

计及分布式电源注入谐波的单相接地故障联合选线

李琰¹, 赵莹¹, 杜磊¹, 徐天奇¹, 田业²

(1. 云南省高校电力信息物理融合系统重点实验室、云南省高校信息与通信安全灾备重点实验室(云南民族大学), 云南 昆明 650504; 2. 北京送变电有限公司, 北京 102401)

摘要:随着配电网线路安全运行要求的提高,分布式电源注入的谐波会使得现有的选线方法失效,且单一判据的故障选线方法愈加难以胜任复杂配电网系统发生单相接地故障后的选线工作。因此文中提出了计及分布式电源注入谐波的谐振接地系统单相接地故障联合选线。针对谐振接地系统中出现单相接地故障后,故障线路与健全线路的暂态零序电流相位、周期变化不同的特点,先根据低频周期差异用多尺度交叉样本熵计算暂态零序电流,再根据高频相位差异用加权暂态能量法及同步挤压小波变换计算高频暂态零序电流的重构误差。此外,使用加权暂态能量法控制计算量并通过多尺度交叉样本熵、加权暂态能量和重构误差3个判据判定故障线路。实验结果显示,文中的联合选线法受不同故障条件的影响小,准确性高,抗干扰性强。

关键词:分布式电源;谐振接地系统;联合选线;多尺度交叉样本熵;加权暂态能量;同步挤压小波变换

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)04-0113-09

0 引言

我国中低压配电网中性点大多采用经消弧线圈接地的方式^[1],这一接线方式导致接地故障发生时基于故障稳态分量的选线方法失效,因此基于暂态分量的选线被广泛研究。同时,随着新能源发电容量的大幅提高,逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generation, IIDG)在故障发生后不能被随意切除,且分布式电源(distributed generation, DG)注入谐波提高了基于暂态高频能量或特征频段能量的选线法的误判率^[2-5]。

目前针对配电网故障选线的方法主要有:暂态能量法^[6-8]、注入法^[9-12]、功率法^[13-16]、导纳法^[16-18]、零序相关分析法^[19]、频域参数法^[20]、聚类法^[21]、神经网络法^[22-23]等。DG数量逐渐增多改变了线路零序电流的时频特征^[24-26],对传统的时频特征选线法提出了新的要求,对此学者们提出新的单相接地故障特性分析及选线方法。文献[27]考虑接地方式对故障特性的影响,为故障选线研究提供了一定的理论补充。文献[28]提出一种基于五次谐波导纳不对称度的选线方法,但并未考虑IIDG注入谐波的影响。文献[29]基于交叉小波变换法分析了DG注入谐波对特征频段选取的影响,但计算量较大。文献[30]通过检测零序电流并比较各测量点信号来构成选线判据,但依旧受到检测设备容量的限制。

可见,目前并未有哪一种选线方法能够完全胜

任实际工况中的选线任务,且虽然关于DG故障特性的研究较多,但是如何使故障选线不受DG注入谐波影响的研究尚未受到重视。随着DG并网原则的提出,DG不能在电网事故时无计划地被大规模切除。由此可见,寻找一种计算量较小且不受DG注入谐波影响的故障选线方法十分必要。

单一的选线方法并不能可靠地处理单相接地故障后复杂的故障特征。文中提出一种计及DG注入谐波的单相接地故障联合选线法。根据故障线路与健全线路低频周期变化差异的特点,用多尺度交叉样本熵(multiscale cross-sample entropy, MCSE)判定故障线路。根据故障线路与健全线路暂态零序电流高频相位的差异,首先用加权暂态能量选择发生故障可能性最大的三条线路,然后用同步挤压小波变换(synchrosqueezed wavelet transforms, SST)计算重构误差判定故障线路。联合选线所采用的3种方法分别对应多尺度交叉样本熵矩阵 P_m 、加权暂态能量矩阵 W_m 和重构误差矩阵 Q_m 3个判据,其优先级为 $P_m > W_m > Q_m$ 。实验结果表明文中的联合选线准确性好、适用性强,并且通过联合选线可以基于不同的特征选择故障线路,从而减少DG注入谐波对故障选线的干扰。

1 谐振接地系统故障特征

忽略线路零序阻抗的单相接地故障零序网络如图1所示, \dot{U}_0 为等效零序电压; R_f 为过渡电阻; L 、 R 分别为消弧线圈的电感、等效电阻^[31]。

因此,各健全线路零序电流可简单表示为:

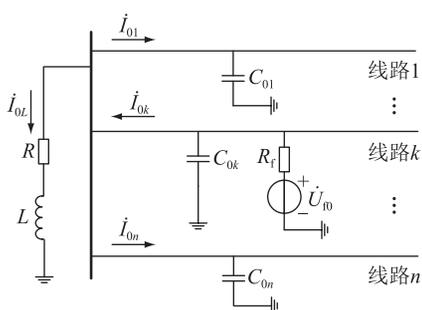


图1 零序网络简化电路

Fig.1 Simplified circuit of zero sequence network

$$i_{0n} = -C_{0n} \frac{du_0}{dt} \quad n \neq k \quad (1)$$

故障线路零序电流可表示为:

$$i_{0k} = -i_{0L} + \sum_{n=1}^n i_{0n} \quad n \neq k \quad (2)$$

式中: n 为线路序号; C_{0n} 为线路 n 的对地电容; u_0 为零序电压; i_{0L} 为电感的零序电流^[31]; i_{0n} 为线路 n 的零序电流; t 为时间。

以图2所示二阶等效电路为例分析单相接地故障的暂态过程。图中 R_0 为等效电阻; L_0 、 C_0 分别为零序通路中三相线路和电源变压器的等值电感和对地电容; u_0 为零序电源电压^[31]。

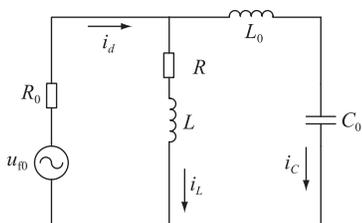


图2 故障等效电路

Fig.2 Fault equivalent circuit

则暂态零序电流为:

$$i_{0k} = i_d = i_C + i_L = (I_C - I_L) \cos(\omega t + \varphi) + I_C \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin(\varphi) \sin(\omega t) - \cos(\varphi) \cos(\omega_f t) \right) e^{-t/\tau_C} + I_L \cos(\varphi) e^{-t/\tau_L} \quad (3)$$

式中: i_d 为零序电流; i_C 为流过 L_0 、 C_0 的电流; i_L 为流过 R 、 L 的电流; I_C 、 I_L 分别为电容、电感电流; ω_f 、 ω 分别为角频率、工频角频率; φ 为初相位; τ_L 、 τ_C 分别为电感、电容的时间常数。

通过对谐振接地系统故障特征的分析,可知故障发生伴随着暂态零序电流的流通^[31],即通过分析暂态故障零序电流的变化可实现故障选线。

2 DG注入谐波对零序电流的影响

DG注入谐波含有明显的低次谐波电流,由于

其最低次谐波为5次,因此消弧线圈不影响其谐波的流通^[29]。

不考虑DG时,线路 n 首端的 m 次谐波为:

$$\dot{I}_{0nm} = (Z_{ks}(\omega_m) + Z_{DG}) \dot{I}_{0m} / Z_n(\omega_m) \quad (4)$$

式中: $Z_{ks}(\omega_m)$ 为线路 k 的输入阻抗; Z_{DG} 为等效输出阻抗; \dot{I}_{0m} 为 m 次谐波的零序分量; ω_m 为 m 次谐波频率; $Z_n(\omega_m)$ 为非DG接入线路 n 的输入阻抗。

计及DG注入谐波后,零序电流在原来的基础上增加了 $\sum_n i_{0nm}$,则故障零序电流为:

$$i_{0nk} = i_{0n} + \sum_n i_{0nm} \quad (5)$$

由式(4)可知, $\sum_n i_{0nm}$ 与线路参数和信号频率有关,而 i_{0n} 与故障点的位置有关^[29]。

综上,计及DG注入谐波后故障零序电流的变化说明了考虑含DG注入谐波的故障选线有一定的意义。

3 加权暂态能量法理论分析

文中基于MCSE、加权暂态能量、SST 3个理论实现联合选线。在联合选线过程中,考虑采样频率、系统周期等条件,由于MCSE可以有效解决序中部分信息可能被“掩盖”的问题^[31],基于低频周期条件,先使用MCSE实现故障线路的判断;接着基于高频暂态电流相位条件,使用加权暂态能量选择出发生故障可能性最大的3条线路;最后基于SST的逆变换近似重构信号的特征^[31],利用SST判断故障线路。其中MCSE、SST理论参考文献[31],所以下面重点论述加权暂态能量法的理论。

重构误差及多尺度交叉样本熵的故障选线方法存在运算速度较慢的问题。如果不计程序本身结构不同而导致的运行时间差异,相同程序下5条线路的暂态零序电流、采样点数800,即 5×800 的矩阵在基于重构误差的故障选线方法中利用MATLAB进行10次计算,平均需要2.67s才能得出计算结果。 5×1000 的矩阵需要3.51s, 10×800 的矩阵需要4.84s。线路数目成倍提升,计算所耗时间也成倍提升。而 5×800 的矩阵通过暂态能量法进行10次计算,所需时间平均不超过0.075s。因此,为了减少计算量、提高选线速度,基于改进暂态能量法^[32]提出加权暂态能量法,同时提高可靠性。各馈线零序电流的暂态能量 W 一般表示为:

$$W = \int_0^T U_0(\tau) I_0(\tau) d\tau \quad (6)$$

式中: U_0 、 I_0 分别为线路首端零序电压及零序电流;

T 为数据窗口长度。

各线路首端均连接于母线,其零序电压即为母线零序电压,因此所有线路首端零序电压相同。为方便在实际工况中进行选线,采用离散值求和的方法近似代替积分运算,将暂态能量表达式改为:

$$W = \sum_{\tau=1}^N I_m^2(\tau) \quad (7)$$

式中: N 为离散数据窗口长度,一般设为 $1/4$ 工频周期; $I_m(\tau)$ 为线路 m 首端暂态零序电流的瞬时值。

当配网线路含有双出线或长线结构的电缆线路时,该线路总长度可能远大于系统内其他线路长度。但是当系统中的其他线路是架空线路时,故障线路的暂态零序电流近似等于健全线路,此时若继续以式(7)进行能量计算可能会出现偏差,导致选线错误。因此通过提取并计算特征频段内的暂态能量值对传统能量法进行改进,可实现故障线路与健全线路的暂态能量值的有效区分。

线路大部分高频暂态能量都集中在特征频段上,具有较强的代表性。每个线路的特征频率是不同的,一般将所有线路能量和最大值对应的频段称为所有线路共同的特征频段。利用这一频段进行选线,的确避免了其他非典型故障信息的干扰。但高阻接地时由于暂态零序电流幅值较小,提取特征频段内电流使电流幅值进一步减小,故障线路与健全线路之间的故障特征差距即使提升也受限于幅值大小,难以有明显的差异,不易于检测。因此,传统暂态能量法及其改进方法虽然原理简单,应用较广,适用于金属性接地故障,但缺点也十分明显,不适合高阻接地故障。

为解决高阻接地故障时,某些线路之间暂态能量相近导致故障选线误判的问题,同时避免因提取某一频段内零序电流引起的幅值减小,引入权重因子对现有暂态能量法进行优化,提高选线灵敏度。

根据故障线路暂态零序电流和健全线路暂态零序电流之间的近似关系^[32],在式(7)中增加权重计算,则线路 m 的加权暂态能量 W_m 为:

$$W_m = \sum_{\tau=1}^N \left(I_m(\tau) \exp\left(\frac{-(I_m(\tau) - I_{\max}(\tau))^2}{50}\right) \right)^2 \quad (8)$$

式中: $I_m(\tau)$ 为线路 m 首端暂态零序电流; $I_{\max}(\tau)$ 为所有线路首端暂态零序电流绝对值最大的线路对应的实际暂态零序电流值。

4 单相接地故障联合选线方法

联合选线流程如图3所示, U 为母线额定电压,

TV 断线表示一相或两相断开,主要步骤如下。

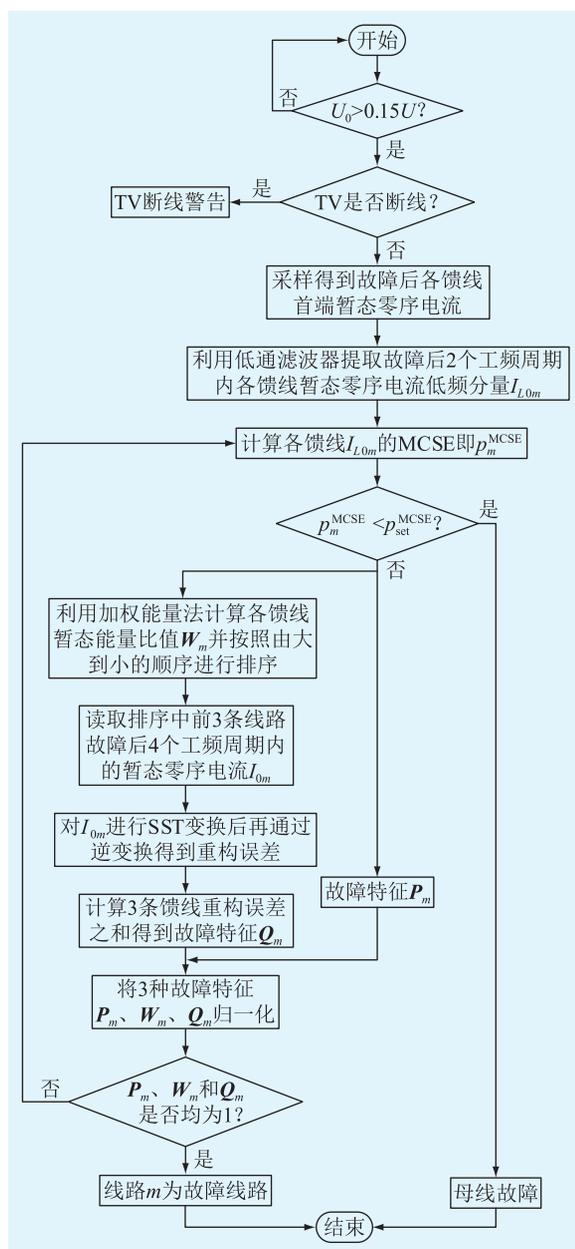


图3 联合选线法流程

Fig.3 Joint route selection process

(1) 确认系统发生单相接地故障后,采样馈线首端的暂态零序电流。

(2) 启动基于 MCSE 的选线判据。考虑到裕度及噪声的影响设置母线故障整定值,归一化之后应该设置整定值为 1,但是由于噪声的能量很小,设置的整定值小于 1,通过加入噪声进行大量实验,最终设置母线故障的整定值 $p_{\text{set}}^{\text{MCSE}} = 0.6$ 。当计算值均小于整定值时,则可判断为母线故障;当计算值大于整定值时,则进行故障选线。

(3) 排除故障后,利用加权能量法计算馈线暂态能量值,初步判定暂态能量比值最大的线路为故障线路,并将所有线路按照暂态能量由大到小的顺

序进行排序。

(4) 选取上一步线路排序中前 3 条线路, 然后启动基于 SST 重构误差的选线判据。

(5) 3 种判据产生 3 种故障特征, 将故障特征进行归一化。

$$Z'_m = X_m / \sum_{m=1}^M X_m \quad (9)$$

$$Z_m = \frac{Z'_m - \min\{Z'_m\}}{\max\{Z'_m\} - \min\{Z'_m\}} \quad (10)$$

式中: X_m 为 3 种特征中任意一种; M 为特征数; Z'_m 为 3 种特征中任意一种的平均值; Z_m 为 3 种特征中任意一种的归一化值。

(6) 若归一化后的 3 种故障特征值均为 1, 则认为该线路是故障线路, 否则认为判据不充分, 重新选线。若已排除母线故障, 多次计算后 3 种判据的选线结果仍不一致, 可忽略加权暂态能量法判定结果。若基于 MCSE 的判定结果与基于重构误差的判定结果不一致, 输出基于重构误差法的判定结果。

5 仿真验证

图 4 为谐振接地系统模型, 由上至下分别为线路 1 至线路 5, 参数见表 1, 其中 R 、 L 、 C 分别为线路电阻、电感和对地电容, 下标 1、0 分别表示正序、零序^[31]。

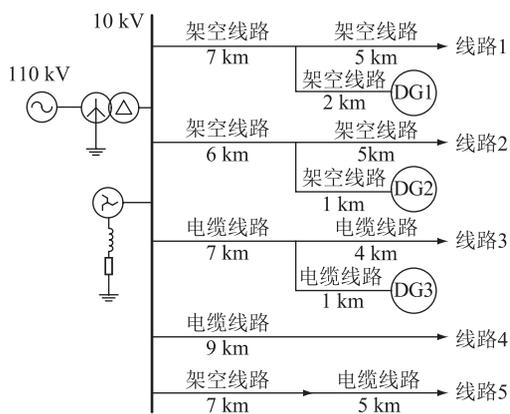


图 4 谐振接地系统模型

Fig.4 Resonant grounding system model

表 1 线路参数

Table 1 Line parameters

线路参数	架空线路	电缆线路
$R_1 / (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.125 0	0.270 0
$L_1 / (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	1.300 0	0.255 0
$C_1 / (\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.009 6	0.339 0
$R_0 / (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.275 0	2.700 0
$L_0 / (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	4.600 0	1.019 0
$C_0 / (\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.005 4	0.280 0

5.1 加权暂态能量法效果分析

改进暂态能量法, 并结合之前的研究提出联合选线法进行故障选线, 这里需要对加权暂态能量法进行分析。引入权重因子, 故障线路暂态零序电流的瞬时值在求和计算中大部分被保留, 健全线路暂态零序电流瞬时值因权重不同被部分保留。为了证明这一结论, 基于图 4 拓扑监测发生单相接地故障时各馈线首端的暂态零序电流进行说明。设故障距离为 1 km, 采样频率为 10 kHz, 暂态零序电流如图 5 所示。

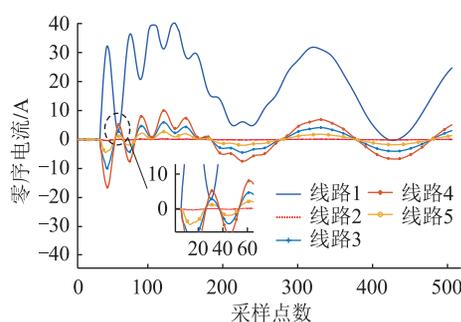


图 5 暂态零序电流

Fig.5 Transient zero sequence currents

由于故障线路与健全线路周期不同, 在采样点 20~40 之间存在故障线路暂态零序电流小于其他线路的情况。此时, 在加权暂态能量法中故障线路的权重因子不再为最大值 1, 求和后故障线路暂态能量相较于改进之前有所减少。虽然这些特殊点大都分布在零点附近, 幅值较小, 对加权暂态能量法选线造成的影响有限, 但加权暂态能量法放大了故障与正常之间暂态能量的差异, 总体来说利大于弊。

5.2 联合选线结果分析

首先启动基于 MCSE 的选线判据, 设线路 1 的故障距离为 6 km, R_f 为 5 Ω , 合闸角 0°, 得到多尺度样本熵矩阵 $P_m = [8.965 \ 2 \ 2.156 \ 8 \ 2.603 \ 9 \ 2.315 \ 2 \ 4.000 \ 6]$, 均大于整定值 0.6, 不是故障线路, 且线路 1 的 MCSE 最大, 所以发生故障的可能性最大, 基于 MCSE 选线的暂态零序电流低频分量和暂态零序电流分别如图 6、图 7 所示。

利用加权暂态能量法计算得到 5 条馈线暂态能量为矩阵 $W = [0.996 \ 0 \ 0.003 \ 0.001 \ 0]$ 。根据暂态能量的大小, 选取前暂态能量较大的 3 条线路, 即线路 1、3 和 4 的 4 个工频周期内的暂态零序电流, 启动基于重构误差的选线方法。重构误差如图 8—图 10 所示。

经计算, 该判据下 3 条线路故障特征为 $Q(1, 3, 4) = [5 \ 078.9 \ 143.7 \ 67.0]$ 。将 3 种故障特征分别归

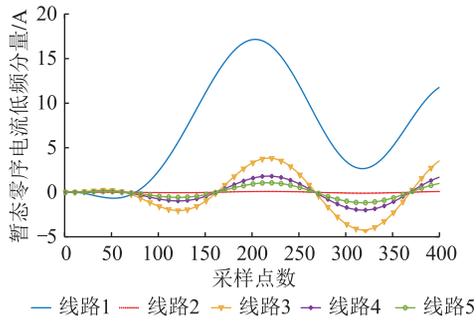


图6 各馈线暂态零序电流低频分量

Fig.6 Low frequency component of transient zero sequence current of each feeder

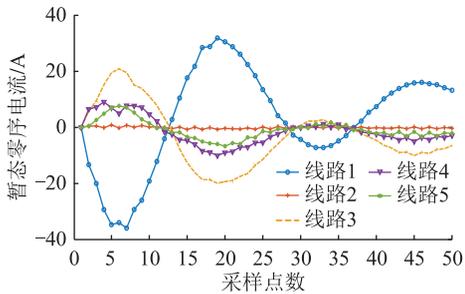


图7 1/4个工频周期内各馈线首端暂态零序电流

Fig.7 Transient zero sequence current at the head end of each feeder within 1/4 power frequency cycle

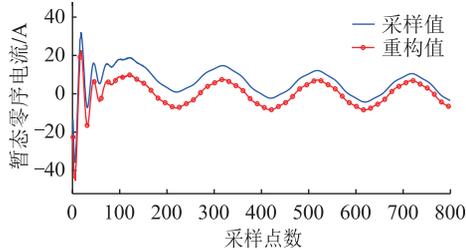


图8 线路1(故障线路)暂态零序电流重构误差

Fig.8 Transient zero sequence current reconstruction error of line 1 (fault line)

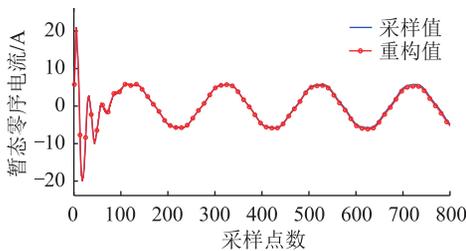


图9 线路3(健全线路)暂态零序电流重构误差

Fig.9 Transient zero sequence current reconstruction error of line 3 (healthy line)

一化,未被统计的或不为1的数位置0,则可得故障特征 P_z 、 W_z 和 Q_z 均为 $[1\ 0\ 0\ 0\ 0]$,因此判定线路1故障,与假设一致,选线正确。

5.3 分析故障点位置对故障选线的影响

由于 DG 中性点不接地,不含零序电流,因此

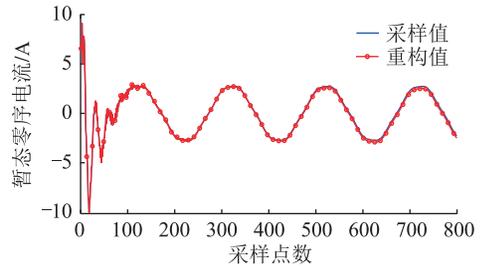


图10 线路4(健全线路)暂态零序电流重构误差

Fig.10 Transient zero sequence current reconstruction error of line 4 (healthy line)

DG 位置对文中故障选线方法的影响可以忽略,只分析故障点位置对故障选线是否有影响,即通过模拟多种故障条件下的选线来验证联合选线的普适度。

模拟不同故障角、故障距离和过渡电阻等条件下的选线,其他模拟条件为系统过补偿度及叠加白噪声。合闸角 α 分别为 0° 、 45° 、 90° ;对于谐振接地系统模型^[31],故障距离 X 分别为 3、6、9 km; R_f 分别为 5、500、1 000 Ω (高阻),可见在高阻接地以内进行故障选线已经包含了普遍情况;叠加白噪声的信噪比为 20 dB。

为证实数据真实有效,此处仿真结果与流程图所示不同,结果不作任何明显缩减和归一化处理。线路1的选线结果见表2,表明该方法在不同合闸角下的选线结果都很准确。

表2 不同故障条件下的选线1仿真结果

Table 2 Simulation results of line selection 1 under different fault conditions

X/km	R_f/Ω	$\alpha/(^\circ)$	故障特征(P_m, W_m, Q_m) (1,2,3,4,5)	结果
3	5	0	$[8.2\ 2.1\ 2.0\ 2.1\ 2.1]$ 、	正确
			$[19\ 553.0\ 6.8\ 19.5\ 3.0\ 15.3]$ 、	
			$[5\ 924.9\ 3.4\ 41.6\ 66.3\ 38.7]$	
6	500	45	$[8.3\ 2.0\ 2.3\ 2.0\ 2.0]$ 、	正确
			$[427.3\ 0\ 17.1\ 5.1\ 1.9]$ 、 $[224.7\ 0.8\ 31.5\ 15.5\ 9.2]$	
9	1 000	90	$[13.3\ 3.2\ 3.5\ 3.4\ 3.3]$ 、 $[294.9\ 2.6\ 104.7\ 49.9\ 29.3]$ 、 $[120.1\ 1.5\ 63.7\ 30.1\ 17.5]$	正确

此外对各馈线暂态零序电流分别叠加以自身为基准,信噪比为 20 dB 的白噪声后进行选线,选线结果如表3所示,选线可靠性基本不受影响。

以线路4,即表3第一行为例,故障角为 45° 时,其各馈线暂态零序电流低频分量叠加白噪声后的暂态电流低频分量的波形见图11。叠加白噪声后的个馈线交叉样本熵见图12,叠加白噪声后的故障线路与健全线路的暂态零序电流重构误差分别见图

表3 叠加白噪声后选线结果
Table 3 Line selection results after superimposing white noise

X/km	R_f/Ω	$\alpha/(\circ)$	故障特征(P_m, W_m, Q_m) (1,2,3,4,5)	结果
3	5	45	[2.1 2.1 2.3 8.3 2.3]、 [0 0.7 156.4 46 367.0 339.9]、 [2.6 1.7 57.8 6 137.9 20.2]	正确
6	500	0	[1.2 1.3 1.2 4.6 1.3]、 [0.5 0.3 65.8 456.9 17.6]、 [1.7 1.4 36.3 284.4 16.5]	正确
9	1000	90	[0.9 1.0 0.9 3.4 0.9]、 [0.2 0.1 42.3 753.9 9.5]、 [1.5 1.1 25.1, 140.0 13.0]	正确

13和图14。可见,白噪声对于波形影响较大,基于相关性分析的选线方法存在误判的可能。

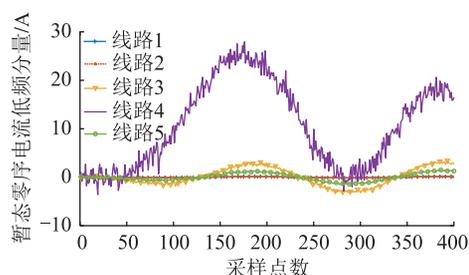


图11 叠加白噪声后各馈线暂态零序电流低频分量

Fig.11 Low frequency component of transient zero sequence current of each feeder after superimposed white noise

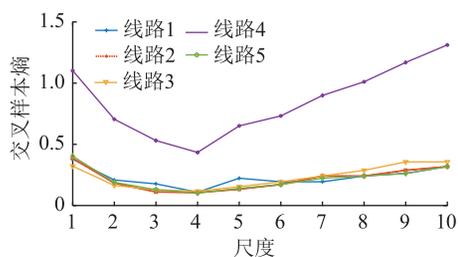


图12 叠加白噪声后各馈线 MCSE

Fig.12 MCSE of each feeder after superimposed white noise

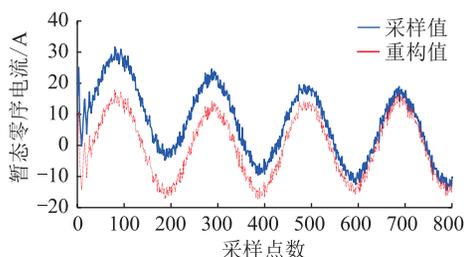


图13 叠加白噪声后线路4(故障线路)暂态零序电流重构误差

Fig.13 Transient zero sequence current reconstruction error of line 4 (fault line) after superimposed white noise

5.4 选线方法对比分析

为进一步证明文中所提选线方法的必要性,相

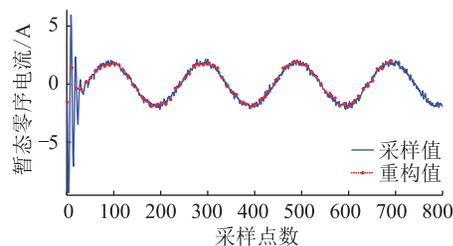


图14 叠加噪声后线路5(健全线路)暂态零序电流重构误差

Fig.14 Transient zero sequence current reconstruction error of line 5 (healthy line) after superimposed white noise

同算例下分别采用 MCSE 法、加权暂态能量法和基于重构误差的联合选线法,通过仿真结果检验选线是否正确。加权暂态能量法提取各馈线首端零序电流高频分量(100 Hz 以上)进行能量计算来完成选线工作。根据谐振接地系统仿真模型,在线路4距离母线2 km 处接入一容量为5 MW 的IIDG ,5次谐波注入水平为IIDG 输出电流的4%。

假设线路1故障距离为1 km, R_f 为500 Ω ,合闸角为0°。暂态零序电流高频分量如图15所示。经计算,各馈线能量比值为0.420、0.002、0.002、0.574、0.002,因此判定线路4为故障线路,与线路1为故障线路的假设相矛盾,选线错误。

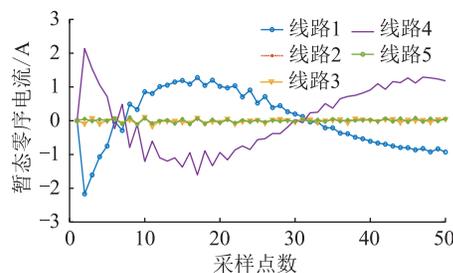


图15 各馈线暂态零序电流高频分量

Fig.15 High frequency component of transient zero sequence current of each feeder

现采用文中所提联合选线法,首先启动基于MCSE 的选线判据。为减少采样时间或滤波器的数目,此处暂态零序电流低频分量直接由暂态零序电流减去暂态零序电流高频分量得出,暂态零序电流低频分量为100 Hz 以下的暂态零序电流低频分量波形如图16所示。

经计算,该判据下故障特征 $P=[1.49 \ 0.38 \ 0.38 \ 0.36 \ 0.38]$,其中有一个值大于整定值0.6,因此排除母线故障。启动加权暂态能量法判据,经计算,该判据下故障特征 $W=[0.53 \ 0 \ 0 \ 0.47 \ 0]$,选取暂态能量最大的前3条线路,即线路1、3和4启动基于重构误差的选线判据,各线路重构误差示意如图17、图18所示,其中线路3暂态零序电流幅值过小,

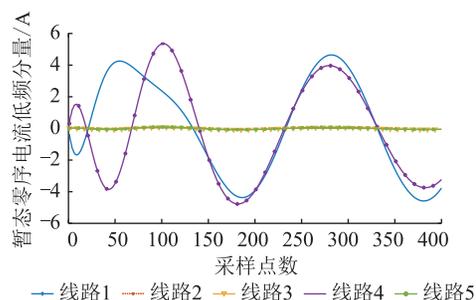


图 16 接入 IIDG 后各馈线暂态零序电流低频分量

Fig.16 Low frequency component of transient zero sequence current of each feeder after IIDG is connected

不再展示。

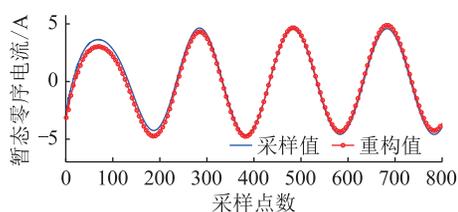


图 17 接入 IIDG 后线路 1(故障线路)
暂态零序电流重构误差

Fig.17 Transient zero sequence current reconstruction error of line 1 (fault line) after IIDG is connected

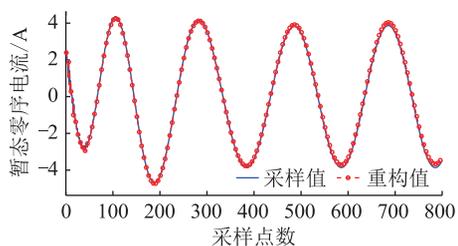


图 18 接入 IIDG 后线路 4(健全线路)
暂态零序电流重构误差

Fig.18 Transient zero sequence current reconstruction error of line 4 (healthy line) after IIDG is connected

经计算,该判据下故障特征 $Q(1, 3, 4) = [255.93 \ 1.01 \ 71.76]$ 。将 3 种特征分别归一化,得到 P_z 、 W_z 和 Q_z 均为 $[1 \ 0 \ 0 \ 0]$,因此认为线路 1 故障,选线正确。

6 结语

(1) 针对注入谐波会对故障选线造成不利影响的问题,文中引用之前提出的 2 种选线方法,将其有序结合,提出一种不受注入谐波影响的联合选线法,将 MCSE 法、加权暂态能量法和重构误差法有序结合,建立联合选线机制,形成联合判据。同时,为了提高选线速度,提出加权暂态能量法。利用加权暂态能量法原理简单、运算速度快的优点,对所有馈线进行筛选,得到故障可能性最大的 3 条线路,

再利用重构误差判据在这 3 条线路中选出故障线路即可。

(2) 根据现有的故障模型和多谐振接地系统,模拟不同故障条件下单相接地故障选线,通过仿真结果证明文中所提联合选线法的正确性。同时设立算例对比分析,未发现加权能量法出现误判的情况,证明所提选线方法能够规避注入谐波影响。且实验结果表明该方法受不同故障条件的影响较小,且高阻接地的选线裕度也较高,选线准确。可见文中所提联合选线方法能够提高故障选线准确性,扩展适用范围。

参考文献:

- [1] 李杰. 配电网单相接地故障继电保护原理与故障定位方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.
LI Jie. Research on relay protection principle and fault location method for single-phase grounding faults in distribution networks [D]. Guangzhou:South China University of Technology,2021.
- [2] 陈桥山. 含逆变器分布式电源配电网故障选线方案研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2020.
CHEN Qiaoshan. Studies on faulty feeder selection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generators[D]. Changsha:Changsha University of Science & Technology,2020.
- [3] 邵文权,程畅,卫晓辉,等. 利用暂态电流 Hausdorff 距离的谐振配电网故障选线方案[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(8):34-42.
SHAO Wenquan, CHENG Chang, WEI Xiaohui, et al. Fault line selection scheme using the Hausdorff distance of transient current in resonant distribution networks [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 34-42.
- [4] 田君杨,柳影,薛永端,等. 小电流接地故障选线装置零序电压启动分析[J]. 供用电,2022,39(5):54-60.
TIAN Junyang, LIU Ying, XUE Yongduan, et al. Analysis of zero sequence voltage starting of small current grounding fault line selection device [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 54-60.
- [5] 魏科文,张靖,何宇,等. 基于 VMD 和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(22):105-113.
WEI Kewen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Single-phase grounding fault line selection in a resonant grounding system based on VMD and correlation clustering [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 105-113.
- [6] 陈家乐. 基于暂态分量的配电网单相接地故障定位研究[D]. 南宁:广西大学,2022.
CHEN Jiale. Research on single-phase grounding fault location in distribution network based on transient component [D]. Nanning:Guangxi University,2022.
- [7] 董杰,陈雷刚. 基于暂态能量的故障选线方法研究[J]. 电子世界,2020(21):73-75.

- TONG Jie, CHEN Leigang. Research on fault line selection method based on transient energy [J]. Electronics World, 2020 (21):73-75.
- [8] 林明毅. 小电流接地系统单相接地故障选线及测距研究[D]. 广西:广西大学,2021.
- LIN Mingyi. Research on line selection and location of single-phase grounding fault in small current grounding system [D]. Guangxi:Guangxi University,2021.
- [9] 李焱,李颖峰. 基于注入原理的小电流接地故障选线技术探讨[J]. 通信电源技术,2020,37(6):219-220,223.
- LI Yan, LI Yingfeng. Discussion on line selection technology for small current grounding fault based on injection principle [J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(6):219-220, 223.
- [10] 张国军,张文周,葛群,等. 基于补偿参数的多零序电流互感器的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(2):1-9.
- ZHANG Guojun, ZHANG Wenzhou, GE Qun, et al. Single-phase ground fault line selection method of small current grounding system of multiple zero-sequence current transformer based on compensation parameters [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2):1-9.
- [11] 梁睿,叶开,彭楠,等. 暂态零序电流波形差异的单相接地故障选线[J]. 电力工程技术,2019,38(4):74-79.
- LIANG Rui, YE Kai, PENG Nan, et al. Faulty line selection of single phase grounding based on transient zero sequence current waveform difference [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4):74-79.
- [12] NIU L, WU G Q, XU Z S. Single-phase fault line selection in distribution network based on signal injection method [J]. IEEE Access, 2021, 9:21567-21578.
- [13] 李焱. 配电网单相接地故障的选线方法研究[D]. 汉中:陕西理工大学,2021.
- LI Yan. Research on line selection method of single-phase grounding fault in distribution network [D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2021.
- [14] 闫森,黄纯,刘映彤,等. 基于零序功率比的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(3):46-52.
- YAN Sen, HUANG Chun, LIU Yingtong, et al. Flexible fault selection method of grounding system based on zero-sequence power ratio [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3):46-52.
- [15] 许可. 66 kV 系统小电流接地选线方法研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2022.
- XU Ke. Research on low current grounding line selection method of 66 kV system [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.
- [16] CHAI Y, CHEN X, ZHANG K. Research on ground fault line selection method based on zero sequence admittance [C]//2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA). Chongqing, China. IEEE, 2020:14-17.
- [17] WEN X H, ZOU G B, LIN Q, et al. Single line-to-ground fault section location method based on the phase angle difference of measurement admittances [C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Nangjing, China. IEEE, 2022:3840-3845.
- [18] 栾晓明,武守远,贾春娟,等. 基于改进零序导纳法的单相接地故障选线原理[J]. 电网技术,2022,46(1):353-360.
- LUAN Xiaoming, WU Shouyuan, JIA Chunjuan, et al. Fault line selection principle of single-phase-to-ground fault based on improved zero-sequence admittance [J]. Power System Technology, 2022, 46(1):353-360.
- [19] 李硕,吕飞鹏. 基于高低频段零序电流与母线零序电压导数的相关分析故障选线[J]. 水电能源科学,2020,38(12):176-179.
- LI Shuo, LYU Feipeng. Fault line selection with correlation analysis of zero sequence current under high-low frequency and voltage derivative [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(12):176-179.
- [20] 程思雯. 基于频域参数识别的单相接地故障选线方法研究[D]. 西安:西安科技大学,2019.
- CHENG Siwen. Research on single-phase ground fault line selection method based on frequency domain parameter identification [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [21] MEI R, QIN S Y, XU J, et al. Single-phase grounding fault line selection method for distribution network with same bus loop based on cluster [C]//2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC). Chengdu, China. IEEE, 2021:343-348.
- [22] 雷静,李晨婧,郭亮,等. 基于 GAF 与卷积神经网络的配电网故障选线新方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(2):53-62.
- LEI Jing, LI Chenjing, GUO Liang, et al. Novel fault feeder selection method for distribution network based on GAF and convolution neural network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(2):53-62.
- [23] ZHANG Y B, HAO Z G. An adaptive fault-line selection method based on multi-criteria fusion of single-phase grounding fault in small current grounding system [C]//2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Xi'an, China. IEEE, 2020:462-465.
- [24] 乔一达,吴红斌,吴通华,等. 含逆变型分布式电源的配电网分区域电流保护[J]. 电工技术学报,2022,37(S1):134-144.
- QIAO Yida, WU Hongbin, WU Tonghua, et al. A partitioned current protection scheme of distribution network with inverter interfaced distributed generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1):134-144.
- [25] 蔡军,周波,黄跃,等. 基于 S 变换时频特性的谐振接地系统故障选线新方法[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(3):109-116.

- CAI Jun, ZHOU Bo, HUANG Yue, et al. A fault line selection method based on time-frequency characteristics in S-transform for resonant grounded systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 109-116.
- [26] 韩祥民, 刘晓波, 刘敏, 等. 基于改进 EEMD 与 GA-BP 的谐振接地故障选线方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(12): 80-87.
HAN Xiangmin, LIU Xiaobo, LIU Min, et al. Resonant grounding fault line selection method based on improved EEMD and GA-BP model[J]. Smart Power, 2021, 49(12): 80-87.
- [27] 颜飞. 考虑不同接地方式下多端直流配电网故障特性及保护控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
YAN Fei. Research on multi-terminal DC distribution network fault characteristics and protection control strategies considering different grounding modes[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [28] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于 5 次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 77-83.
WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Single-phase fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 77-83.
- [29] 杨春留. 新型配电网单相接地故障选线及定位研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
YANG Chunliu. Research on line selection and location of single-phase grounding fault in new distribution network[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [30] 袁佳歆, 李响, 张哲维. 基于注入信号的有源配电网单相接地故障选线方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 44-49.
YUAN Jiaxin, LI Xiang, ZHANG Zhewei. Research on single-phase grounding fault selection technology for active distribution network based on injected signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 44-49.
- [31] 田业, 徐天奇, 李琰, 等. 基于重构误差及多尺度交叉样本熵的谐振接地系统故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 95-104.
TIAN Ye, XU Tianqi, LI Yan, et al. Fault line selection in a resonant earthed system based on reconstruction error and multi-scale cross-sample entropy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 95-104.
- [32] 童杰, 陈雷刚. 基于暂态能量的故障选线方法研究[J]. 电子世界, 2020(21): 73-75.
TONG Jie, CHEN Leigang. Research on fault line selection method based on transient energy[J]. Electronics World, 2020(21): 73-75.

作者简介:



李琰

李琰(1977), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力信息物理系统、无线工业网络、无线传感网(E-mail: yan.li@ymu.edu.cn);

赵莹(1996), 女, 硕士在读, 研究方向为电力信息物理系统;

杜磊(1996), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统保护与控制。

Combined line selection of single-phase grounding faults considering harmonic injection of distributed powers

LI Yan¹, ZHAO Ying¹, DU Lei¹, XU Tianqi¹, TIAN Ye²

(1. The Key Laboratory of Cyber-physical Power System of Yunnan Colleges and Universities, University Key Laboratory of Information and Communication on Security Backup and Recovery in Yunnan Province, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China; 2. Beijing Power Transmission Co., Ltd., Beijing 102401, China)

Abstract: With the improvement of the requirements for the safe operation of distribution network lines, the harmonics injected by distributed power generation make the existing line selection methods ineffective, and the fault line selection method with a single criterion becomes more and more difficult to meet the line selection work after the single-phase ground fault occurs in the complex distribution network system. Therefore, a single-phase grounding fault joint line selection for resonant grounding system considering the injection harmonics of distributed power sources is proposed. In view of the characteristics of different phases and periodic changes of transient zero-sequence current of fault lines and sound lines after a single-phase grounding fault occurs in the resonant grounding system, the transient zero-sequence current is calculated by multi-scale cross-sample entropy according to the difference in low-frequency period. Then, according to the high-frequency phase difference, the weighted transient energy method and the synchronous squeeze wavelet transform are used to calculate the reconstruction error of the high-frequency transient zero-sequence current. In addition, the weighted transient energy method is used to control the calculation amount and determine the fault line through three criteria: multi-scale cross-sample entropy, weighted transient energy and reconstruction error. The experimental results show that the joint line selection method is less affected by different fault conditions and this method has high accuracy and strong anti-interference.

Keywords: distributed power supply; resonant grounding system; joint line selection; multi-scale cross-sample entropy; weighted transient energy; synchronously squeeze wavelet transform

(编辑 钱悦)