

基于改进 DTW 的接地故障波形互相关度聚类选线方法

邵翔¹, 郭谋发¹, 游林旭²

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116; 2. 国网福建省电力有限公司 漳州供电公司, 福建 漳州 363000)

摘要:谐振接地系统发生单相接地故障时,各线路暂态零序电流波形具有非线性非平稳特性,故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形存在差异性,提出一种基于改进动态时间弯曲距离(DTW)的接地故障波形互相关度聚类选线方法。通过改进 DTW 算法求取各线路发生故障后半周期暂态零序电流波形两两之间的幅值互相关系数矩阵(ACCM),结合暂态零序电流极性互相关系数矩阵(PCCM),构造表征暂态零序电流幅值和极性信息的综合互相关系数矩阵(CCCM),由免阈值设定的模糊 C 均值聚类(FCM)算法选出故障线路。对噪声干扰、两点接地、电弧故障、采样不同步等情况的仿真结果表明,所提故障选线方法不受工程应用中可能存在的因素的影响,实现可靠选线。

关键词:谐振接地系统;故障选线;暂态零序电流;互相关系数矩阵;模糊 C 均值聚类

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.010

0 引言

谐振接地系统发生永久性单相接地故障时,由于线电压仍保持对称,可继续运行 1~2 h,但非故障相电压升高,易造成绝缘弱化处发生击穿导致故障扩大,需要快速选出故障线路并予以切除。由于故障情况复杂且受外界干扰因素影响,导致故障电流波形畸变和极性跳变,因此,现有的选线方法还未能很好地解决选线保护问题,需进一步研究谐振接地系统单相接地选线保护工作。

利用比故障信号稳态量大若干倍的故障信号暂态量进行选线保护是近年来该领域的研究热点^[1-3],现有的选线方法主要是采用分形几何、小波(包)变换^[4]、S 变换^[5]、数学形态学^[6]及希尔伯特-黄变换^[7]等数学方法分析零序电流暂态分量或相电流暂态分量等,利用能量、能量方向、突变量、波形相关系数、信息熵等特征量^[8-12]实现故障选线。文献[13]利用小波系数的高频分量和低频分量计算小波高频能量和小波低频能量,依据故障线路暂态小波能量最大原理进行选线,对于含长线路的谐振接地系统,且该长线路为纯电缆非故障线路的情况,因其暂态零序电流幅值较大,接近故障线路的暂态零序电流幅值,易导致基于能量的方法出现误判。文献[14]直接对故障后各线路首个周期的暂态零序电流波形进行两两相关分析,对于含短线路的谐振接地系统,且该短线路为纯架空非故障线路的情况,因其对地电容较小,暂态零序电流存在多次过零点,该短线路

与其他健全线路的相关性降低,易导致基于暂态波形相关系数的选线方法可靠性降低。文献[15]采用小波(包)变换,先通过“能量最大”原则确定各条线路故障暂态零序电流特征频带,再利用“极性相反”判据进行选线。若出现零序电流互感器采样不同步和极性反接等工程问题,基于暂态波形极性的方法容易出现误判。

谐振接地系统发生单相接地故障时,各线路暂态零序电流波形具有非线性、非平稳特性,故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形存在差异性,因此本文提出一种基于改进动态时间弯曲距离(DTW)的接地故障波形互相关度聚类选线方法。通过改进 DTW 算法求取各线路故障后半周期暂态零序电流波形两两之间的幅值互相关系数矩阵(ACCM),采用“±1”表征暂态零序电流正负极性,生成各线路暂态零序电流极性系数矩阵,进而求得极性互相关系数矩阵(PCCM),利用归一化处理后的 ACCM 和 PCCM 构造表征暂态零序电流幅值和极性信息的综合互相关系数矩阵(CCCM),作为模糊 C 均值(FCM)聚类的输入,选出故障线路。

1 选线方法

谐振接地系统发生单相接地故障后,故障线路暂态零序电流为其他所有非故障线路对地暂态电容电流之和,可知故障线路的暂态零序电流幅值大于非故障线路的暂态零序电流幅值。在同一零序电压源的作用下,故障线路的暂态零序电流由线路流向母线,所有非故障线路的暂态零序电流由母线流向线路且变化趋势相同,相位基本一致。因此,故障线路和非故障线路的暂态零序电流幅值和极性差大于不同非故障线路之间的暂态零序电流幅值和极性差。

当检测到系统发生接地故障时,通过改进 DTW

收稿日期:2017-11-09;修回日期:2018-08-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677030);福建省自然科学基金资助项目(2016J01218)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677030) and the Natural Science Foundation of Fujian Province(2016J01218)

算法求取各线路首半个周期的暂态零序电流波形两两之间的 ACCM, 结合暂态零序电流极性构造 PCCM, 对 ACCM 和 PCCM 进行归一化处理后合并, 得到表征暂态零序电流幅值和极性信息的 CCCM, 由 FCM 聚类实现谐振接地系统单相接地故障选线。

1.1 ACCM 求取

1.1.1 改进 DTW 算法

故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形存在差异性, 利用改进 DTW 算法求得表征各线路暂态零序电流幅值信息的 ACCM。DTW 在 20 世纪 60 年代由日本学者板仓提出, 并在语音识别领域得到了应用^[16]。DTW 路径示意图如图 1 所示, DTW 通过对 2 个时间序列 X 和 Y 进行相互关系的搜索, 运用动态规划思想调整两序列之间的对应关系, 获取一条最优路径, 使沿该路径两序列间的距离最小。

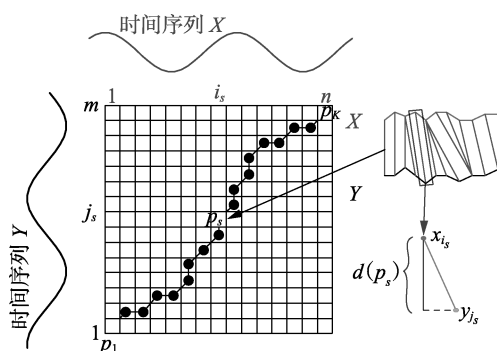


图 1 DTW 路径示意图

Fig.1 Schematic diagram of DTW path

序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, 其中 m 和 n 为序列长度。如图 1 所示, 弯曲路径可表示为黑点所形成的路径, 即 $P = \{p_1, \dots, p_s, \dots, p_K\}$, 其中 p_s 为该路径第 s 个点的坐标, 即 $p_s = (i_s, j_s)$, 它表示序列 X 的第 i_s 个点与序列 Y 的第 j_s 个点相对应。则两点间的距离 $d(p_s) = d(x_{i_s}, y_{j_s}) = |x_{i_s} - y_{j_s}|$, 可得两序列所有对应点间的距离矩阵 D 为:

$$D = \begin{bmatrix} d(x_1, y_1) & d(x_1, y_2) & \cdots & d(x_1, y_n) \\ d(x_2, y_1) & d(x_2, y_2) & \cdots & d(x_2, y_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d(x_m, y_1) & d(x_m, y_2) & \cdots & d(x_m, y_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

DTW 的有效路径需满足以下约束条件。

a. 有界性: $\max(m, n) \leq K \leq m+n-1$, 其中 K 表示路径 P 所走的总步数。

b. 边界条件: 起点为 $(1, 1)$, 终点为 (m, n) 。

c. 连续性: 图 1 中的 DTW 路径从 p_s 移至下一步 p_{s+1} , 需满足 $i_{s+1} - i_s \leq 1$, $j_{s+1} - j_s \leq 1$ 。如图 2 中的圆圈①所示, 为保证连续性, 当沿该路径至点 $D(i, j)$ 时, 前一步须经过 $D(i-1, j-1)$ 、 $D(i-1, j)$ 、 $D(i, j-1)$ 其中的一点, 不允许 DTW 路径出现局部“跳跃”现象, 如图 2 中的圆圈②所示。

d. 单调性: 从 p_s 移至下一步 p_{s+1} 时, 需满足 $i_s \leq i_{s+1}$ 、 $j_s \leq j_{s+1}$, 不允许 DTW 路径出现时间上“倒退”的现象, 如图 2 中的圆圈③所示。

满足约束条件的路径 P 有多条, 由所有路径 P 组成路径空间 W , 其中最短的路径长度即为序列 X 和 Y 之间的 DTW 距离:

$$D_{TW}(X, Y) = \min_W \sum_{s=1}^K d(p_s) \quad (2)$$

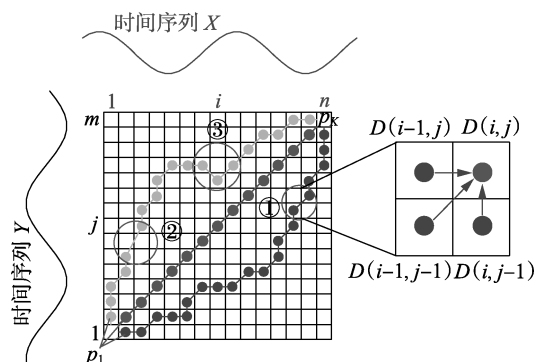


图 2 DTW 约束条件示意图

Fig.2 Schematic diagram of DTW constraint conditions

已有配电网接地故障选线所采用的 DTW 算法存在一定缺陷^[17]。其一, 波形数据点数较多, 且现有 DTW 算法中路径个数随着数据点数的增多而增加, 导致算法运行时间极大地加长; 其二, 波形受干扰导致部分数据点异常, 如图 3(b) 中的①所示, 序列 X 第 1 个数据点异常导致序列 Y 所有数据点距该点距离最短, 从而 DTW 路径出现“多对一, 一对多”的情况, 即局部路径坡度太陡或太平缓, 如图 3(a) 中的路径①所示, 导致序列 X 、 Y 之间的 DTW 与实际偏差较大, 降低了两者的相关性。

为改善 DTW 算法, 给现有的 DTW 算法加设弯曲窗口, 如图 3(a) 中的 2 条虚线所示, 即 $|i-j| \leq r$, 限制路径必须在这 2 条虚线之间。若弯曲窗口设置太窄, 即 r 太小, 则形成的弯曲路径与图 3(a) 中星形标记的路径非常相近, 而星形标记路径恰好为传统欧氏距离, 使改进 DTW 失去相对传统欧氏距离的优势是不合适的; 若 r 太大, 则弯曲窗口形同虚设, 依然无法改善原有 DTW 的缺点。经多实验验证, 取 $r=20$ 可适应所有可能存在的故障波形, 且效果最佳。

如图 3(a) 中的路径②所示, 弯曲窗口的设置未能完全解决局部路径坡度问题, 需要进行坡度限制。坡度限制表示为 DTW 路径沿着横轴或者纵轴方向连续行走的步数不能超过 q 步, 如果超过 q 步并且第 q 步为 $D(i, j)$, 则第 $q+1$ 步必须沿着对角线走至 $D(i+1, j+1)$, 如图 3(a) 中的路径③所示。由于弯曲窗口的存在, DTW 路径沿着横轴或纵轴方向连续行走的步数不会超过 r 步, 所以, $q < r$ 。若 $q=1$, 则限制

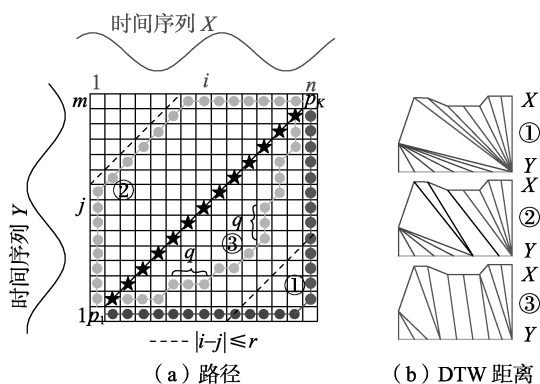


图 3 改进 DTW 示意图

Fig.3 Schematic diagram of improved DTW

DTW 路径的每一步都必须沿着对角线走,即为传统欧氏距离路径。经多次实验验证,取 $q=5$ 可最大限度地改善由外界干扰因素引起数据点异常而导致的 DTW 路径局部坡度问题。

1.1.2 改进 DTW 与欧氏距离对比

对于 2 个长度为 n 的时间序列 X 和 Y ,两者之间的距离可以定义为 2 个点间的直线距离,称为欧氏距离,即:

$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

改进 DTW 与欧氏距离的对比如图 4 所示。如图 4(a) 所示,对于 2 个长度相等的时间序列 X 和 Y ,求取两者之间的欧氏距离时,必须在时间上“一一对应”,若时间序列 X 波形发生部分缺失,将导致欧氏距离计算结果出现错误,而改进 DTW 可允许 2 个序列在时间上进行“一对多,多对一”的计算,也可适应 2 个不同长度的序列间的计算。

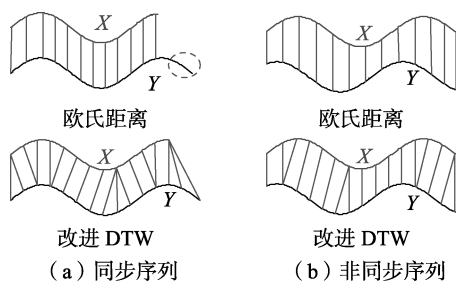


图 4 改进 DTW 与欧氏距离的对比

Fig.4 Comparisons between improved DTW and Euclidean distance

工程应用中,各信号采样不同步的问题往往难以避免^[1],导致图 4(a)中“一一对应”的序列时间 X 和 Y 变成时间上不同步的 2 个序列,如图 4(b) 所示。

受不同步问题的影响,图 4(b)中两序列之间的欧氏距离极大地增加,削弱了两序列之间的相似程度。改进 DTW 可自动调整 2 组序列之间的对应关系,消除不同步影响。以长度为 50 的时间序列 $X =$

$\sin(100\pi t)$ 和 $Y = \sin(100\pi t + n_{\text{asy}}\pi/25)$ (n_{asy} 为同步误差点数)为例,其改进 DTW 和欧氏距离的对比结果见表 1。

表 1 改进 DTW 与欧氏距离对比

Table 1 Comparison between improved DTW and Euclidean distance

n_{asy}	改进 DTW	欧氏距离
2	0.785 30	8.232 9
5	3.618 70	20.234 5
8	7.736 70	31.533 9
10	10.625 90	38.395 3

由表 1 可知,改进 DTW 和欧氏距离随着同步误差点数增多而增大,但在同一同步误差下,改进 DTW 都远小于欧氏距离,更接近于无同步误差时两序列间的距离。因此,改进 DTW 优于欧氏距离。

1.1.3 ACCM

若有 M 条馈线, $Y_i (i=1, 2, \dots, M)$ 表示第 i 条线路的暂态零序电流时间序列。利用改进 DTW 算法求取各线路暂态零序电流波形两两之间的幅值互相关系数 $g_{ij} (i, j=1, 2, \dots, M)$, 可得 ACCM 如式(4) 所示。

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1M} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{M1} & g_{M2} & \cdots & g_{MM} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 PCCM 求取

谐振接地系统发生单相接地故障后,故障线路和非故障线路的暂态零序电流极性相反。基于此,采用 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 表示某条线路的暂态零序电流时间序列。用 1 替代 Y 中大于 0 的元素,其他元素用 -1 替代,可得极性系数矩阵 C 为:

$$C = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_i \ \cdots \ c_n] \quad (5)$$

$$c_i = \begin{cases} 1 & y_i > 0 \\ -1 & y_i \leq 0 \end{cases}$$

利用式(6)求取各线路暂态零序电流波形两两之间的极性互相关系数 $h_{ij} (i, j=1, 2, \dots, M)$ 。

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^n C_i C_j \left[\sum_{k=1}^n C_i^2(k) \sum_{k=1}^n C_j^2(k) \right]^{-1/2} \quad (6)$$

其中, C_i, C_j 为第 i, j 条线路的极性系数矩阵。

则可得 PCCM 为:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \cdots & h_{MM} \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 PCCM 求取

利用式(8)对分别对 G, H 进行归一化处理得

到 $\hat{G}$ 、 $\hat{H}$, 从而将矩阵中的元素限制在 $[0, 1]$ 范围内。

$$\hat{a}_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(A)}{\max(A) - \min(A)} \quad (8)$$

其中, $\hat{a}_{ij}$ 为矩阵 $\hat{A}$ 中的元素; a_{ij} 为矩阵 A 中的元素; $\max(\cdot)$ 和 $\min(\cdot)$ 分别表示矩阵中的最大元素和最小元素。

将 $\hat{G}$ 和 $\hat{H}$ 合并为 Q 。

$$Q = \begin{bmatrix} \hat{g}_{11} & \hat{g}_{12} & \cdots & \hat{g}_{1M} & \hat{h}_{11} & \hat{h}_{12} & \cdots & \hat{h}_{1M} \\ \hat{g}_{21} & \hat{g}_{22} & \cdots & \hat{g}_{2M} & \hat{h}_{21} & \hat{h}_{22} & \cdots & \hat{h}_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{g}_{M1} & \hat{g}_{M2} & \cdots & \hat{g}_{MM} & \hat{h}_{M1} & \hat{h}_{M2} & \cdots & \hat{h}_{MM} \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.4 FCM 聚类选线

FCM 聚类是一种有效的模式识别方法, 它将输入信号按隶属度划分至某一聚类中心, 实现柔性模糊划分。设 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_S\}$ 为样本空间, 其中, S 为样本容量; 每个样本为 N 维向量, 即 $s_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iN}]$ 。将 S 分为 J 类 ($2 \leq J \leq S$), 各样本按隶属度划分到这 J 个不同的类, 以 u_{ij} 表示 S 中第 j 个样本属于第 i 类的隶属度, 满足以下条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^J u_{ij} = 1 \\ u_{ij} \in [0, 1] \\ \sum_{j=1}^S u_{ij} \in (0, S) \end{cases} \quad (10)$$

则 $U_{J \times N} = [u_{ij}]$ 称为隶属度矩阵。FCM 聚类采用迭代法使目标函数最小, 即有:

$$\min J_{\text{FCM}}(U, V) = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^J u_{ij}^\gamma \|s_j - v_i\|^2 \quad (11)$$

其中, J_{FCM} 为目标函数; U 为隶属度矩阵; V 为聚类中心; $\gamma > 1$ 为模糊加权指数, 一般取 $\gamma = 2$; v_i 为第 i 类的聚类中心; $\|s_j - v_i\|$ 为样本 s_j 到聚类中心 v_i 的欧氏距离。迭代收敛后得到 S 的最优聚类中心 $V = [v_i]$ 和隶属度矩阵 $U = [u_{ij}]$ 。

利用 FCM 聚类将各线路的故障暂态零序电流分成 2 类, 可得隶属度矩阵 U 为:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1M} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2M} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, u_{ij} 为第 j 条线路属于第 i 类的隶属度; M 为线路数。通过隶属度矩阵 U 可确定分别隶属于这 2 类的线路, 其中故障线路被单独分为一类, 则无需设置阈值即可选出故障线路。

2 仿真验证

利用 PSCAD/EMTDC 软件搭建 10 kV 谐振接地

系统仿真模型如图 5 所示, 图中, l_o 为架空线长度; l_c 为电缆线长度; R_f 为接地电阻, 其他参数详见附录。

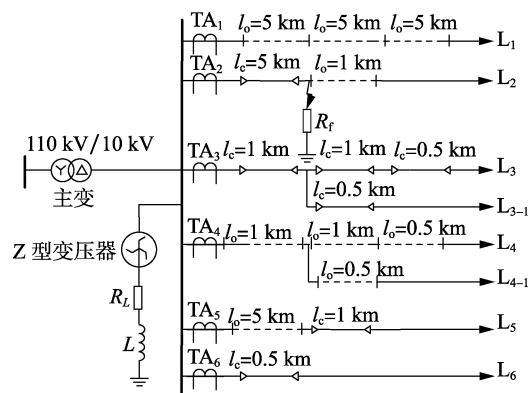


图 5 10 kV 谐振接地系统仿真模型

Fig.5 Simulation model of 10 kV resonant grounding system

谐振接地系统发生单相接地故障时的暂态过程时间较短, 取故障后半周期的零序电流进行分析, 如图 6 所示。以线路 L_3 距离母线 1 km 处发生故障合闸角为 60° 、接地电阻为 50Ω 的 A 相接地故障为例, 说明故障选线过程, 采样频率为 10 kHz。

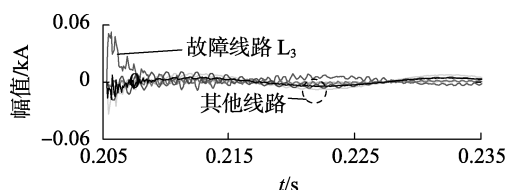


图 6 暂态零序电流波形

Fig.6 Transient zero-sequence current waveforms

取 6 条线路在故障后半周期的暂态零序电流波形, 利用式 (2) 计算暂态零序电流两两之间的幅值互相关系数, 然后通过式 (8) 进行归一化处理后得到 $\hat{G}$ 。

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0.4571 & 0.6750 & 0.0664 & 0.3710 & 0.2393 \\ 0.4571 & 0 & 1 & 0.4252 & 0.2903 & 0.2128 \\ 0.6750 & 1 & 0 & 0.6660 & 0.7733 & 0.7447 \\ 0.0664 & 0.4252 & 0.6660 & 0 & 0.3299 & 0.2245 \\ 0.3710 & 0.2903 & 0.7733 & 0.3299 & 0 & 0.3196 \\ 0.2393 & 0.2128 & 0.7447 & 0.2245 & 0.3196 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

利用 6 条线路的暂态零序电流波形, 通过矩阵构造得到极性系数矩阵 C , 根据式 (6) 求暂态零序电流两两之间的极性互相关系数, 然后利用式 (8) 进行归一化处理后得到 $\hat{H}$ 。

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0.4348 & 0 & 0.4058 & 0.2754 & 0.4058 \\ 0.4348 & 1 & 0.2464 & 0.4493 & 0.5797 & 0.8261 \\ 0 & 0.2464 & 1 & 0.1594 & 0.0580 & 0.2174 \\ 0.4058 & 0.4493 & 0.1594 & 1 & 0.3478 & 0.3913 \\ 0.2754 & 0.5797 & 0.0580 & 0.3478 & 1 & 0.5217 \\ 0.4058 & 0.8261 & 0.2174 & 0.3913 & 0.5217 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

利用式(9)将 $\hat{G}$ 和 $\hat{H}$ 合并后得到矩阵 Q ,将 Q 通过折线图表示为图 7 所示形式,其中 V_1 、 V_2 分别表示所属类别中所有序列在时间上取均值。由图 7 可知,线路 L_3 与聚类中心 V_1 聚在一起,而其他线路与聚类中心 V_2 聚在一起,从而可判定线路 L_3 为故障线路。

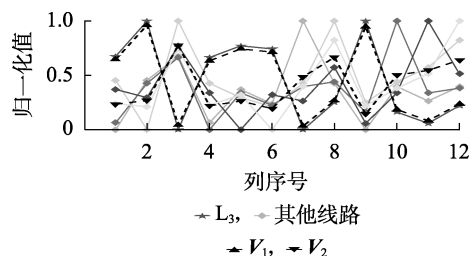


图 7 CCCM 折线图

Fig.7 Line diagram of CCCM

将 Q 作为 FCM 聚类的输入,由于故障选线只需判别故障与非故障 2 种状态,设置 FCM 聚类数目为 2,加权指数 $\gamma=2$,迭代终止因子 $\varepsilon=10^{-5}$,最大迭代次数 $k_{\max}=100$ 。经 7 次迭代后,目标函数 $J_{\text{FCM}}(U, V)=0.124\ 358$,则隶属度矩阵为:

$$U = \begin{bmatrix} 0.140\ 4 & 0.080\ 7 & \underline{0.997\ 2} & 0.132\ 7 & 0.099\ 9 & 0.053\ 9 \\ 0.859\ 6 & 0.919\ 3 & 0.002\ 8 & \underline{0.867\ 3} & \underline{0.900\ 1} & \underline{0.946\ 1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

隶属度矩阵 U 的行代表状态类别,1—6 列分别对应线路 L_1 — L_6 ,每一列的最大元素所在的行即为该线路对应的状态(如式(15)中的下划线所示)。将隶属度矩阵 U 通过堆叠图表示,如图 8 所示。由图可见,线路 L_3 自成一类,而其他线路均属于另一类,从而可判定线路 L_3 为故障线路。

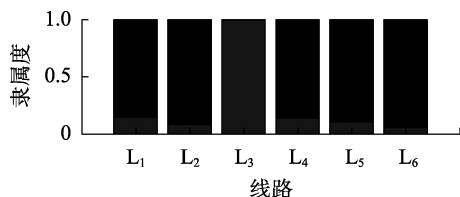


图 8 FCM 聚类结果堆叠图

Fig.8 Stack diagram of FCM cluster result

2.1 典型故障

单相接地故障情况较为复杂,因此,需对不同线路、不同故障合闸角、不同故障位置、不同接地电阻、不同补偿度等情况下发生的单相接地故障进行仿真,以故障线路为 L_1 为例,选线结果见表 2,表中, X_f 为故障点到母线的距离; θ 为故障合闸角; p_{asc} 为消弧线圈补偿度, U_1 — U_3 分别如式(16)—(18)所示。由表 2 可见,本文故障选线算法能适应不同的单相接地故障情况。

表 2 故障选线结果

Table 2 Results of fault line selection

$\theta/(\circ)$	X_f/km	R_f/Ω	$p_{\text{asc}}/\%$	隶属度矩阵	故障选线结果
0	10	0	5	U_1	L_1
45	5	100	10	U_2	L_1
90	5	2 000	8	U_3	L_1

$$U_1 = \begin{bmatrix} 0 & \underline{0.999\ 2} & \underline{0.985\ 7} & \underline{0.996\ 4} & \underline{0.998\ 5} & \underline{0.998\ 6} \\ 1 & 0.000\ 8 & 0.014\ 3 & 0.003\ 6 & 0.001\ 5 & 0.001\ 4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} 0 & \underline{0.997\ 9} & \underline{0.967\ 4} & \underline{0.990\ 8} & \underline{0.993\ 8} & \underline{0.996\ 6} \\ 1 & 0.002\ 1 & 0.032\ 6 & 0.009\ 2 & 0.006\ 2 & 0.003\ 4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$U_3 = \begin{bmatrix} 0 & \underline{0.998\ 5} & \underline{0.977\ 3} & \underline{0.993\ 4} & \underline{0.997\ 8} & \underline{0.996\ 2} \\ 1 & 0.001\ 5 & 0.022\ 7 & 0.006\ 6 & 0.002\ 2 & 0.003\ 8 \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.2 电弧故障

实际系统中,间歇性电弧故障的发生可能性较大,且故障过程较为复杂。仿真采用控制论模型,主要因其可仿真不同电弧长度对电弧阻抗、接地电弧稳态和暂态特性的影响。以线路 L_3 发生电弧故障为例,故障选线结果见表 3。表中, U_{arc1} 、 U_{arc2} 分别如式(19)、(20)所示。

表 3 电弧故障选线结果

Table 3 Results of fault line selection under arc fault

$\theta/(\circ)$	X_f/km	$p_{\text{asc}}/\%$	隶属度矩阵	故障选线结果
90	1	10	U_{arc1}	L_3
0	2	5	U_{arc2}	L_3

$$U_{\text{arc1}} = \begin{bmatrix} \underline{0.950\ 5} & \underline{0.923\ 3} & 0.001\ 1 & \underline{0.967\ 1} & \underline{0.823\ 4} & \underline{0.976\ 9} \\ 0.049\ 5 & 0.076\ 7 & \underline{0.998\ 9} & 0.032\ 9 & 0.176\ 6 & 0.023\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$U_{\text{arc2}} = \begin{bmatrix} \underline{0.986\ 4} & \underline{0.978\ 1} & 0 & \underline{0.988\ 5} & \underline{0.986\ 3} & \underline{0.996\ 3} \\ 0.013\ 6 & 0.021\ 9 & \underline{1} & 0.011\ 5 & 0.013\ 7 & 0.003\ 7 \end{bmatrix} \quad (20)$$

2.3 采样不同步

工程应用中,各信号采样不同步的问题往往难以避免^[1]。以线路 L_6 发生单相接地故障时,线路 L_1 、 L_3 、 L_5 的零序电流采样时间滞后线路 L_2 、 L_4 、 L_6 的零序电流采样时间 0.001s 为例,故障选线结果见表 4。表中, U_{asy1} 、 U_{asy2} 分别如式(21)、(22)所示。由表 4 可见,本文故障选线算法可适应采样不同步的影响并正确选线。

2.4 抗干扰能力

现场上传的故障暂态零序电流波形通常会受噪声干扰信号的影响而发生变化,从而降低故障选线准确率。以信噪比为 20 dB 的高斯白噪声干扰下,线路 L_2 发生单相接地故障为例,故障选线结果见表 5。表中, U_{g1} 、 U_{g2} 分别如式(23)、(24)所示。

表4 信号采样不同步下的故障选线结果

Table 4 Results of fault line selection under asynchronous sampling

$\theta/(\circ)$	X_f/km	R_f/Ω	$p_{\text{asc}}/\%$	隶属度矩阵	故障选线结果
45	0.5	500	10	U_{asy1}	L_6
90	0.5	0	5	U_{asy2}	L_6

$$U_{\text{asy1}} = \begin{bmatrix} 0.968\ 5 & 0.988\ 8 & 0.842\ 2 & 0.970\ 6 & 0.992\ 3 & 0.000\ 7 \\ 0.031\ 5 & 0.011\ 2 & 0.157\ 8 & 0.029\ 4 & 0.007\ 7 & 0.999\ 3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$U_{\text{asy2}} = \begin{bmatrix} 0.967\ 1 & 0.992\ 0 & 0.829\ 3 & 0.969\ 5 & 0.971\ 4 & 0.000\ 6 \\ 0.032\ 9 & 0.008\ 0 & 0.170\ 7 & 0.030\ 5 & 0.028\ 6 & 0.999\ 4 \end{bmatrix} \quad (22)$$

表5 高斯白噪声干扰下的故障选线结果

Table 5 Results of fault line selection with Gaussian noise disturbance

$\theta/(\circ)$	X_f/km	R_f/Ω	$p_{\text{asc}}/\%$	隶属度矩阵	故障选线结果
45	6	2 000	10	U_{g1}	L_2
0	3	0	5	U_{g2}	L_2

$$U_{\text{g1}} = \begin{bmatrix} 0.983\ 2 & 0 & 0.940\ 3 & 0.990\ 5 & 0.993\ 7 & 0.995\ 5 \\ 0.016\ 8 & 1 & 0.059\ 7 & 0.009\ 5 & 0.006\ 3 & 0.004\ 5 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$U_{\text{g2}} = \begin{bmatrix} 0.988\ 8 & 0 & 0.930\ 4 & 0.990\ 4 & 0.987\ 4 & 0.996\ 9 \\ 0.011\ 2 & 1 & 0.069\ 6 & 0.009\ 6 & 0.012\ 6 & 0.003\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

2.5 两点接地故障

单相弧光接地故障若未能及时切除,其引起的过电压可能使得其他线路同相的绝缘弱化点发生接地故障,导致两点同时发生单相接地故障。以线路 L_4 、 L_5 同时发生单相接地故障为例,仿真不同线路两点同时接地情况,选线结果见表6。表中, U_{tpg} 如式(25)所示。由表6可见,对于这类故障,本文故障选线方法仍能正确选线。

表6 不同线路两点接地故障选线结果

Table 6 Results of fault line selection when two points grounding fault occurs on different lines

故障线路	$\theta/(\circ)$	X_f/km	$p_{\text{asc}}/\%$	隶属度矩阵	故障选线结果
L_4	90	2	5	U_{tpg}	L_4
L_5	90	5	5		L_5

$$U_{\text{tpg}} = \begin{bmatrix} 0.931\ 3 & 0.991\ 3 & 0.880\ 2 & 0.109\ 0 & 0.043\ 8 & 0.980\ 0 \\ 0.068\ 7 & 0.008\ 7 & 0.119\ 8 & 0.891\ 0 & 0.956\ 2 & 0.020\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

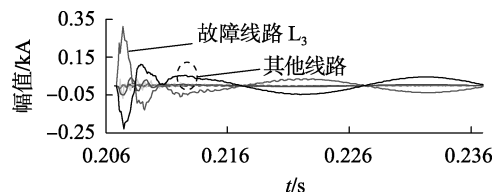
3 对比分析

3.1 与单一选线方法对比

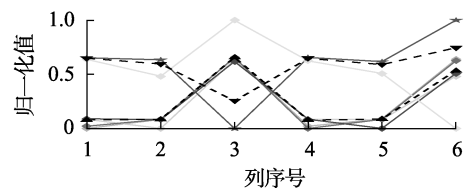
由于故障机理、环境以及随机性,导致故障情况

非常复杂,对于所有的故障类型,传统的基于幅值或极性的单一选线方法难以实现高准确性和可靠性。分别将 ACCM、PCCM 和 CCCM 作为 FCM 聚类的特征量输入(下文分别简称为方法1、方法2和方法3)进行对比分析。

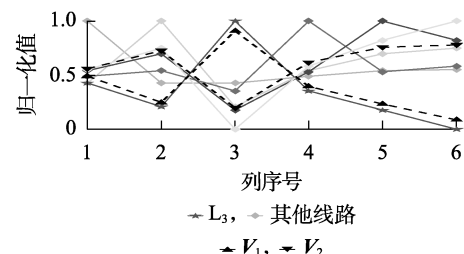
配电系统中存在部分纯电缆线路较长的情况,将图5中的线路 L_6 加长至12 km,线路 L_3 距离母线1 km处发生故障合闸角为 90° 、接地电阻为0的A相接地故障为例作为第1类特殊接地故障类型,对应的仿真结果如图9所示。由图9可见,非故障线路 L_6 的暂态零序电流幅值比其他非故障线路的暂态零序电流大得多,易导致基于暂态零序电流幅值



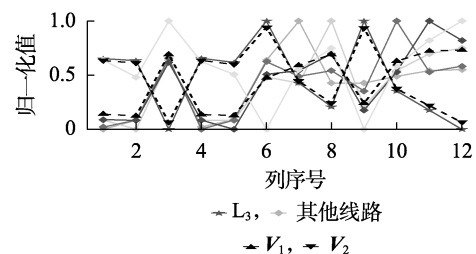
(a) 暂态零序电流波形



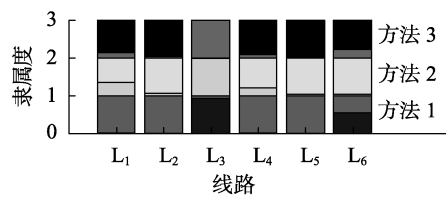
(b) 方法1折线图



(c) 方法2折线图



(d) 方法3折线图



(e) 堆叠图

图9 第1类特殊接地故障仿真结果

Fig.9 Simulative results of first type of special grounding fault

的方法发生误判。

工程应用上,可能发生安装人员将零序电流互感器极性反接的情况。以线路 L_5 末端故障合闸角为 0° 、接地电阻为 $10\ \Omega$ 的 A 相接地故障,且线路 L_5 上的零序电流互感器极性反接为例作为第 2 类特殊故障类型,对应的仿真结果如图 10 所示。由图 10 可见,故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形极性相同时,易造成基于暂态零序电流极性方法发生误判。

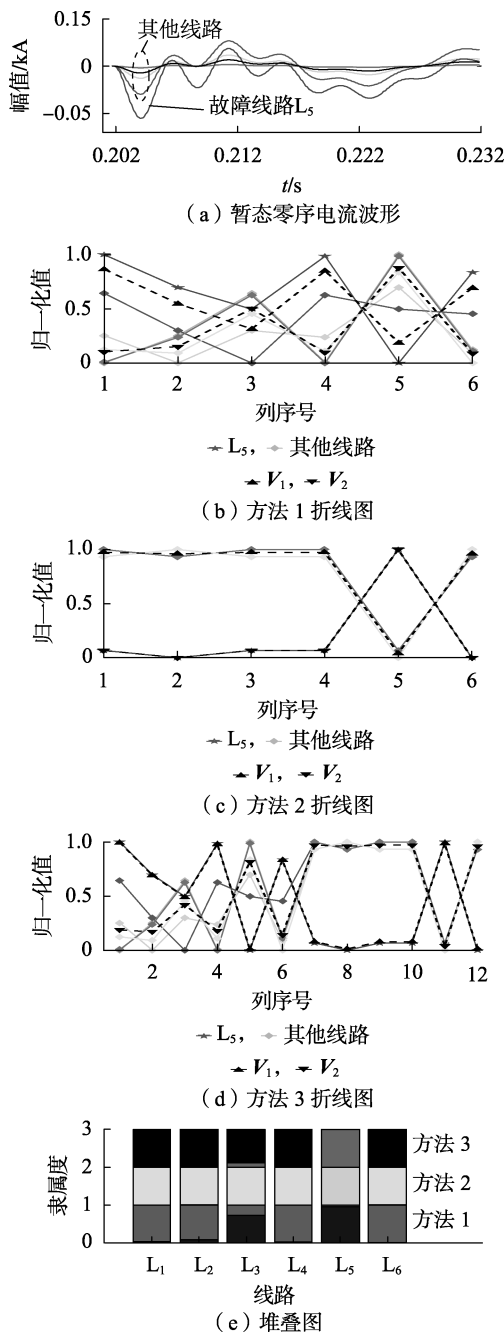


图 10 第 2 类特殊接地故障仿真结果

Fig.10 Simulative results of second type of special grounding fault

谐振接地系统中,还存在不同线路两点同时发生单相接地故障的情况。以线路 L_5 、 L_6 末端同时发

生故障合闸角为 0° 、接地电阻为 0 的 A 相接地故障为例作为第 3 类特殊故障,对应的仿真结果如图 11 所示(图 11(a)中仅标示出故障线路对应波形)。由图 11 可见,由于 2 条故障线路的暂态零序电流幅值差别较大,两者相似性较低,基于暂态零序电流幅值或极性的方法难以准确选出故障线路。

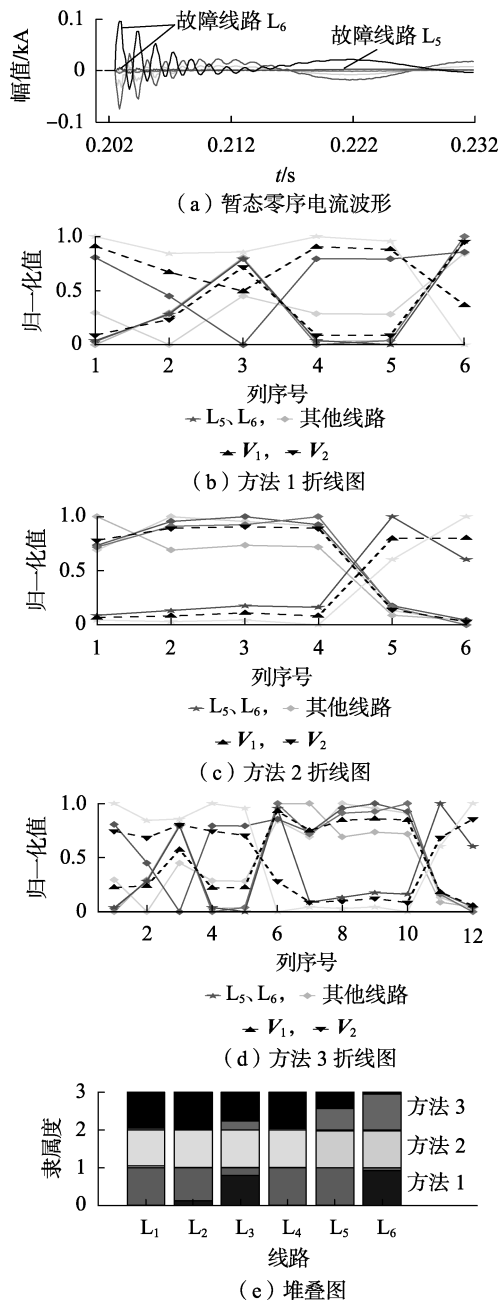


图 11 第 3 类特殊接地故障仿真结果

Fig.11 Simulative results of third type of special grounding fault

3 种方法的特殊接地故障选线结果如表 7 所示,表中,“ $\times$ ”、“ $\checkmark$ ”分别表示选线错误、正确。由表 7 可见,本文故障选线算法能够适用于谐振接地系统中较长或较短的非故障线路、零序电流互感器极性反接等特殊情况,适应性较强。

表7 接地故障选线结果对比

Table 7 Comparisons of earth-fault selection results

特殊接地故障类型	选线结果		
	方法1	方法2	方法3
1	×	×	√
2	×	√	√
3	×	√	√

3.2 与已有相关选线方法对比

实际现场故障情况复杂,对于所有的故障类型,传统的基于能量^[15]或基于暂态波形相关系数^[16]的单一选线方法难以实现高准确性和可靠性。文献[15-16]所提方法能够适用于大多数的故障类型,但两者都无法准确判断不同线路两点同时发生单相接地故障的情况。此外,文献[15]的方法在谐振接地系统含长线路,且长线路为纯电缆非故障线路的情况下易发生误判,而文献[16]的方法在谐振接地系统含短线路,且短线路为纯架空非故障线路的情况下易发生误判。而基于CCCM的聚类算法结合了故障暂态零序电流的幅值和极性特征,具有更好的鲁棒性,可适应谐振接地系统的复杂故障类型。

以线路 L_4 、 L_5 末端同时发生故障合闸角为 0° 、接地电阻为0的A相接地故障(简称接地故障1)为例,其暂态零序电流波形如图12(a)所示。

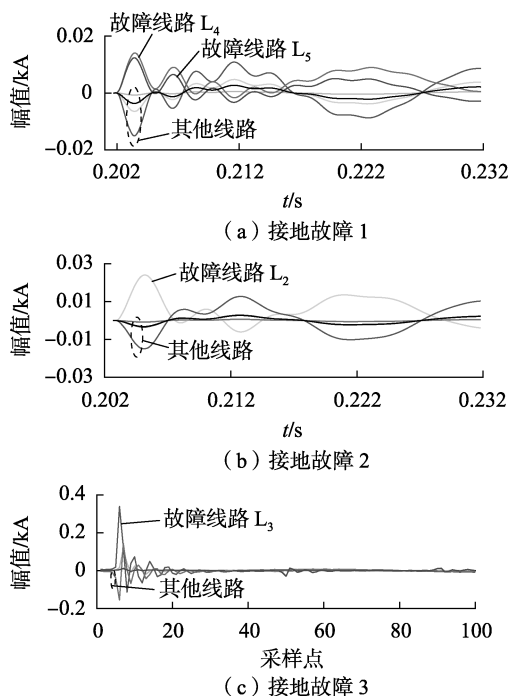


图12 3种接地故障的暂态零序电流波形

Fig.12 Transient zero-sequence current waveforms of three types of grounding fault

当谐振接地系统中存在部分纯电缆长线路时,因其暂态零序电流幅值较大,接近于故障线路,易导致基于能量的选线方法出现误判。将图5中线路 L_3 的总长度加长至8 km,以线路 L_2 距离母线6 km处发生故障合闸角为 0° 、接地电阻为0的A相接地故障(简称接地故障2)为例,其暂态零序电流波形如图12(b)所示。

图12(c)为汪疇变电站现场实际接地故障(简称接地故障3)的暂态零序电流波形,采样频率为4 kHz,现场共在5条线路上安装接地故障录波终端单元,共采集到1条故障线路和4条非故障线路的数据。

根据文献[15-16]以及本文的选线方法所得的选线结果如表8所示。

表8 故障选线结果

Table 8 Results of faulty line detection

故障线路	$\theta/(^\circ)$	X_f/km	R_f/Ω	$p_{\text{asc}}/\%$	故障选线结果		
					文献[15]	文献[16]	本文方法
L_4	0	6	0	5	母线	L_5	L_4 、 L_5
L_5	0	6	500	5	(×)	(×)	(√)
L_2	0	6	0	8	母线	L_2	L_2
					(×)	(√)	(√)
L_3	—	—	—	—	L_2	L_1	L_3
					(√)	(×)	(√)

如表8所示,文献[15]的方法无法准确识别出接地故障1和2,文献[16]的方法无法准确识别出接地故障1和3,而本文故障选线方法均能准确选出故障线路。

4 结论

利用改进DTW算法和极性构造法,求谐振接地系统中各出线故障暂态零序电流的CCCM,作为FCM聚类的特征矩阵输入,选出故障线路。对各种不同故障情况的仿真结果表明:

- 利用改进DTW算法和极性构造方法可提高非故障线路暂态零序电流波形间的相似度及选线裕度;
- 采用FCM聚类,可无需设置选线阈值就可判出故障线路;
- 选线方法对于谐振接地系统中零序电流互感器极性反接、纯电缆非故障长线路和纯架空非故障短线路等特殊情况下,皆能适用;
- 选线方法能够在高阻接地、噪声干扰、采样不同步、两点接地故障等情况下准确选线。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- 郭谋发,刘世丹,杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 183-190.
GUO Moufa, LIU Shidan, YANG Gengjie. A novel approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 183-190.

- [2] 姜博,董新洲,施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
- JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. A method of single phase to ground fault feeder selection based on single phase current traveling wave for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227.
- [3] 李斌,束洪春. 基于瞬时实功率和瞬时虚功率的谐振接地系统单相选线新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 183-190.
- LI Bin, SHU Hongchun. A new integration method of fault line detection in resonant earthed system based on instantaneous real power and instantaneous virtual power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 183-190.
- [4] 苏战涛,吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 30-33.
- SU Zhantao, LÜ Yanping. A new wavelet packet analysis based method to detect faulty line for single phase to ground fault occurred in distribution network with small current neutral grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 30-33.
- [5] 张钧,何正友,贾勇. 基于 S 变换的故障选线新方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 109-115.
- ZHANG Jun, HE Zhengyou, JIA Yong. Fault line identification approach based on S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 109-115.
- [6] 龙小梅. 基于数学形态学的小电流接地系统单相接地故障选线研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- LONG Xiaomei. Research on single phase-to-ground fault line selection of small current ground system based on mathematical morphology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [7] 康忠健,李丹丹,刘晓林. 应用非工频暂态分量的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 1-6.
- KANG Zhongjian, LI Dandan, LIU Xiaolin. Faulty line selection with non-power frequency transient components of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 1-6.
- [8] WANG Yumei, GUO Hao. Fault line selection method for single phase earth fault based on transient signal in the frequency band[C] // 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. [S.l.]: IEEE, 2010: 738-741.
- [9] 金涛,褚福亮. 基于暂态非工频零序电流的含 DG 新型配电网的接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 96-105.
- JIN Tao, CHU Fuliang. A fault line-selection method in new distribution network with DG based on transient non-power frequency zero sequence current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 96-105.
- [10] 张帆,潘彦存,张慧芬,等. 基于方向行波的小电流接地系统故障选线[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 70-75.
- ZHANG Fan, PAN Zhencun, ZHANG Huifen, et al. Fault line selection in non-solidly earth network based on direction traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 70-75.
- [11] 郭谋发,郑新桃,杨耿杰,等. 利用暂态波形伸缩变换的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 33-40.
- GUO Moufa, ZHENG Xintao, YANG Gengjie, et al. Faulty line detection based on transient waveform stretching transformation for resonance-grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 33-40.
- [12] 贾清泉,石磊磊,王宁,等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.
- JIA Qingquan, SHI Leilei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 191-197.
- [13] 吴乐鹏,黄纯,林达斌,等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.
- WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [14] 邢亚辉. 利用零序电流的相关性进行小电流接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 64-67.
- XING Yahui. Faulty line selection with correlativity of zero sequence current in non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 64-67.
- [15] 王耀南,霍百林,王辉,等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
- WANG Yaonan, HUO Bailin, WANG Hui, et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.
- [16] STAINHAOUER G N, CARAYANNIS G. New parallel implementations for DTW algorithms[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1990, 38(4): 705-711.
- [17] 刘鹏辉,黄纯. 基于动态时间弯曲距离的小电流接地故障区段定位方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 952-957.
- LIU Penghui, HUANG Chun. A fault section location method for small-current grounding fault in distribution network based on dynamic time warping distance[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 952-957.

作者简介:



邵翔

邵翔(1993—),男,福建南平人,硕士研究生,主要研究方向为配电网及其自动化技术(E-mail: 904615798@qq.com);

郭谋发(1973—),男,福建福州人,副教授,硕士,主要研究方向为电力系统自动化(E-mail: gmf@fzu.edu.cn);

游林旭(1992—),男,福建漳州人,硕士,主要方向为配电网及其自动化技术(E-mail: 294005648@qq.com)。

(下转第 78 页 continued on page 78)

lation research on earth fault characteristics of modular multilevel converter based high voltage direct current transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2658-2664.

- [14] 张建坡, 赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 32-37.

ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 32-37.

- [15] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.

WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.

作者简介:



孙吉波

163.com);

刘崇茹(1977—), 女, 陕西西安人, 教授, 博士, 主要从事交直流混合系统分析与仿真、运行与控制方面的科研和教学工作(E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn)。

孙吉波(1984—), 男, 四川广元人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统分析、控制与运行相关的工作(E-mail: sunjibo@gddd.csg.cn);

王宇(1993—), 男, 辽宁营口人, 博士研究生, 主要研究方向为模块化多电平换流器建模与控制(E-mail: wangyu_ncepu@

Pole-to-pole short circuit current calculation of multi-terminal DC grid based on MMC

SUN Jibo¹, WANG Yu², LIU Chongru², WU Shuangxi¹, LIU Junlei¹, HUANG Guodong¹

(1. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: DC-side fault removal capability is an essential index for evaluating DC transmission systems. The mechanism of DC-side pole-to-pole short circuit fault in HBSM (Half-Bridge Sub-Module)-based MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current) system is analyzed, and the main factors affecting the peak value of fault current are studied quantitatively. Then, the conclusions are extended to the multi-terminal MMC system, and a calculation method for outlet current of each converter station and line current within 10 ms after faults is proposed, which is applicable for different power grid topologies and different fault locations. The electromagnetic transient simulation model of a three-terminal system is built in PSCAD/EMTDC simulation software, and the calculative results of fault current are compared with the simulative results. The results show that the proposed calculation method has a certain accuracy and speed, and has guiding significance for DC power grid planning and selection of DC circuit breakers.

Key words: multi-terminal DC grid; modular multilevel converter; pole-to-pole short circuit; fault current calculation

(上接第71页 continued from page 71)

Faulty line selection method using mutual correlation cluster of grounding fault waveforms based on improved DTW method

SHAO Xiang¹, GUO Moufa¹, YOU Linxu²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Zhangzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Company, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: When single-phase-to-ground fault occurs in resonance-grounding system, the transient zero-sequence current of each line in resonant grounding system is nonlinear and non-stationary, and there're many differences between the transient zero-sequence current waveforms of faulty line and those of normal lines. On this basis, a faulty line selection method using mutual correlation cluster of grounding fault waveforms based on improved DTW (Dynamic Time Warping) method is proposed. The ACCM (Amplitude Correlation Coefficient Matrix) of transient zero-sequence current waveforms of different lines within half cycle after fault is obtained via improved DTW method. By combining the PCCM (Polarity Correlation Coefficient Matrix) of transient zero-sequence currents with ACCM, the CCCM (Complex Correlation Coefficient Matrix) is constructed, which represents the amplitude and polarity information of transient zero-sequence currents. Then the faulty line is selected by FCM (Fuzzy C-Means) cluster method without setting threshold. The simulative results of noise interference, two points grounding fault, arc fault and asynchronous sampling show that the proposed faulty line selection method is immune to possible influence factors in engineering application, the proposed method can achieve reliable faulty line selection.

Key words: resonant grounding system; faulty line selection; transient zero-sequence current; correlation coefficient matrix; fuzzy C-means cluster

附录

仿真参数设置如下。

a.110kV 主变压器型号为 SZ-31500/110, 连接组别 Yd11, 变压器空载损耗 $\Delta P_0 = 19.5\text{kW}$, 短路损耗 $\Delta P_k = 118.9\text{kW}$, 空载电流百分数 $I_0\% = 0.12$, 短路电压百分数 $U_k\% = 14.99$ 。

b.架空线路参数为: $R_0 = 0.23\Omega/\text{km}$, $C_0 = 0.008\mu\text{F}/\text{km}$, $L_0 = 5.478\text{mH}/\text{km}$; $R_1 = 0.17\Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.00969\mu\text{F}/\text{km}$, $L_1 = 1.21\text{mH}/\text{km}$ 。

c.电缆线路参数为: $R_0 = 2.7\Omega/\text{km}$, $C_0 = 0.28\mu\text{F}/\text{km}$, $L_0 = 1.019\text{mH}/\text{km}$; $R_1 = 0.27\Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.339\mu\text{F}/\text{km}$, $L_1 = 0.255\text{mH}/\text{km}$ 。

d.Z 型变压器由 3 个单相饱和变压器构成, 型号为 JSC-200/10.5, 每个单相饱和变压器的一次侧和二次侧参数设置为: $U_{1p} = U_{1s} = 10.5\text{kV}$; $R_p = R_s = 13.7675\Omega$; $L_p = L_s = 65.8\text{mH}$ 。

e.负荷用等效阻抗 $(100 + j40)\Omega$ 代替; 消弧线圈过补偿度取 5%, 其电感 $L = 1/(1.05 \times 1/(3\omega^2 C_\Sigma)) = 1.128\text{ (H)}$, C_Σ 为系统对地分布电容的总和; 消弧线圈过补偿弧线圈有功损耗约为感性损耗的 2.5%~3%, 本文取 3%, 计算得到电阻 $R_L = 10.63\Omega$ 。