

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241222

基于护层接地线电流和分段 TKEO 的电缆早期故障检测方法

王晓卫¹, 魏春燕¹, 王毅钊², 张志华²

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710199)

摘要: 电缆早期故障放电持续时间短, 故障特征微弱, 难以触发常规的过电流保护, 故障查找困难。若不及时检测和处理, 故障会逐步恶化, 并在一定时间内发展成永久性故障。针对中压配电网极易发生电缆早期故障且难以灵敏可靠地检测故障的问题, 提出了一种基于护层接地线电流和分段 Teager-Kaiser 能量算子(Teager-Kaiser energy operator, TKEO)的电缆早期故障检测方法。首先, 采用最优变分模态分解(optimal variational mode decomposition, OVMD)对护层接地线电流信号进行分解, 利用中心频率法确定最优分解数, 获得本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)。然后, 计算各模态的脉冲因子和余弦相似度, 遴选出最具故障特征的模式分量。其次, 结合分段 TKEO 的导数分析信号的能量变化特征。最后, 计算每段 TKEO 的导数最大值与前一段 TKEO 导数最大值的比值, 设置合理阈值进行故障检测。仿真结果表明, 该方法能准确检测电缆状态, 实现早期故障检测, 保证了检测的灵敏性与可靠性。

关键词: 早期故障; 分段 Teager-Kaiser 能量算子; 脉冲因子; 余弦相似度

Early fault detection method for cables based on sheath grounding current and segmented TKEO

WANG Xiaowei¹, WEI Chunyan¹, WANG Yizhao², ZHANG Zhihua²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;

2. Institute of Electric Power Research of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710199, China)

Abstract: Early faults in cables are characterized by short-duration discharges and weak fault signatures, making them difficult to trigger conventional overcurrent protection and complicating fault detection. If not detected and addressed in time, such faults can gradually deteriorate into permanent failures. To address the challenge of sensitively and reliably detecting early-stage cable faults that are prone to occurring in medium-voltage distribution networks, this paper proposes a cable early fault detection method based on the sheath grounding wire current and the segmented Teager-Kaiser energy operator (TKEO). First, optimal variational mode decomposition (OVMD) is applied to decompose the sheath grounding wire current signal. The optimal decomposition number is determined using the central frequency method, yielding a set of intrinsic mode function (IMF). Then, the pulse factor and cosine similarity of each mode are calculated, and the mode component with the most pronounced fault characteristics is selected. Next, the energy variation characteristics of the signal are analyzed using the derivative of the segmented TKEO. Finally, the ratio of the maximum derivative value of each TKEO segment to that of the previous segment is calculated, and a suitable threshold is set for fault detection. Simulation results demonstrate that this method can accurately detect cable conditions, enabling early fault detection and ensuring both sensitivity and reliability in detection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177114 and No. 61403127).

Key words: early fault; segmented Teager-Kaiser energy operator; pulse factor; cosine similarity

0 引言

电力系统的稳定性和可靠性对于现代社会的正

常运行至关重要, 尤其是在电缆网络中。随着城市负荷功率的提升, 配电网电缆已从传统的三芯电缆转向大截面单芯电缆, 其中 10 kV 单芯电缆逐渐广泛应用, 成为电力系统中的关键设备^[1]。然而, 长期埋设在地下的电力电缆易受环境影响, 而导致接地故障, 进而引发停电。若在故障发展成永久性之

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177114, 61403127);
国网陕西省电力有限公司科技项目资助(5226KY23001U)

前,及时检测出线路早期故障并跳闸,就能将“事后抢修”转变为“事前预警”,从而有效避免故障^[2]。因此,针对电缆早期故障的研究和检测技术的开发显得尤为重要。

对于电缆早期故障的特征,文献[3]认为早期故障是可恢复性电弧故障,包括半周波和多周波电弧性故障两种,在持续时间为0.5~4个周波内故障自动清除。文献[4]认为早期故障是指间歇性、自恢复性的电弧放电,电弧自行熄灭之后电网立即恢复正常运行。文献[5]认为早期故障都是由逐渐老化导致的,绝缘内部存在局部恶化。文献[6]认为非有效性接地系统中的单相接地故障、高阻接地故障和自恢复电弧故障是弱故障。文献[7]认为电缆弱故障是绝缘外皮受损,局部绝缘劣化等故障特征不明显、能量弱的故障,将早期故障定义为弱故障和偶发的可恢复性电弧故障。

就故障瞬间能量释放而言,可恢复性电弧故障与永久性故障在极短的时间内都非常剧烈。可恢复性电弧故障虽然持续时间短,但是也会产生高温和火花,如果这些火花落在易燃材料上,可能会引发火灾。故本文所研究的故障是比可恢复性电弧故障能量更微弱的早期故障,且在相电流与相电压中的暂态特性更不明显。在形成电弧故障之前及时检测并迅速断开电路,可防止电弧故障引发火灾。传统的故障检测方法,如定期维护和人工巡检,已经难以满足现代电网对实时性和准确性的高要求。因此,研发先进信号处理和数据分析技术的早期故障检测方法成为当前研究的热点。

目前,针对早期故障的检测已有大量研究,包括基于信号处理方法,基于机器学习方法和基于神经网络方法。文献[8]通过分析相电流、零序电流和零序电压的变化特征,结合故障前初始状态和多个扰动特征,来实现“单相接地型”和“异名相两点接地型”早期故障的检测。文献[9]以不同负荷下的电弧电压波形特征归类为依据,利用全域总能量幅值和敏感域能量相位映射统计比实现了综合故障检测策略的构建。文献[10]通过对比故障护层电流与预期护层电流的比值来准确地检测早期故障。文献[11]采用S变换提取电缆故障特征,采用堆叠自编码器网络实现电缆状态分类。文献[12]利用S变换和Hilbert变换相结合的方法来提取早期故障特征,然后基于最小二乘支持向量机辨识早期故障。文献[13]利用电能质量监测仪记录的异常相位电压波形得到7个特征,然后根据特征选择方法和支持向量机结合粒子群优化,对各类早期故障进行检测。文献[14]利用平稳小波变换提取早期特征,通过堆叠非负约

束自动编码器构建深度学习网络,并使用Softmax分类器识别电缆早期故障。文献[15]以断层波形及其反射波形为研究对象。然后得到了时延、峰值电压和时频相位角差3个特性。将这3个特征作为广义回归神经网络的输入,取得了一定的效果。文献[16]通过电流突变量变化和电弧特征时域分布构建故障判据,利用突变幅度判断故障启动,并使用一维卷积神经网络实现故障检测。

早期故障信号微弱,以上通过提取相电流、相电压故障特征的方法检测效果较差,且检测容易受到噪声干扰,存在一定的局限性。因此,本文提出了一种基于护层接地线电流和分段Teager-Kaiser能量算子(Teager-Kaiser energy operator, TKEO)的电缆早期故障检测方法,该方法利用护层接地线电流特征,能够更灵敏准确地检测早期故障。首先,利用最优变分模态分解(optimal variational mode decomposition, OVMD)对护层接地线电流信号进行分解。其次,计算各IMF分量的脉冲因子和余弦相似度,遴选特征模态和最相似模态并相加重构,得到重构信号。再次,计算重构信号的TKEO并以时间 t 轴分段,计算每一段的TKEO导数最大值。最后,利用每一段TKEO导数最大值与其前一段TKEO导数最大值进行比值,根据比值构造判据,实现早期故障检测。模拟不同类型和不同工况下的早期故障,验证本文方法的适应性和可靠性。

1 早期故障特征分析

1.1 三相单芯电缆模型

在中压配电系统中,电力电缆通常采用三相单芯电缆结构,该结构不仅有助于降低电缆的电磁干扰,还能提高电缆的机械强度和传输效率。许多研究文献在三相单芯电缆模型中模拟和分析故障时,通常不会考虑电缆的护层。然而,护层会影响电缆的电气特性,若不考虑,会影响早期故障检测的准确性^[17]。为了更有效地检测中压电力电缆的早期故障,本文以10 kV单芯XLPE电缆为研究对象,分析其早期故障特征,电缆截面图如图1所示。图1直观展示了线芯、绝缘层、护层、外护套等关键部分的构造,其中:线芯半径 $r_s = 9.15 \text{ mm}$ 、主绝缘外半径 $r_m = 15.65 \text{ mm}$ 、护层内半径 $r_c = 17.65 \text{ mm}$ 。在图2所示的10 kV三相单芯电缆配电系统中,深入分析可能的早期故障类型,以及其在电缆中的表现形式和特征,为电缆早期故障检测提供理论依据。

为了确保电缆和整个电力系统的安全和稳定运行,防止感应电压积累导致的电击事故和绝缘破坏,护层需要进行有效接地来限制护层上的感应电压,

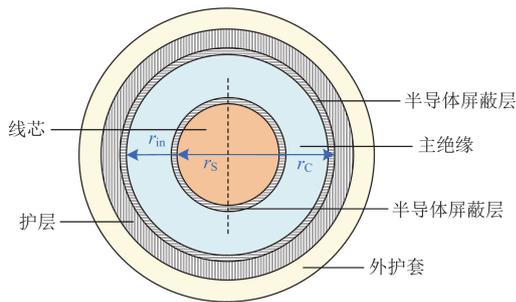


图 1 10 kV 单芯 XLPE 电缆截面图

Fig. 1 10 kV single-core XLPE cable section diagram

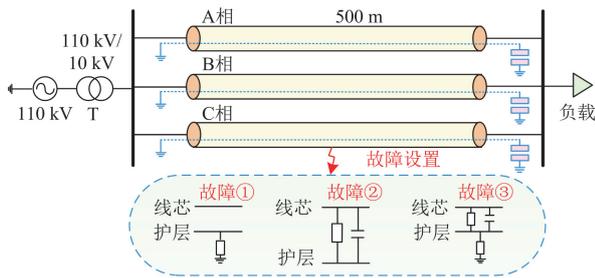


图 2 10 kV 三相单芯电缆配电系统

Fig. 2 10 kV three-phase single-core cable distribution system

将故障电流和感应电压迅速引入地面, 从而避免电缆外表面带电, 保障人身安全和设备的可靠运行。不同长度的电缆采用不同的接地方式, 以优化电气性能和成本效益。

1) 对于较短的电缆(通常小于500 m), 采用一端接地, 另一端设置避雷器保护, 结构简单, 施工方便, 成本较低, 如图 3 所示;

2) 对于中等长度的电缆(500~1000 m), 采用中点接地, 可以有效降低护层上的感应电压, 均衡电缆电气应力, 提升系统稳定性;

3) 对于超过 1000 m 的长电缆, 则采用护层交叉互联的方式, 通过多点接地显著减少感应电压, 改善电缆电气性能, 减少运行损耗, 提高系统的安全性和可靠性。

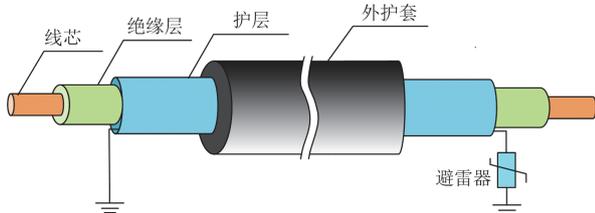


图 3 电缆护层单端接地

Fig. 3 Cable sheath single-ended grounding

1.2 早期故障机理

电缆是电力系统输电线路中的重要设备, 在

长期的使用中受到土壤、水分和机械力的影响会达到预期的使用寿命, 一般为 30 年, 此过程引起的绝缘缺陷使绝缘电阻降低。随着电缆运行时间的增加, 绝缘缺陷开始显现, 形成局部薄弱区域, 电缆较大概率发生护层接地故障, 也可能发生线芯-护层高阻短路故障; 由于绝缘持续劣化, 进而演变成护层接地+线芯-护层高阻短路的复合故障, 但发生概率较小; 以上能量微弱的故障均为早期故障, 虽然对电缆的影响可能不明显, 但故障未及时处理, 故障将进一步发展, 缩短电缆寿命; 随着时间推移, 电缆可能出现局部放电现象, 逐渐形成偶发的可恢复性电弧故障; 随着绝缘电阻降低愈加频繁, 逐步演变为频发的间歇性电弧故障; 加剧电缆绝缘的劣化, 导致不可逆的绝缘破坏, 最终发展成为永久性故障。因此, 如图 4 所示, 可将电缆状态的演变过程总结为 3 个阶段: 早期故障易发阶段^[18](5~10 年)、电弧故障易发阶段^[19](10~30 年)、永久性故障易发阶段^[20](30 年以上)。

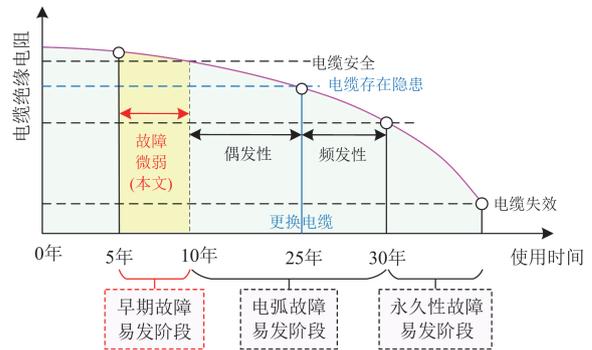


图 4 电缆状态的演变过程

Fig. 4 Evolution of the cable state

在电缆的整个生命周期中, 不同阶段的故障特征和风险水平各异。早期故障阶段通常难以察觉, 虽不立即影响电缆的正常运行, 但若不及时检测和处理, 可能加剧绝缘劣化, 导致更严重的后续故障。为此, 本文重点分析电缆早期故障中 3 种常见的故障类型, 如图 2 中故障设置。故障①: 护层接地故障; 故障②: 线芯-护层高阻短路故障; 故障③: 故障①+故障②。

1.3 特征信号分析

护层电流会导致护层损耗和温升, 影响电缆的运行效率。早期故障时线芯相电流变化不明显, 通过对护层接地线电流进行实时监测和分析, 可以更准确地检测出线路是否发生早期故障。本文以 C 相为例, 利用 C 相首端的护层接地线电流 I_{SS} 进行早期故障的检测。护层接地线电流 I_{SS} 由两部分组

成：一是三相线芯对 C 相护层的感应电流 I_{IC} ；二是 C 相线芯通过绝缘电阻流向 C 相护层的泄漏电流 I_L 。

1) C 相护层感应电流 I_{IC} 计算

感应电流由电磁感应现象产生。当三相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 通过单芯电缆时，会在其周围产生交变磁场。交变磁场穿过电缆的护层，根据法拉第电磁感应定律，磁通量变化会在护层上产生感应电动势。以 C 相为例，磁场强度 $H(x)$ 与相电流 I_C 的关系为

$$H(x) = \frac{I_C}{2\pi x} \quad (1)$$

式中： x 是距离电缆中心的距离。

磁感应强度 $B(x)$ 与磁场强度 $H(x)$ 的关系为

$$B(x) = \mu H(x) = \frac{\mu I_C}{2\pi x} \quad (2)$$

式中： μ 是材料的相对磁导率。

若沿电缆径向取等效微元 dx 为宽，则与轴向单位长度形成的矩形面中通过的磁通为 $d\phi$ 。由于此部分磁通与护层相链，则此部分磁通即为圆磁通。

$$d\phi = B(x) \cdot dx \cdot l = \frac{\mu I_C}{2\pi x} dx \quad (3)$$

设 C 相线芯半径为 r_s ，C 相护层半径为 r_c ，则 C 相线芯电流产生的磁链 ψ_{CC} 为

$$\psi_{CC} = \int_{r_s}^{r_c} \frac{\mu I_C}{2\pi x} dx = \frac{\mu I_C}{2\pi} \int_{r_s}^{r_c} \frac{1}{x} dx \quad (4)$$

计算该积分可得

$$\psi_{CC} = \frac{\mu I_C}{2\pi} \cdot \ln(x) \Big|_{r_s}^{r_c} = \frac{\mu I_C}{2\pi} \ln\left(\frac{r_c}{r_s}\right) \quad (5)$$

C 相线芯电流对单位长度的 C 相护层护层上产生的自感 L_{CC} 为

$$L_{CC} = \frac{\psi_{CC}}{I_C} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{r_c}{r_s}\right) \quad (6)$$

C 相线芯电流对 C 相护层的感应电动势 e_{CC} 为

$$e_{CC} = -L_{CC} \frac{dI_C}{dt} \quad (7)$$

式中：假设 $I_C = I_{C0} \cos(\omega t + \phi_C)$ ，其中 I_{C0} 是电流幅值， ω 为角频率， ϕ_C 为 C 相电流的相位角。则

$$e_{CC} = -L_{CC} \frac{dI_C}{dt} = L_{CC} I_{C0} \omega \sin(\omega t + \phi_C) \quad (8)$$

将自感 L_{CC} 代入可得

$$e_{CC} = \frac{\mu I_{C0} \omega}{2\pi} \ln\left(\frac{r_c}{r_s}\right) \sin(\omega t + \phi_C) \quad (9)$$

同理可得 A 相线芯电流对 C 相护层的感应电动势 e_{AC} 为

$$e_{AC} = \frac{\mu I_{A0} \omega}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{AC}}{r_s}\right) \sin(\omega t + \phi_A) \quad (10)$$

式中： I_{A0} 是 A 相线芯电流幅值； r_{AC} 是 A 相线芯到 C 相护层的距离； ϕ_A 为 A 相电流的相位角。

B 相线芯电流对 C 相护层的感应电动势 e_{BC} 为

$$e_{BC} = \frac{\mu I_{B0} \omega}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{BC}}{r_s}\right) \sin(\omega t + \phi_B) \quad (11)$$

式中： I_{B0} 是 B 相线芯电流幅值； r_{BC} 是 B 相线芯到 C 相护层的距离； ϕ_B 为 B 相电流的相位角。

在三相单芯电缆系统中，三相线芯电流产生的磁场会在相邻护层上感应出电压和电流，因此护层之间存在一定的电磁耦合现象。但在 10 kV 系统中，由于电压等级较低，护层之间耦合相对较弱，对感应电压的贡献也较小。在实际研究中，为了简化分析和计算过程，通常忽略护层之间的耦合作用，而主要考虑线芯电流对护层的直接感应作用。通过这种简化，可以更加聚焦于主要影响因素，提升研究的可操作性和结果的可理解性。

图 5 展示了 A、B、C 三相线芯对 C 相护层的耦合关系，C 相护层与 C 相线芯间的自感为 L_{CC} ，C 相护层与 B 相线芯间的互感为 M_{BC} ，C 相护层与 A 相线芯间的互感为 M_{CA} 。A、B、C 三相线芯阻抗分别为 Z_A 、 Z_B 、 Z_C ，而 C 相护层的阻抗则为 Z_{CS} 。

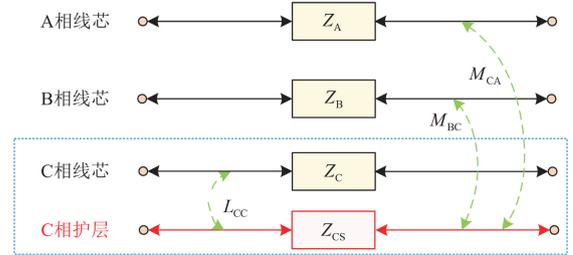


图 5 A、B、C 三相线芯对 C 相护层的耦合关系

Fig. 5 Coupling of A, B and C phase cores to C phase sheaths

由 A、B、C 三相线芯对 C 相护层的耦合关系可推得 C 相护层的感应电流 I_{IC} 为

$$I_{IC} = \frac{U_{IC}}{Z_{CS}} = \frac{e_{AC} + e_{BC} + e_{CC}}{Z_{CS}} = \frac{\mu \omega}{2\pi Z_{CS}} \times \begin{bmatrix} I_{A0} \ln\left(\frac{r_{AC}}{r_s}\right) \sin(\omega t + \phi_A) + \\ I_{B0} \ln\left(\frac{r_{BC}}{r_s}\right) \sin(\omega t + \phi_B) + \\ I_{C0} \ln\left(\frac{r_c}{r_s}\right) \sin(\omega t + \phi_C) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: U_{IC} 为 C 相护层感应电压; Z_{CS} 为 C 相护层阻抗。

2) C 相线芯向 C 相护层的泄漏电流 I_L 计算

泄漏电流是指线芯通过绝缘电阻流向护层的电流。图 6 为电缆线芯与护层等效电路图, 详细展示了二者的电气连接关系。图 6 中: 电缆的线芯阻抗表示为 Z_{CX} ; 流经线芯的电流为 I_C ; 线芯与护层之间绝缘的等效阻抗用 Z_{CH} 表示; 流经该阻抗的电流为泄漏电流 I_L ; 护层上的等效阻抗分别用 Z_{SL} 和 Z_{SR} 表示; 流经护层左侧阻抗 Z_{SL} 的电流为 I_{LL} , 流经护层右侧阻抗 Z_{SR} 的电流为 I_{LR} , I_{LL} 和 I_{LR} 最终通过护层接地线流向地面; R_g 是护层右侧的接地电阻; I_{SS} 是首端护层接地线电流; I_{Sc} 是末端护层接地线电流。

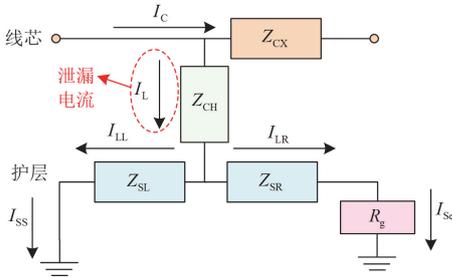


图 6 线芯与护层等效电路图

Fig. 6 Core and sheath equivalent circuit diagram

设线芯与护层之间的电压差为 V , 根据欧姆定律, 泄漏电流 I_L 可以表示为

$$I_L = \frac{V}{Z_{CH}} \quad (13)$$

流向电缆左端的 I_{LL} 和流向电缆右端的 I_{LR} 的大小由 Z_{SL} 和 Z_{SR} 决定。

$$I_{LL} = \frac{Z_{SR}}{Z_{SL} + Z_{SR}} \cdot I_L \quad (14)$$

$$I_{LR} = \frac{Z_{SL}}{Z_{SL} + Z_{SR}} \cdot I_L \quad (15)$$

3) 护层接地线电流 I_{SS} 计算

护层接地线电流 I_{SS} 是护层感应电流与泄漏电流的矢量和^[7]。

$$I_{SS} = I_{IC} + I_L \quad (16)$$

2 检测基本理论

2.1 OVMD 法

OVMD 法是一种改进的变分模态分解方法。通过每个模态的中心频率, 确定最优的分解模态函数个数 K 以获得最佳的分解效果, 通过残差误差指数

(residual error index, REI) 最小化来确定拉格朗日乘子更新步长 τ , 提高信号分解的精度和适应性^[21]。OVMD 主要步骤如下所示。

1) 设连续原始信号 $f(t)$ 分解为 K 个模态分量, $i=1, 2, \dots, K$, 每个模态对应一个中心频率 ω_i , 则第 i 个连续模态分量 $u_i(t)$ 为

$$u_i(t) = A_i(t) \cos[\varphi_i(t)] \quad (17)$$

式中: $A_i(t)$ 为振幅函数; $\varphi_i(t)$ 为相位函数。

2) 对每个模态分量依次执行 Hilbert 变换、频谱调制以及梯度二范数运算, 估计出各模态分量带宽 δ , 并以此构建约束变分模型, 如式(18)所示。

$$\min_{\{u_i\}, \{\omega_i\}} \left\{ \sum_{i=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_i(t) \right] e^{-j\omega_i t} \right\|_2^2 \right\} \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^K u_i = f(t)$$

式中: $\{u_i\}$ 、 $\{\omega_i\}$ 分别对应分解后第 i 个模态分量和中心频率; $\delta(t)$ 为狄拉克函数; $*$ 为卷积运算符; ∂_t 为梯度算子; $f(t)$ 为连续原始信号。

3) 充分利用二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘子 $\lambda(t)$ 的优点, 将上述有约束的变分问题转换为无约束的变分问题, 即

$$L(\{u_i\}, \{\omega_i\}, \lambda) = \alpha \cdot \sum_{i=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_i(t) \right] e^{-j\omega_i t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{i=1}^K u_i(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_{i=1}^K u_i(t) \right\rangle \quad (19)$$

4) 采用交替方向乘子法迭代求解无约束变分问题, u_i 、 ω_i 和 $\lambda(t)$ 迭代过程为

$$\hat{u}_i^{m+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{j \neq i} \hat{u}_j(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_i)^2} \quad (20)$$

$$\omega_i^{m+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_i(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_i(\omega)|^2 d\omega} \quad (21)$$

$$\hat{\lambda}^{m+1}(\omega) = \hat{\lambda}^m(\omega) + \tau \left[\hat{f}(\omega) - \sum_{i=1}^K \hat{u}_i^{m+1}(\omega) \right] \quad (22)$$

式中: $\hat{u}_i^{m+1}(\omega)$ 为剩余量 $\hat{f}(\omega) - \sum_{j \neq i} \hat{u}_j(\omega)$ 通过维纳滤波获得; m 为迭代次数; ω_i^{m+1} 为当前模态函数功率谱的重心; τ 为拉格朗日乘子更新步长; 对 $\{\hat{u}_i(\omega)\}$ 进行傅里叶逆变换则其实部为 $\{u_i(t)\}$ 。

对于给定的求解精度, 当方程(23)满足时, 迭代停止。

$$\sum_i \frac{\|u_i^{m+1} - u_i^m\|_2^2}{\|u_i^m\|_2^2} < \varepsilon \quad (23)$$

式中: u_i^m 为第 i 个模态分量在第 m 次迭代后的结果; ε 为设置的阈值。

5) 分析不同 K 值下分解模态的中心频率 ω_i , 一旦出现相似频率, 此时的 K 被确定为分解的最佳 K 。然后, 通过残差最小化准则来选择最优的拉格朗日乘子更新步长 τ 。

$$R_{\text{El}} = \min \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \sum_{i=1}^K u_i(t) - f(t) \right| \right\} \quad (24)$$

式中: n 为采样点个数; 当残差 R_{El} 达到最小, 确定最佳的 τ 值。

2.2 脉冲因子

脉冲因子^[22](crest factor)是一个无量纲参数, 用于量化信号中最极端的瞬态值相对于其平均水平的比例。在 VMD 分解中, 每个本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)包含着由故障引起的不同频率分量。其中, 脉冲因子最大的 IMF 包含最丰富的故障信息, 可以更有效地提取故障特征。脉冲因子定义为

$$I = \frac{u_p}{u_{\text{arv}}} = \frac{\max |u_{ij}(n)|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^K |u_{ij}(n)|} \quad (25)$$

式中: u_p 为峰值; u_{arv} 为绝对值的平均值; $u_{ij}(n)$ 为第 i 个离散 IMF 分量中第 j 个采样点的电流值, $i = 1, 2, \dots, K$ 。

2.3 余弦相似度

余弦相似度是一种用于衡量两个向量之间夹角的相似度指标^[23]。它衡量了两个向量之间的相似度, 其取值通常在 0 到 1 之间, 特定情况下在 -1 到 1 之间, 定义为

$$\cos(\theta) = \frac{u_i(n) \cdot f(n)}{|u_i(n)| |f(n)|} = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}(n) f_j(n)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij}(n))^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_j(n))^2}} \quad (26)$$

式中: $\cos(\theta)$ 为余弦相似度; $u_i(n)$ 为第 i 个离散 IMF 分量; $f(n)$ 为离散原始信号; $u_{ij}(n)$ 为第 i 个离散 IMF 分量中第 j 个采样点的电流值; $f_j(n)$ 为离散原始信号中第 j 个采样点的电流值; $j = 1, 2, \dots, n$ 。

2.4 TKEO

TKEO 是一种不涉及积分变换的非线性局部微分算子, 具有计算简便、瞬时响应灵敏、对非平稳信

号适应性强等优势。对于离散信号 $z(n)$ 的 TKEO^[24], 定义为

$$\psi[z(n)] = [z(n)]^2 - z(n+1) \cdot z(n-1) \quad (27)$$

式中: $z(n)$ 为重构信号在采样点 n 处的值; $\psi[z(n)]$ 为重构信号在采样点 n 处的 TKEO。

3 早期故障检测判据构造

在电力电缆的早期故障检测中, 为了准确识别故障并采取有效措施, 构建有效的故障检测判据至关重要。采用 OVMD 对护层接地线电流信号进行分解, 并通过中心频率法确定所需的分解模态数 K 。计算每个 IMF 分量的脉冲因子和余弦相似度, 确定特征模态和最相似模态并相加重构; 计算重构信号的 TKEO 并以时间 t 轴分成 e 段, 计算每一段的 TKEO 导数最大值; 计算每一段 TKEO 导数最大值与前一段 TKEO 导数最大值的比值, 记为 k_1, k_2, \dots, k_{e-1} , 其计算公式为

$$k_r = \frac{\max F_y}{\max F_{y-1}} \quad (28)$$

式中: r 为比值个数, $r = 1, 2, \dots, e-1$, e 为分段个数; F_y 为第 y 段的 TKEO 导数最大值, $y = 1, 2, \dots, e$ 。

利用比值构造早期故障检测判据, 具体为

$$\text{状态} = \begin{cases} \text{故障} & \exists k_r > 1 \\ \text{未故障} & \forall k_r = 1 \end{cases} \quad (29)$$

线路正常运行时, 每一段 TKEO 导数最大值与前一段 TKEO 导数最大值的比值均为 1, 线路故障时, 故障段的 TKEO 导数最大值必然大于故障前一段的 TKEO 导数最大值, 即至少存在一个 $k_r > 1$, 故将 1 设定为阈值。

图 7 为早期故障检测流程图, 直观地展示了电力电缆早期故障检测的具体步骤及判据构建过程。

4 仿真实验

4.1 仿真模型

利用 PSCAD 搭建 10 kV 三相单芯电缆仿真系统, 如图 8 所示。该系统是由一个 110 kV 电源、一个 110 kV/10 kV 变压器、一条电缆线路和负载组成。一条电缆线路是由 A、B、C 三相单芯电缆组成, 长度为 500 m, 电缆采用单端接地方式。三相单芯电缆按水平排列, 如图 9 所示。单芯电缆的参数如表 1 所示。利用该系统分别对图 2 中的 3 种常见的早期故障类型进行仿真。通过对 3 类故障改变工况来模拟更多早期故障发生情况。设置采样频率为 10 kHz, 仿真总时间为 0.2 s, 0.1006 s 时发生早期

故障, 故障持续时间 0.005 s。

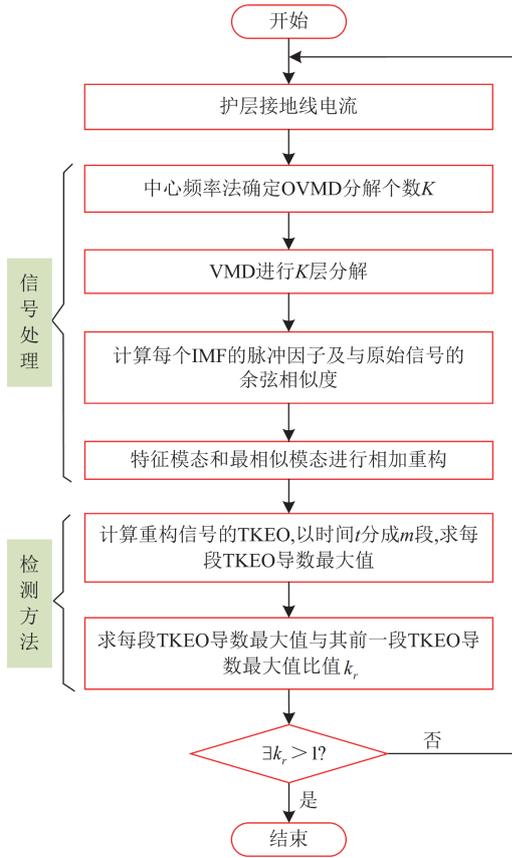


图 7 故障检测流程

Fig. 7 Fault detection process

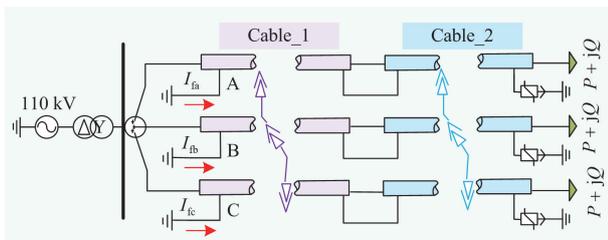


图 8 10 kV 三相单芯电缆系统仿真模型

Fig. 8 Simulation model of 10 kV three-phase single-core cable system

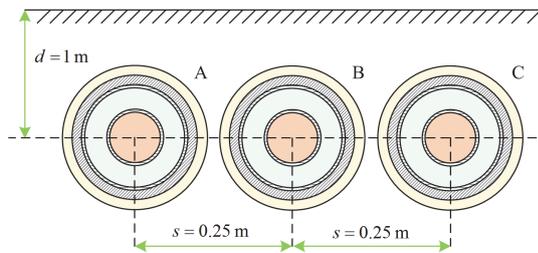


图 9 三相单芯电缆排列结构

Fig. 9 Structure of three-phase single-core cable arrangement

表 1 单芯电缆参数

Table 1 Parameters of single-core cables				
结构	外半径/ mm	电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	相对介 电常数	相对 渗透率
线芯	9.15	1.72×10^{-8}	—	1
主绝缘	15.65	—	2.3	1
护层	17.65	1.72×10^{-8}	—	1
外护套	20.65	—	2.3	1

4.2 故障检测结果分析

1) 故障①: 护层接地故障

在 C 相上, 距离母线 255 m 处发生护层接地故障, 且故障电阻 R_f 为 1000Ω 时, 护层接地线电流结果如图 10(a)。由图 10(a)可看出, 在 0.1006 s 时发生了护层接地故障, 电流波形出现轻微振荡, 但故障暂态特征不明显。利用中心频率法确定最优分解模态数 $K = 4$, 故对护层接地线电流进行 OVMD 分解, 得到 4 个 IMF 波形, 如图 10(b)—图 10(e)所示。分解得到的 IMF_1 、 IMF_2 、 IMF_3 波形在 0.1006 s 时暂态特征明显。计算 4 个 IMF 分量的脉冲因子和余弦相似度, 脉冲因子最大的 IMF_1 为特征模态, 余弦相似度最大的 IMF_4 为最相似模态。将 IMF_1 和 IMF_4

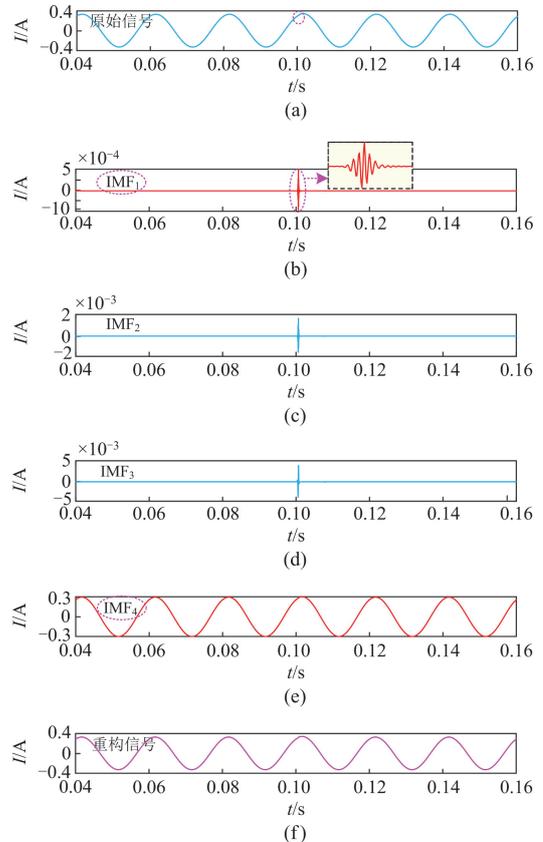


图 10 故障①时信号重构仿真过程

Fig. 10 Simulation process of signal reconstruction at fault ①

进行相加重构, 得到重构信号, 如图 10(f)所示。较好地保留了故障信息, 并去除了不必要的高频成分, 使得故障特征更加清晰, 便于对故障暂态特征的分析。

得到重构信号, 计算重构信号的 TKEO, 如图 11(a), 将 TKEO 波形以时间 t 均分 3 段, 记为 $E_{1[0.04,0.8]}, E_{2[0.8,0.12]}, E_{3[0.12,0.16]}$ 。由图 11(a)可看出, E_1 、 E_3 段的 TKEO 幅值近似为 0, E_2 段的 TKEO 波形在 0.1002 s 到 0.1012 s 之间出现了明显的振荡, 但是幅值变化小。为了更清晰地检测到细微的变化, 对 E_1 、 E_2 、 E_3 分别进行一阶导数计算, 得到导数波形, 记为 $F_{1[0.04,0.8]}, F_{2[0.8,0.12]}, F_{3[0.12,0.16]}$, 如图 11(b)。图 11(b)中, F_1 、 F_3 段 TKEO 导数波形无波动, F_2 段 TKEO 导数幅值在 0.1002 s 到 0.1012 s 之间突变, 且最大值 $\max F_2 \approx 217$ 。未故障 F_1 、 F_3 段 TKEO 导数最大值 $\max F_1 = \max F_3 \approx 0.001$, 则 $k_1 = 2.17 \times 10^5 > 1$, 满足早期故障检测条件, 该方法具有较高的敏感性和鲁棒性。

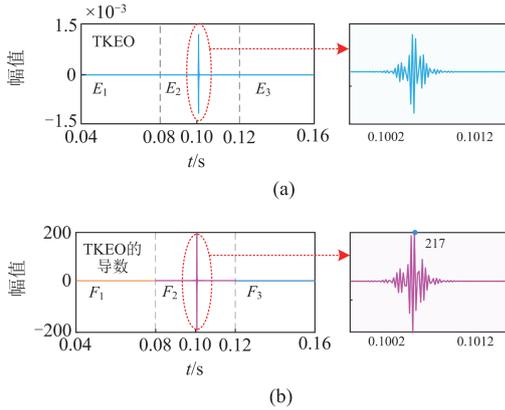


图 11 故障①时 TKEO 波形及其导数波形

Fig. 11 TKEO waveform and its derivative waveform at fault ①

2) 故障②: 线芯-护层高阻短路故障

在距离母线 255 m 处发生线芯-护层高阻短路故障, 且故障电阻 R_2 为 100Ω 。同故障①的分析步骤分析故障②, 护层接地线电流重构仿真过程如图 12 所示。从图 12 可以看出, 护层接地线电流(原始信号)被分解成 4 个 IMF, 且将 IMF_1 和 IMF_4 进行相加可得到重构信号, 如图 12(f)所示。同故障①, 得到波形及其导数波形, 如图 13 所示。

在图 13 中, TKEO 波形的 E_2 段和 TKEO 导数波形的 F_2 段均为故障发生段, 在故障发生前后 TKEO 波形及其导数波形均近似为 0。在故障发生时段波形突变, 幅值变化大, TKEO 幅值最大达到 1.2×10^3 , TKEO 导数最大达到 1.8×10^7 , 均表现出

显著的突变特征。而未故障 F_1 、 F_3 段 TKEO 导数最大值近似为 0.0057。则 F_1 段和 F_2 段的 TKEO 导数最大值比值 $k_1 = 3.15 \times 10^9 > 1$, 满足故障条件, 实现对故障时刻突变特征的检测。

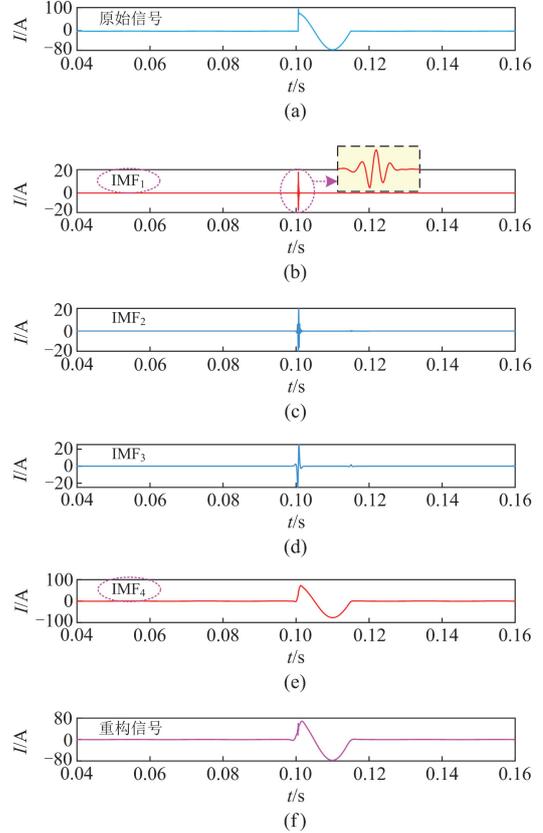


图 12 故障②时信号重构仿真过程

Fig. 12 Simulation process of signal reconstruction at fault ②

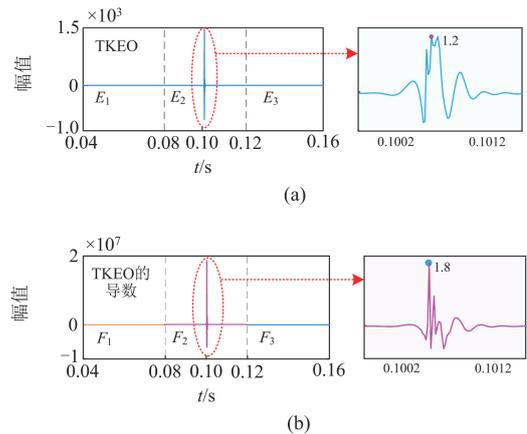


图 13 故障②时 TKEO 波形及其导数波形

Fig. 13 TKEO waveform and its derivative waveform at fault ②

3) 故障③: 故障① + 故障②

在距离母线 255 m 处发生护层接地 + 线芯-护

层高阻短路故障, 且护层接地电阻 R_1 为 1000Ω , 线芯与护层间电阻 R_2 为 100Ω 。同理, 得护层接地线电流重构仿真过程如图 14 所示。图 14(a)中护层接地线电流在 0.1006 s 时电流突变。为了更细致地观察故障特征, 将信号分解成 4 个 IMF, 且将 IMF_1 和 IMF_4 进行相加可得到重构信号, 如图 14(f)所示。

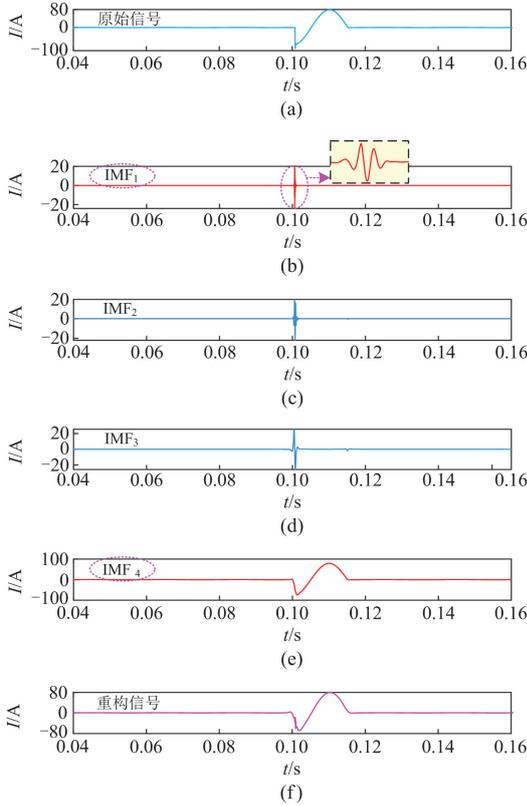


图 14 故障③时信号重构过程

Fig. 14 Process of signal reconstruction at fault ③

同故障①得 TKEO 波形及其导数波形, 如图 15, TKEO 在 E_1 段未发生故障时幅值近似为 0, 在 E_2 段的 0.1006 s 故障时幅值突增, 故障结束后幅值恢复至 0。TKEO 导数波形具有同样的变化趋势, 且 F_2 段幅值变化更大, 最大值可达到 1.9×10^7 , 突变特征比 F_1 、 F_3 段明显。通过对 TKEO 导数每段的最大值进行比值, 可更清晰地描述故障特征。此时, $k_1 = 3.28 \times 10^9 > 1$, 则该方法成功检测出早期故障。

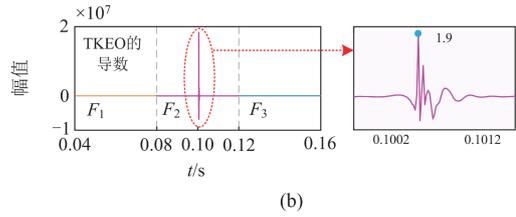
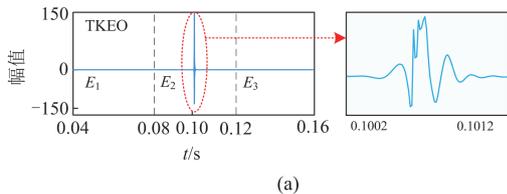


图 15 故障③时 TKEO 波形及其导数波形

Fig. 15 TKEO waveform and its derivative waveform at fault ③

4.3 不同工况下检测分析

在电缆故障检测中, 不同故障初始条件可能对检测产生影响。在距离母线 30 m 处、 255 m 处或 470 m 处模拟发生早期故障, 并且设置 0° 、 60° 、 90° 的故障初始角, 不同严重程度早期故障检测结果如表 2—表 4 所示。

由表 2 可知, 护层接地电阻在 $100 \sim 1000 \Omega$ 时, 检测结果均满足 $k_1 > 1$, 能够成功检测出特征微弱的故障①, 且检测准确度不受故障位置或初始角度影响; 由表 3 可知, 线芯与护层之间的短路电阻在 $20 \sim 100 \Omega$ 时, 检测结果为 $k_1 > 1$, 在不同工况下稳

表 2 不同工况下故障①的检测结果

Table 2 Detection results of fault ① under different conditions

早期故障条件	$k_1 / \text{p.u.}$				
	100Ω	300Ω	600Ω	1000Ω	
30 m	0°	4.1×10^6	1.3×10^6	6.5×10^5	3.9×10^5
	60°	4.6×10^6	1.5×10^6	7.3×10^5	4.4×10^5
	90°	6.7×10^6	2.0×10^6	9.7×10^5	9.7×10^5
255 m	0°	5.5×10^8	7.2×10^5	3.6×10^5	2.2×10^5
	60°	8.6×10^7	2.8×10^7	7.5×10^6	4.5×10^6
	90°	4.1×10^7	2.5×10^7	1.2×10^7	6.6×10^6
470 m	0°	1.0×10^8	3.8×10^7	1.9×10^7	1.2×10^7
	60°	8.1×10^7	4.7×10^7	2.4×10^7	1.4×10^7
	90°	5.2×10^7	3.9×10^7	6.9×10^6	4.2×10^6

表 3 不同工况下故障②的检测结果

Table 3 Detection results of fault ② under different conditions

早期故障条件	$k_1 / \text{p.u.}$				
	20Ω	50Ω	70Ω	100Ω	
30 m	0°	9.3×10^9	5.9×10^9	4.7×10^9	3.6×10^9
	60°	1.3×10^9	7.6×10^8	6.0×10^8	4.5×10^8
	90°	5.0×10^9	2.2×10^9	1.6×10^9	1.2×10^9
255 m	0°	7.1×10^9	4.1×10^9	3.1×10^9	2.3×10^9
	60°	1.2×10^9	4.8×10^8	3.7×10^8	2.7×10^8
	90°	2.6×10^9	1.6×10^9	1.1×10^9	8.0×10^8
470 m	0°	1.0×10^{10}	6.3×10^9	4.9×10^9	3.6×10^9
	60°	1.7×10^9	8.9×10^8	6.7×10^8	4.9×10^8
	90°	5.5×10^9	2.4×10^9	1.8×10^9	1.3×10^9

表 4 不同工况下故障③的检测结果

Table 4 Detection results of fault ③ under different conditions

早期故障条件	k_1 /p.u.				
	100 Ω + 20 Ω	300 Ω + 50 Ω	600 Ω + 70 Ω	1000 Ω + 100 Ω	
30 m	0°	1.1×10^{10}	6.1×10^9	4.8×10^9	3.6×10^9
	60°	1.5×10^9	7.9×10^8	6.1×10^8	4.6×10^8
	90°	6.0×10^9	2.3×10^9	1.7×10^9	1.2×10^9
255 m	0°	1.0×10^{10}	5.7×10^9	4.4×10^9	3.3×10^9
	60°	1.3×10^9	6.9×10^8	5.3×10^8	4.0×10^8
	90°	5.7×10^9	2.2×10^9	1.6×10^9	1.1×10^9
470 m	0°	1.0×10^{10}	6.7×10^9	5.3×10^9	4.0×10^9
	60°	1.6×10^9	9.5×10^8	7.6×10^8	5.7×10^8
	90°	5.8×10^9	2.6×10^9	1.9×10^9	1.4×10^9

定检测出故障②；由表 4 可知，线芯与护层之间的短路电阻在 20~100 Ω ，且护层接地电阻在 100~1000 Ω 之间这一复杂工况下，检测结果始终为 $k_1 > 1$ ，能准确检测出较严重的早期故障③。综上，本文方法能够准确识别出不同严重程度早期故障，并对故障位置和初始角度不敏感，适用于多种复杂工况下的电缆早期故障检测。

4.4 不同能量算子特征提取对比分析

将 TKEO 与能量算子(energy operator, EO)、Hilbert 能量的特征提取及故障检测进行对比。图 16 展示了 3 种能量算子方法对护层接地线电流计算得到的能量波形。EO 在整个时间范围内表现出周期性波动，但是在故障时并没有明显突出的峰值，对瞬时突变的响应较弱。Hilbert 能量虽然有较大的幅值，但在早期故障信号检测中灵敏度不够高，在突变特征提取方面稍显劣势。TKEO 波形图在故障发

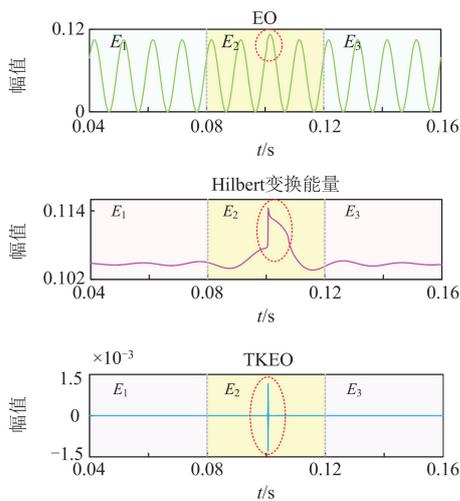


图 16 不同方法下能量波形

Fig. 16 Energy waveforms by using different methods

生时出现了明显的突变响应，对信号瞬态突变具有高度敏感性，能够准确捕捉到故障瞬时的特征。

使用 3 种能量算子方法对故障①进行检测，结果如表 5 所示。3 种方法都满足故障条件 $k_1 > 1$ ，均能实现对早期故障的检测。然而 TKEO 导数最大值比值 $k_1 = 2.17 \times 10^5$ ，显著高于 EO 和 Hilbert 能量方法，在检测信号突变时的特征提取效果更加突出，更适合早期故障检测。

表 5 不同 EO 的检测结果

Table 5 Detection results for different EOs

方法	k_1 /p.u.	k_2 /p.u.	状态
TKEO	2.17×10^5	0	故障
EO	6.68	0.15	故障
Hilbert 能量	1811	0	故障

4.5 抗噪性分析

在实际现场应用中，故障检测会受到噪声干扰，为了全面评估噪声对所提出的方法的影响，在护层接地线电流中加入不同水平的高斯白噪声，信噪比分别为 30 dB、40 dB 和 50 dB。故障①的故障位置距离母线 255 m，故障电阻 $R_1 = 100 \Omega$ ，故障初始相角为 0° 时含不同信噪比的信号如图 17 所示。

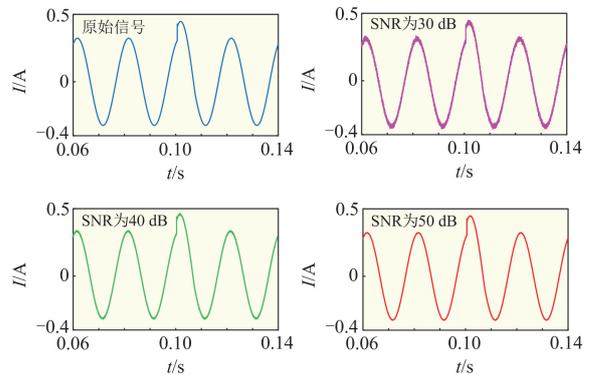


图 17 不同信噪比的信号

Fig. 17 Signals with different signal-to-noise ratios

当故障特征过于微弱时，若分解层数过低，则不能准确检测出故障。通过 OVMD 确定加入不同信噪比的护层接地线电流信号最优分解数。故障①时信号分解层数具体数据见表 6。信噪比为 30 dB 和 40 dB 时，噪声明显干扰故障特征，需要更高层数的分解，100 Ω 故障电阻的分解层数分别为 4、2；1000 Ω 故障电阻的分解层数分别增大到 121、10。故障电阻越大，分解层数越大。信噪比为 50 dB 时，噪声水平低于信号，分解 2 层便可提取故障特征。故障②和故障③的 TKEO 导数突变特征较为明显，OVMD 确定最终分解层数均为 2。由于含噪信号分

解得到的最相似模态中含有大量噪声成分, 本节仅对特征模态进行处理, 计算特征模态的 TKEO 及其导数最大值的比值。利用导数最大值之间的比值大小实现对早期故障的检测。本文方法自适应调整最优的分解层数, 使不同故障类型和不同噪声水平下的故障检测准确率均为 100%, 见表 7。具有较强的适应性, 提升了系统在复杂电力环境中的可靠性。

表 6 不同信噪比下故障①的信号分解层数
Table 6 Signal decomposition layers for fault ① under different SNRs

分解层数 K	SNR/dB			
	30	40	50	0
故障①				
100 Ω	4 层	2 层	2 层	2 层
300 Ω	13 层	2 层	2 层	2 层
600 Ω	22 层	6 层	2 层	2 层
1000 Ω	121 层	10 层	2 层	2 层

表 7 不同信噪比下的检测结果

Table 7 Detection results under different noises SNRs

准确率/%	SNR/dB			
	30	40	50	0
故障①(R_1 : 100~1000 Ω)	100%	100%	100%	100%
故障②(R_2 : 20~100 Ω)	100%	100%	100%	100%
故障③(R_1 : 100~1000 Ω , R_2 : 20~100 Ω)	100%	100%	100%	100%

5 结论

本文针对三相单芯电缆的早期故障提出了一种基于护层接地线电流和分段 TKEO 的电缆早期故障检测方法, 该检测方法具有以下特点。

1) 具有高灵敏度和鲁棒性。本文利用 OVMD 对护层接地线电流进行最优分解, 通过脉冲因子和余弦相似度得到特征模态和最相似模态。利用重构信号的分段 TKEO 和分段导数最大值比值构建检测判据, 从而精确捕捉早期故障信号中的微弱变化, 确保故障检测具有高灵敏度和鲁棒性。

2) 具有抗噪性。本文方法利用 OVMD 处理信号和分段 TKEO 技术, 显著提高了故障特征提取的抗噪能力, 减少了噪声对故障检测结果的干扰。仿真验证结果表明, 该方法在不同故障类型和故障工况下, 仍能有效识别早期故障, 表现出较强的适应性和抗噪性。

参考文献

[1] CHI P, ZHANG Z, LIANG R, et al. A CNN recognition method for early stage of 10 kV single core cable based on sheath current[J]. Electric Power Systems Research,

2020, 184.
 [2] 夏向阳, 刘奕珉, 刘雄, 等. 基于 S 变换模能量分析的直流电缆故障测距[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 201-209.
 XIA Xiangyang, LIU Yixuan, LIU Xiong, et al. Fault location of DC cable based on S-transform mode energy analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 201-209.
 [3] ZHANG C, SONG N, Li Y. Incipient fault identification of distribution networks based on feature matching of power disturbance data[J]. Electrical Engineering, 2021, 103: 2447-2457.
 [4] 熊思衡, 刘亚东, 方健, 等. 配电线路早期故障辨识方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3970-3976.
 XIONG Siheng, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Detection method of incipient faults of power distribution lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3970-3976.
 [5] 戴铭. 10 kV 地下电缆早期故障检测与识别方法探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
 DAI Ming. Discussion methods of incipient fault detection and identification in 10 kV underground cables[D]. Southwest Jiaotong University, 2012.
 [6] 张姝. 配电网弱故障接地保护与定位方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
 ZHANG Shu. Study on weak fault grounding protection and location in distribution network[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
 [7] 迟鹏. 基于数据驱动的 10 kV 电缆故障状态诊断与评估研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
 CHI Peng. Research on fault state diagnosis and condition assessment of 10 kV cable based on data driven[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
 [8] 楚恬歆, 张文海, 瞿科, 等. 小电流接地系统接地型早期故障扰动特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 52-61.
 CHU Tianxin, ZHANG Wenhai, QU Ke, et al. Grounded incipient fault analysis in a non-solidly grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 52-61.
 [9] 王玮, 徐丙垠, 邹国锋, 等. 基于电压特征能量的低压交流串联电弧故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 81-93.
 WANG Wei, XU Bingyin, ZOU Guofeng, et al. Low-voltage AC series arc fault detection method based on voltage characteristic energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 81-93.
 [10] DONG X, YANG Y, ZHOU C, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults by sheath system currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2281-2290.

- [11] 汪颖, 卢宏, 杨晓梅, 等. 堆叠自动编码器与 S 变换相结合的电缆早期故障识别方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 117-124.
WANG Ying, LU Hong, YANG Xiaomei, et al. Cable incipient fault identification based on stacked autoencoder and S-transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 117-124.
- [12] ZHANG J, CHEN M, HU G, et al. Incipient fault classification using a combination of S-transform and Hilbert transform method[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2013, 23(1): 122-134.
- [13] CHANG G, HONG Y, LI G. A hybrid intelligent approach for classification of incipient faults in transmission network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1785-1794.
- [14] QIN X, ZHANG Y, MEI W, et al. A cable fault recognition method based on a deep belief network[J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 71: 452-464.
- [15] KWON G Y, LEE C K, SHIN Y J. Diagnosis of shielded cable faults via regression based reflectometry[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2122-2131.
- [16] 丁锐, 陈羽, 孙伶雁, 等. 基于邻波电流差与随机性的交流串联电弧故障识别[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 169-178.
DING Rui, CHEN Yu, SUN Lingyan, et al. Series arc fault detection in low-voltage AC power lines based on absolute difference of the neighboring waveform of the current and randomness[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 169-178.
- [17] 张姝, 林圣, 唐进, 等. 基于双层阻抗模型的三相单芯电缆自恢复故障定位[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 1-10.
ZHANG Shu, LIN Sheng, TANG Jin, et al. Fault location of self-clearing fault in three phase single core cables based on double impedance model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 1-10.
- [18] 聂永杰, 赵现平, 李盛涛. XLPE 电缆状态监测与绝缘诊断研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1361-1371.
NIE Yongjie, ZHAO Xianping, LI Shengtao. Research progress in condition monitoring and insulation diagnosis of XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1361-1371.
- [19] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.
- [20] 董俊, 李一凡, 束洪春, 等. 配电网馈出线路单相永久性接地故障性质辨识方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4576-4585.
DONG Jun, LI Yifan, SHU Hongchun, et al. Study on identification method of single phase permanent ground fault in distribution network feedout line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4576-4585.
- [21] HUANG N, WU Y, CAI G, et al. Short-term wind speed forecast with low loss of information based on feature generation of OSVD[J]. IEEE Access, 2019, 7: 81027-81046.
- [22] 江永鑫, 陈丽安, 郭梦倩, 等. 基于改进 CEEMD 和 RF 的低压串联故障电弧识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 97-108.
JIANG Yongxin, CHEN Li'an, GUO Mengqian, et al. Identification method of low voltage series fault arc based on improved CEEMD decomposition and RF[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 97-108.
- [23] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6275.
JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6275.
- [24] WANG X, GAO J, WEI X. High impedance fault detection method based on variational mode decomposition and Teager-Kaiser energy operators for distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6041-6054.

收稿日期: 2024-09-09; 修回日期: 2024-11-27

作者简介:

王晓卫(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、配电网接地故障处理等; E-mail: proceedings@126.com

魏春燕(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网早期故障检测。E-mail: 2876879010@qq.com

(编辑 石晋美)