

9-14-2020

A method of line selection protection based on power angle fuzzy clustering analysis

Zebing SHI

CSG Power Dispatching Control Center, Guangzhou, 510530 , China

Xiaobing DING

CSG Power Dispatching Control Center, Guangzhou, 510530 , China

Jiang YU

CSG Power Dispatching Control Center, Guangzhou, 510530 , China

Xiangjun ZENG

Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114 , China

Kun YU

Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114 , China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

SHI, Zebing; DING, Xiaobing; YU, Jiang; ZENG, Xiangjun; YU, Kun; LIU, Zhanlei; and LI, li (2020) "A method of line selection protection based on power angle fuzzy clustering analysis," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 4.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.004

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/4>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

A method of line selection protection based on power angle fuzzy clustering analysis

Authors

Zebing SHI, Xiaobing DING, Jiang YU, Xiangjun ZENG, Kun YU, Zhanlei LIU, and li LI

基于功角聚类分析的配电网选线保护方法

史泽兵¹, 丁晓兵¹, 余江¹, 曾祥君², 喻锐², 刘战磊², 李理²

(1. 南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510530; 2. 长沙理工大学智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:针对当前配电网保护技术选线准确率较低的问题, 提出基于功角聚类分析的配电网选线保护方法。采集每条馈线在不同运行状态下的多种故障特征量, 组成历史数据库, 通过模糊聚类分析得到故障类与非故障类的聚类中心。提取每条馈线的故障特征实时数据, 组成待测特征样本, 采用功角相似度分析待测特征样本与历史特征样本之间的相似程度, 将待测样本划归到故障类或者非故障类, 实现配电网故障馈线的准确选择。利用 PSCAD 仿真软件对所提保护方法的有效性进行验证, 仿真结果表明: 所提方法可有效消除单一故障特征受外部干扰造成的选线误判的影响, 选线过程无需设定整定值, 能够准确实现小电流接地系统的故障选线。

关键词:配电网; 单相接地故障; 模糊聚类; 功角相似度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.004 中图分类号: TM771 文章编号: 1673-9140(2020)03-0029-07

A method of line selection protection based on power angle fuzzy clustering analysis

SHI Zebing¹, DING Xiaobing¹, YU Jiang¹, ZENG Xiangjun², YU Kun², LIU Zhanlei², LI li²

(1. CSG Power Dispatching Control Center, Guangzhou, 510530, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the problem of low accuracy of current line selection technology in distribution network protection, A method of line selection protection based on power angle clustering analysis is proposed in this paper. A variety of fault characteristics of each feeder under different operation conditions are collected, and the historical database is formed. Through fuzzy clustering analysis, the clustering centers of fault and non-fault classes are obtained. The real-time data of each feeder is collected to form the characteristic samples to be tested. The power angle similarity is used to analyze the similarity between the characteristic samples to be tested and the historical characteristic samples, and the samples to be tested are classified into fault or non fault categories, so as to realize the accurate selection of fault feeders in distribution network. The effectiveness of the proposed protection method is verified by PSCAD. The simulation results shows that the misjudgment of single fault feature caused by external interference can be effectively eliminated by the proposed method. No need to set the setting value during the line selection process, which can accurately realize the fault line selection of the small current grounding system.

Key words: distribution network; single phase-to-ground; fuzzy clustering; power angle similarity

收稿日期: 2020-03-11; 修回日期: 2020-04-24

基金项目: 南方电网有限责任公司科技项目(ZDKJXM20180099); 国家自然科学基金重点项目(51737002)

通信作者: 曾祥君(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长江学者, 主要从事电力系统保护与控制研究; E-mail: eexjzeng@qq.com

当前国内外配电网主要采用小电流接地方式^[1-3],当线路发生单相接地故障后,接地故障电流值较小^[4],故障特征参数难以准确检测,加之负荷的谐波干扰、现场外部环境干扰以及故障选线方案自身存在缺陷等其他因素影响,现有故障选线方案在实际运行中效果并不理想,因此小电流接地系统单相接地故障选线问题一直是电力行业研究的重点问题^[5-7]。

当前配电网选线方案可以划分为三大类。第1类是基于稳态故障特征量的保护方案,在单相接地故障发生后,根据故障馈线与非故障馈线的稳态零序电流的差异进行故障选线,主要方法包括残流增量法^[8]、负序电流法^[9]等。第2类是基于暂态故障特征量的保护方案^[10-12],与基于稳态故障特征量的保护方法相比,在有效频带内具有更加明显的故障信息,可以有效提高故障判断的正确率^[13]。然而,由于这类方法一般需要借助小波包分解^[14-16]等数学方法提取特定频带中的故障特征信息,在这个处理过程中极易造成故障特征信息丢失。第3类是基于注入信号的接地故障选线方法,向配电网中输入一个特征信号,并实时检测输入信号在线路中的流动情况实现故障选线,如注入变频信号法。但此类方法需要在原配电网的基础上增设额外的设备,且谐波信号对注入信号的干扰作用也将影响选线结果。

传统的故障保护方法大多基于单一故障特征量,偶然因素容易对选线结果造成影响从而降低选线的准确性。为提高故障选线的准确性,该文运用模糊聚类算法对故障特征量进行综合处理,有效融合多种故障特征,实现各特征量之间的优势互补,有效减少偶然因素造成的选线误判。故障发生后实时检测各馈线的相关特征量构成待测数据,通过功角相似度判断各馈线故障状态,最终实现故障准确选线。

1 基于功角聚类分析的配电网选线原理

1.1 历史特征样本集构建与划分

谐振接地系统发生单相接地故障时,非故障馈线中与故障相关的各特征量近似相同,而故障馈线与非故障馈线间存在较大的差异。聚类分析是以相似为基础对数据进行分类的处理方法,其聚类结果

反应的是不同信号在数值方面的差异。因此通过对比故障时馈线的特征量数据与原始数据之间的差异性,即可实现对馈线故障状态的识别。

首先需对配电网馈线的历史数据进行采集及处理。为了提高保护方法的适用性,通过现有线路测量设备采集 n 种运行状态下被保护馈线的 s 种故障特征量,定义为 n 个历史特征样本,第 k 个样本:

$$\mathbf{x}'_k = (x'_{k1}, x'_{k2}, \dots, x'_{ks})^T \quad (1)$$

式中 k 为整数,取值区间为 $[1, n]$; x'_{k1}, \dots, x'_{ks} 分别为第 k 种运行工况下提取的 s 个故障特征量的具体值。

考虑到不同运行工况下选取的各特征量在数值上存在较大差异,需要对得到的不同运行工况下的故障特征量具体值进行数据标准化处理:

$$x_{kj} = \frac{x'_{kj} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x'_{kj}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \left(x'_{kj} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x'_{kj} \right)^2}} \quad (2)$$

式中 j 的取值区间为 $[1, s]$ 。经标准化处理后,第 k 个样本为 $\mathbf{x}_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{ks})^T$, 标准化处理后的历史数据库为 $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$ 。采用同样的方法,可得到配电网实际运行状态下被保护馈线的实时特征样本 $\mathbf{x}_g = (x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{gs})^T$, x_{g1}, \dots, x_{gs} 分别为被保护馈线实时提取的 s 个故障特征量标准化处理后的具体值。

对标准化处理后的历史数据样本 $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n$ 进行模糊聚类分析,样本被划分为故障类与非故障类,求取故障类及非故障聚类中心。设目标函数为

$$J = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^p (u_{ik})^2 \|\mathbf{x}_k - \mathbf{c}_i\|^2 \quad (3)$$

式中 p 为聚类类别的数量,此处只需得到故障类与非故障类,因此 $p=2$; \mathbf{c}_1 为故障聚类中心, \mathbf{c}_2 为非故障聚类中心; u_{ik} 表示聚类样本 \mathbf{x}_k 从属于 i 种聚类类型的隶属度,满足条件 $\sum_{i=1}^p u_{ik} = 1$ 。聚类中心与样本从属于聚类类型的隶属度,由式(4)、(5)进行计算:

$$\mathbf{c}_i = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^2 \mathbf{x}_k}{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^2} \quad (4)$$

$$u_{ik} = \frac{(1/\|x_k - c_i\|^2)}{\sum_{i=1}^p (1/\|x_k - c_i\|^2)} \quad (5)$$

第 1 次迭代时可对聚类中心 c_i 进行随机赋值,通过 u_{ik} 与 c_i 的相互迭代对目标函数进行优化。当 $\max |u_{ik}^{t+1} - u_{ik}^t| < \lambda$ 时认为得到的聚类中心对原始数据的聚类效果满足需求,其中 λ 为迭代停止阈值, u_{ik}^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代得到的隶属度。

通过对多种运行工况下故障特征量的提取,能够有效应对不同故障条件下多种故障特征量呈现的增强或减弱导致的单一特征量选线方法误判的影响,提高保护可靠性。

1.2 功角相似度选线方法

配电网系统故障选线的本质即为对被保护线路故障与非故障状态的识别。对于馈线保护来讲,只需判断被保护线路是否发生故障,即只需识别出故障与非故障 2 种状态即可。通过检测馈线的实时数据构成被保护馈线的实时特征样本 x_g , 将保护馈线的实时特征样本与历史数据划分的故障类与非故障类进行对比,根据相似性测度即可实现被保护馈线的状态划分。

选取 s 个故障特征量构成的特征样本,可以视为 s 维空间内的一点。对历史数据进行聚类处理后,故障类与非故障类可视为多维空间内以聚类中心为圆心的球。因此,提出功角相似性度量判据,即根据被保护馈线与聚类中心之间的功角判断故障状态。选线原理如图 1 所示,其中 θ'_{g1} 与 θ'_{g2} 分别是被保护馈线的实时特征样本 x_g 与故障类聚类中心、非故障类聚类中心的夹角。当被保护馈线的实时特征样本 x_g 越靠近故障类聚类中心时 θ'_{g1} 越小,对应的功角越大。

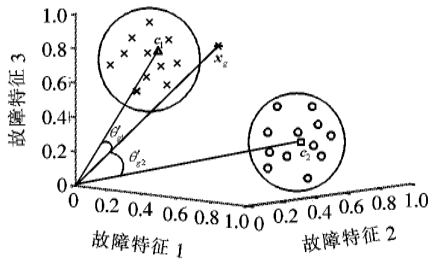


图 1 功角相似度选线原理

Figure 1 Principle of line selection based on power angle similarity

待测样本 x_g 与第 i 类聚类中心 c_i 之间的功角:

$$\cos \theta'_{gi} = \frac{\sum_{b=1}^s x_{gb} c_{ib}}{\sqrt{\sum_{b=1}^s x_{gb}^2 \sum_{b=1}^s c_{ib}^2}} \quad (6)$$

式中 $\cos \theta'_{g1}$ 表示待测样本 x_g 与故障类中心的功角; $\cos \theta'_{g2}$ 表示待测样本 x_g 与非故障类中心的功角。

由于当故障聚类中心与非故障聚类中心连线过空间原点时,直接使用功角会出现被保护馈线类别无法识别的特殊情况,因此需要对式(6)所示的功角计算方法进行修正。修正后的功角计算方法如式(7)所示:

$$\cos \theta_{gi} = \frac{\sum_{b=1}^s (x_{gb} - \bar{c}_b) (c_{ib} - \bar{c}_b)}{\sqrt{\sum_{b=1}^s (x_{gb} - \bar{c}_b)^2} \sqrt{\sum_{b=1}^s (c_{ib} - \bar{c}_b)^2}} \quad (7)$$

式中 \bar{c}_b 为所有聚类中心第 b 项的均值。通过将样本中的对应项减去聚类中心对应项的均值对多维空间的原点进行训练,同时将选取的故障特征量的数值作为被保护馈线状态识别的参考量,消除了仅考虑夹角时对特征量数值不敏感的影响。

定义故障测度:

$$\delta_{g1} = \frac{\cos \theta_{g1} + 1}{\cos \theta_{g1} + \cos \theta_{g2} + 2} \quad (8)$$

非故障测度:

$$\delta_{g2} = \frac{\cos \theta_{g2} + 1}{\cos \theta_{g1} + \cos \theta_{g2} + 2} \quad (9)$$

若 $\delta_{g1} < \delta_{g2}$,则表示实时特征样本数据属于非故障类,被保护馈线未发生故障;若 $\delta_{g1} > \delta_{g2}$,则被保护馈线发生故障。配网故障时每条线路提取的待测样本均可计算与各聚类中心的角度相似度,综合各馈线的故障信息即可实现配网故障的准确选线,提高系统供电可靠性。

2 配电网故障选线方案

基于上述原理,提出配电网故障选线保护方法实现方案如图 2 所示,故障馈线判断步骤:

1)提取多种运行状态下的历史特征样本 x'_k , 进行标准化处理后得到 x_k ;

2)通过模糊聚类算法对历史样本进行分类,得到聚类中心 c_i ;

3)实时监测配电网零序电压值,一旦系统零序电压超过预设的阈值 $U_{set} = 10\% E_\varphi$, E_φ 为系统相电压值,则立刻启动选线方案;

4)从被保护馈线中采集实时数据,提取 s 种故障特征量组成实时特征样本 x'_g ;

5)对待测样本 x'_g 进行标准化处理得到 x_g , 计算待测样本与故障类聚类中心、非故障类聚类中心的角度相似度 δ_{g1} 、 δ_{g2} ;

6)若 $\delta_{g1} > \delta_{g2}$, 则被保护馈线发生故障,并将该实时特征样本归入故障类历史样本集,返回 3); 若 $\delta_{g1} < \delta_{g2}$, 则被保护馈线未发生故障,将该实时特征样本归入故障类历史样本集,返回步骤 3);

对每条馈线都进行上述判断,则可选出故障馈线,完成馈线保护方案。

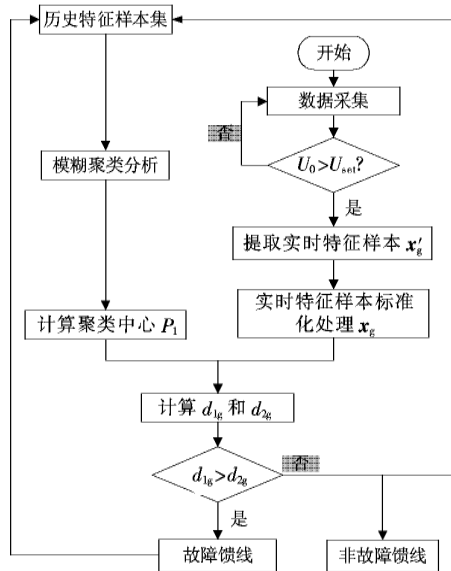


图 2 馈线保护流程

Figure 2 Feeder protection flow chart

3 仿真与实验分析

3.1 仿真实验

在 PSCAD 仿真环境中搭建如图 3 所示的 35 kV 配电网模型,系统包括 3 条架空线及 1 条电缆线路,线路具体参数如表 1 所示。

在线路首端的 FTU 中对被保护馈线的数据进行采集,从采集到的故障信息中提取故障特征量,故

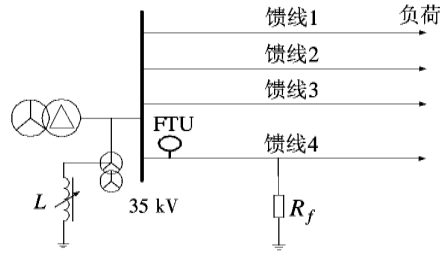


图 3 配电网仿真拓扑

Figure 3 Distribution network simulation topology

表 1 35 kV 配网系统线路参数

Table 1 Line parameters of 35kV distribution system

馈线	长度/ km	每相对地 电容/ μF	相间电 容/ μF	阻尼率/ %	负荷/ (kV·A)	功率 因数
1	30	0.15	0.038	4	2 000	0.8
2	100	0.50	0.125	4	10 000	0.8
3	30	1.80	0.720	3	2 000	0.8
4	20	0.10	0.025	4	1 000	0.8

障特征量依次为线路首端测量装置测量的电压电流相位差 (x_{k1})、负序电流 (x_{k2})、零序电流 (x_{k3}) 及接地故障电阻 (x_{k4})。

在上述配网参数设置基础上模拟 16 种系统故障状态,其中外部故障为馈线 4 以外的线路发生故障时,馈线 4 首端检测装置测量到的数据共 8 组;内部故障为馈线 4 发生接地故障时,馈线 4 首端检测装置测量到的数据,同样为 8 组,分别提取故障特征量,数据如表 2 所示。

由表 2 数据,分别对比内部故障与外部故障对应的 8 组数据。在不同运行工况下,同一故障特征量会存在较大差异,为防止不同运行工况下提取对的数据对结果造成误判,首先需要根据如式(2)所示的数据标准化处理方法对原始数据进行处理,将多种运行工况下的同一故障特征量转换为统一基准下的值。根据处理后的数据,使用式(3)~(5)进行迭代计算故障聚类中心与非故障聚类中心,仿真中迭代停止阈值 $\lambda = 1.0 \times 10^{-5}$,计算结果如表 3 所示。

分别在馈线 4 以及其他馈线上模拟单相接地故障,对所提功角聚类分析的配电网选线保护方法进行验证。模拟 4 种系统故障状态,通过馈线 4 首端检测装置对故障特征量进行提取并构成被保护馈线的实时特征样本列于表 4。其中馈线 4 本身故障时记录为内部故障,分别用 x'_{18} 、 x'_{19} 表示。

表 2 系统历史特征样本集

Table 2 Distribution system history feature sample set

故障类型	历史特征样本	故障特征量			
		$x'_{k1}/(^{\circ})$	x'_{k2}/A	x'_{k3}/A	x'_{k4}/Ω
外部故障	x'_1	65	0.878	0.682	69 173
	x'_2	66	0.601	0.735	74 327
	x'_3	66	0.583	0.637	74 524
	x'_4	68	0.448	0.694	92 530
	x'_5	68	0.442	0.611	93 103
	x'_6	68	0.276	0.474	33 167
	x'_7	68	0.285	0.420	33 752
	x'_8	70	0.147	0.327	40 697
内部故障	x'_9	165	15.77	14.54	4.3
	x'_{10}	163	11.25	10.69	98.4
	x'_{11}	163	10.55	9.67	113.1
	x'_{12}	161	8.87	6.35	976.3
	x'_{13}	160	8.34	8.01	1 034.2
	x'_{14}	159	4.76	4.52	4 982.6
	x'_{15}	158	4.72	3.96	5 212.4
	x'_{16}	157	2.93	2.43	9 854.6

表 3 历史数据的聚类中心坐标

Table 3 Cluster center coordinates of historical feature sample set

聚类中心	坐标值			
c_1	0.966	0.917	0.903	-0.870
c_2	-0.879	-0.796	-0.758	0.804

表 4 馈线实时特征样本数据

Table 4 Real time characteristic sample data of feeders

故障类型	样本	故障特征量			
		$x'_{k1}/(^{\circ})$	x'_{k2}/A	x'_{k3}/A	x'_{k4}/Ω
外部故障	x'_{16}	58	0.992	1.735	44 858
	x'_{17}	77	0.433	0.835	51 356
内部故障	x'_{18}	288	4.310	3.780	4 863
	x'_{19}	276	0.940	1.450	13 057

纵向比较表 4 中的零序电流(x_{k3}),外部故障 x'_{16} 对应的零序电流为 1.735 A,而内部故障 x'_{19} 对应的零序电流为 1.45 A,传统仅适用单一零序电流作为选线判据时将会对故障线路出现误判,难以保证配电网运行可靠性。

使用所提的功角判据对馈线 4 提取到的故障特征量进行分析,通过式(7)~(9)得到 4 种情况下的

故障测度与非故障测度,并得出馈线 4 的保护判断结果列于表 5。

由表 5 数据可以看出,当馈线 4 发生故障时故障测度大于非故障测度,能准确判断馈线 4 发生故障;其它馈线发生故障时,故障测度小于非故障测度,则判断馈线 4 未发生故障。表 5 结果与表 4 的故障假设一致,验证了该文所提选线保护方法的可行性,能够有效避免使用单一故障特征作为选线判据时偶然因素导致的选线结果错误。其它馈线依然可根据此方法进行选线判断,最终可准确判断故障馈线,为后续正确的故障处理提供必要的参考。

表 5 馈线 4 故障选线结果

Table 5 Fault line selection result of feeder 4

样本	δ_{g1}	δ_{g2}	保护判断结果	
x'_{16}	0.041	0.959	$\delta_{g1} < \delta_{g2}$	未故障
x'_{17}	0.005	0.995	$\delta_{g1} < \delta_{g2}$	未故障
x'_{18}	0.987	0.013	$\delta_{g1} > \delta_{g2}$	故障
x'_{19}	0.611	0.389	$\delta_{g1} > \delta_{g2}$	故障

3.2 实验验证

根据实际配电网线路参数在 10 kV 真型配电网实验室中进行接地故障模拟选线实验,该实验室 10 kV 母线有 3 回出线,系统中性点采用谐振接地方式,脱谐度为 10%。实验室一次接线如图 4 所示。

分别在不同线路上设置了不同类型的接地故障,测量不同线路发生故障时线路 3 首端的电压电流相位差(x_{k1})、负序电流(x_{k2})、零序电流(x_{k3})及接地故障电阻(x_{k4})组成历史样本集进行模糊聚类分析,得到的聚类中心如表 6 所示。

在线路 3 上设置 7 000 Ω 高阻接地故障对所提选线方法进行验证,线路 3 首端实测零序电流波形如图 5 所示。

在采集到的故障信息中对故障特征量进行提取,如表 7 所示。

将实测数据按照文中前述方法进行处理,得到馈线 3 在 7 000 Ω 高阻接地故障时的故障测度与非故障测度分别为 0.781 和 0.219,根据选线判据可以准确判断线路 3 发生故障。使用该文所提方法对线路故障状态进行判断,所得结果与实际实验设置故障线路一致,进一步验证所提方法的准确性。

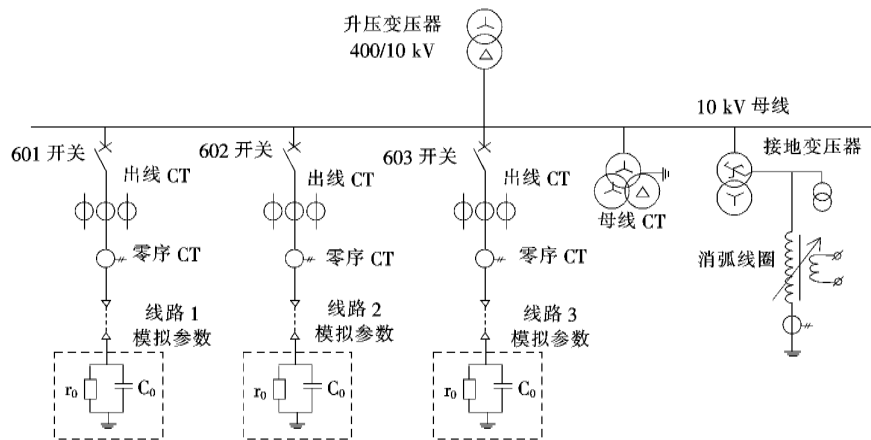


图 4 实验室一次接线

Figure 4 Primary connection diagram of laboratory

表 6 历史数据的聚类中心坐标

Table 6 Cluster center coordinates of historical feature sample set

聚类中心	坐标值			
c_1	0.941	0.895	0.694	-0.904
c_2	-0.795	-0.748	-0.643	0.698

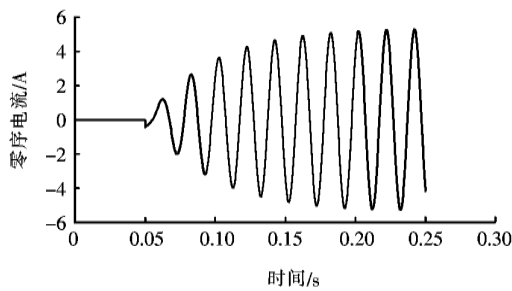


图 5 7 000 Ω 高阻接地故障线路 3 零序电流波形

Figure 5 Zero sequence current of line 3 of 7000 Ω high resistance ground fault

表 7 馈线 3 实时特征样本数据

Table 7 Real time characteristic sample data of feeder 3

故障样本	故障特征量			
	$x'_{k1} / (^\circ)$	x'_{k2} / A	x'_{k3} / A	x'_{k4} / Ω
x'_{20}	91.31	0.41	3.77	6 843

4 结语

该文提出一种基于功角聚类分析的小电流接地系统故障选线方法,利用功角相似度分析待测特征样本与历史特征样本之间的相似程度,从而构建故障测度与非故障测度。根据对待测样本故障测度的

描述,将待测样本划归到故障类或者非故障类。经 PSCAD 仿真验证与实验实测,该选线方法能够准确识别故障样本,实现故障选线,同时有效避免使用单一故障特征作为选线判据时偶然因素导致的选线结果错误。

1)选线过程无需进行保护定值整定,避免了传统选线方法面对多种运行工况时保护边界难以整定的困难,选线结果不受系统运行状态的影响,具有较强的适用性。

2)通过融合多种故障特征量,在选线过程受到干扰的情况下,该文方案仍然可以准确地进行选线保护,有效避免单一故障特征量选线时因外界干扰信号导致选线误判。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [2] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利电力出版社,1993.
- [3] 宗伟林,邹运,戴经纬,等. 基于相电流增量的故障区间定位新方法[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(2): 128-134.
- ZONG Weilin, ZOU Yun, DAI Jingwei, et al. Novel method of fault section location based on phase current increment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(2):128-134.
- [4] 姜博,董新洲,施慎行. 配电网单相接地故障选线典型方法实验研究[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):67-74.
- JIANG Bo,DONG Xinzhou,SHI Shenxing. Experimen-

- tal research on typical single-phase grounding line selection methods of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 67-74.
- [5] 张健, 王奕, 曾祥君, 等. 基于多端行波到达时差的配电网故障选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 51-57.
- ZHANG Jian, WANG Yi, ZENG Xiangjun, et al. A novel fault line detection method with the time difference of multi-terminal detected traveling waves for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 51-57.
- [6] 曾祥君, 王媛媛, 李健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 137-143.
- ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-143.
- [7] 方毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5636-5645+5921.
- FANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5636-5645+5921.
- [8] 曾祥君, 邓丰, 李泽文, 等. 基于信息融合的故障行波定位网络算法[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(1): 38-44.
- ZENG Xiangjun, DENG Feng, LI Zengwen, et al. Novel network based traveling wave location algorithm with information fusion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(1): 38-44.
- [9] 陈锐, 周丰, 翁洪杰, 等. 基于双闭环控制的柔性接地装置消弧方法[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(4): 63-70.
- CHEN Rui, ZHOU Feng, WENG Hongjie, et al. Flexible grounding device with the dual-loop control method for arc suppression[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(4): 63-70.
- [10] 陈豪威, 王媛媛, 唐夏菲, 等. 基于S变换暂态能量与方向的无整定配电网选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 71-78.
- CHEN Haowei, WANG Yuanyuan, TANG Xiafei, et al. A new fault line selection method for distribution network system based on transient energy and direction of S-transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 71-78.
- [11] 秦珣, 陈丽安. 基于改进导纳法的小电流接地系统接地故障选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(1): 96-102.
- QIN Xun, CHEN Lian. Improved neutral admittance method based grounding faulted feeder detection for power system with small current earthing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(1): 96-102.
- [12] 张淑清, 马跃, 李盼, 等. 基于改进的广义谐波小波包分解和混沌振子的小电流接地系统故障选线[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 13-20+43.
- ZHANG Shuqing, MA yue, LI Pan, et al. Application of improved generalized harmonic wavelet packet decomposition and chaos oscillator to fault line detection in small current grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 13-20+43.
- [13] 张艳霞, 王清亮. 应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 76-80.
- ZHANG Yanxia, WANG Qingliang. New method for single-phase-to-ground fault feeder selection based on analysis of fault transient characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 76-80.
- [14] 汤涛, 黄纯, 江亚群, 等. 基于馈线零序阻抗特性的谐振接地故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 192-201.
- TANG Tao, HUANG Chun, JIANG Yaquin, et al. A method of fault Line selection in resonant earthed system based on zero sequence impedance characteristic of lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 192-201.
- [15] 曾祥君, 王媛媛, 庞方亮, 等. 基于故障电阻测量的小电流接地系统保护方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 26-30.
- ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, PANG Fangliang, et al. Grounding fault protection based on fault resistance measurement for ineffectively earthed distribution systems[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 26-30.
- [16] 陈景文, 褚恩亮, 李英春, 等. 基于贝叶斯分类器的谐振接地故障选线系统设计[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 99-104+119.
- CHEN Jingwen, CHU Enliang, LI Yingchun, et al. Design of resonant ground fault line selection system based on bayesian classifier[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 99-104+119.