王景钢. 大型光伏电站并网暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(7):182-187.
LIU Yi, WANG Jinggang. Analysis of transient characteristics when large-scale photovoltaics are connected to a power system [J]. Power System Protection and Control,2021,49(7):182-187.
- [9] 贾科,杨哲,赵其娟,等. 适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]. 电网技术,2019,43(9):3271-3280.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHAO Qijuan, et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission lines connected to renewable energy power plants [J]. Power System Technology,2019,43(9):3271-3280.
- [10] 郑黎明. 大规模新能源送出线路纵联保护新原理研究[D]. 北京:华北电力大学,2022.
ZHENG Liming. Study on novel pilot protection of transmission line with large-scale renewable energy power plants[D]. Beijing:North China Electric Power University,2022.
- [11] 林湘宁,刘琦,范理想,等. 基于相关分析的多端直流电网线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(13):45-55.
LIN Xiangning, LIU Qi, FAN Lixiang, et al. A novel pilot protection for VSC-MTDC based on correlation analysis [J]. Power System Protection and Control,2020,48(13):45-55.
- [12] 薛士敏,陈硕,顾诚,等. 一种基于暂态量的柔性直流系统保护及雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(9):45-53.
XUE Shimin, CHEN Shuo, GU Cheng, et al. A method for protection and lightning identification in a flexible DC system based on transient quantities[J]. Power System Protection and Control,2022,50(9):45-53.
- [13] 张晨浩,宋国兵,董新洲,等. 利用波前广义 Logistic 函数拟合的直流输电线路快速保护原理[J]. 中国电机工程学报,2019,39(11):3168-3176.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Principle of high speed protection for DC transmission line using wave front generalized Logistic function fitting[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(11):3168-3176.
- [14] 胡冰颖,李梅. 基于零模线模时差的配电网双端行波故障测距[J]. 电力工程技术,2021,40(2):114-120.
HU Bingying, LI Mei. Double ended traveling wave fault location in distribution network based on the time difference of zero-mode and line-mode [J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(2):114-120.
- [15] 董杏丽,葛耀中,董新洲,等. 基于小波变换的行波测距式距离保护原理的研究[J]. 电网技术,2001,25(7):9-13.
DONG Xingli, GE Yaozhong, DONG Xinzhou, et al. Wavelet transform based distance protection scheme with travelling wave fault location [J]. Power System Technology,2001,25(7):9-13.
- [16] 蔡俊强,孙二双,杨子力. 带 T 接分支的电缆-架空线混合线路双端行波故障定位[J]. 电工技术,2018(21):37-40,43.
CAI Junqiang, SUN Ershuang, YANG Zili. Double terminal traveling wave fault location for cable and overhead hybrid distribution lines with T branches[J]. Electric Engineering,2018(21):37-40,43.
- [17] 谢李为,曾祥君,柳祎璇. 基于 VMD-Hilbert 变换的故障行波定位研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(16):75-81.
XIE Liwei, ZENG Xiangjun, LIU Yixuan. Research on fault traveling wave location based on VMD-Hilbert transform [J]. Power System Protection and Control,2018,46(16):75-81.
- [18] 邓丰,黄懿菲,祖亚瑞,等. 基于行波全波形主频分量衰减特性的高压输电线路快速保护方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(24):8864-8876.
DENG Feng, HUANG Yifei, ZU Yarui, et al. High-speed protection method for transmission line based on the dominant frequency component attenuation characteristics of traveling-wave full waveform [J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(24):8864-8876.
- [19] 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):4690-4699.
ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Traveling wave protection sche-

- me of voltage polarity comparison formula for multi-terminal DC power network [J]. Power System Technology, 2022, 46(12):4690-4699.
- [20] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007.
- GE Yaozhong. Principle and technology of new relay protection and fault location[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [21] 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):4616-4629.
- 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):4616-4629.
- [22] 董长虹. Matlab小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- DONG Changhong. Matlab theory and application of wavelet analysis toolbox[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2004.
- [23] 宋国兵,靳东晖,靳幸福,等. CSC-HVDC输电线路单端行波自动故障定位方法[J]. 高电压技术,2014,40(2):588-596.
- SONG Guobing,JIN Donghui,JIN Xingfu,et al. Automatic fault location method for traveling wave on HVDC transmission line using single-terminal data [J]. High Voltage Engineering, 2014,40(2):588-596.
- [24] 郑玉平,司鑫尧,吴通华,等. 特高压半波长交流输电线路的行波保护[J]. 电力系统自动化,2020,44(18):124-131.
- ZHENG Yuping, SI Xinyao, WU Tonghua, et al. Travelling wave protection of UHV half-wavelength AC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 124-131.

作者简介:



叶远波

叶远波(1973),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作(E-mail:yeyb7079@ah.sgcc.com.cn);

章昊(1975),男,学士,高级工程师,从事电力系统运行与控制相关工作;

王同文(1981),男,博士,高级工程师,从事继电保护技术相关工作。

Renewable energy line protection based on voltage traveling wave polarity

YE Yuanbo¹, ZHANG Hao¹, WANG Tongwen¹, SONG Xiangyan³, SU Yi², ZHENG Tao³

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 3. North China Electric Power University (State Key Laboratory of Renewable Energy Power System), Beijing 102206, China)

Abstract: Renewable energy has weak feedforward and controlled characteristics, so the traditional industrial frequency protection does not work when renewable energy is sent out through AC transmission line. On the contrary, the traveling wave protection methods can judge the fault before the control system responds, which are one of the effective ways to solve the problem encountered in renewable power system. However, the existing traveling wave protection schemes are limited by the sampling rate, which makes it difficult to accurately identify the internal near-end fault and the internal remote-end fault. To solve this problem, the grid diagram of traveling wave in case of internal and external faults is analyzed at first. Then, the time difference between zero-mode and line-mode is used to judge the fault location. For the near-end fault and remote-end fault which are difficult to be accurately identified based on the time difference, the first reverse polarity traveling wave is used to identify the near-end fault and the polarity of the first two line-mode traveling waves is used to identify the remote-end fault. Simulation results show that the proposed scheme can quickly identify internal and external faults. At the same time, the proposed scheme has good ability to withstand transient resistance.

Keywords: renewable energy line; traveling wave protection; voltage traveling wave; wavelet transform; polarity comparison; single-ended protection

(编辑 方晶)