

文章编号:1007-757X(2022)05-0100-04

使用智能电表实现配电网高阻抗故障的检测与定位

刘型志^{1,3}, 田娟^{1,3}, 李松浓^{2,3}, 刘畅^{1,3}, 黄可^{1,3}

(1. 国网重庆市电力公司营销服务中心, 重庆 400023; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401120; 3. 能源互联网先进计量与检测技术重庆市重点实验室, 重庆 401120)

摘要: 为了进一步促进配电网的高效、稳健运行, 提出一种基于智能电表的配电网高阻抗故障的检测与定位方法。构建配电网高阻抗故障参数驱动模型, 结合阻尼能量特征分析方法重建配电网高阻抗故障的数据, 并分析故障分布特征量。采用智能电表进行配电网高阻抗的直流调制参数, 通过直流额定有功功率补偿方法进行配电网高阻抗故障特征提取。结合机器学习算法对提取的配电网高阻抗故障特征量进行自适应学习的特征分类, 在智能电表中实现配电网高阻抗故障特征融合和属性分类识别。最后通过优化的学习算法和故障特征聚类分析算法实现配电网高阻抗故障的优化检测 and 智能定位。仿真结果表明该方法对配电网高阻抗故障检测定位的精度较高, 证明了该方法的有效性。

关键词: 智能电表; 配电网; 高阻抗设备; 故障检测

中图分类号: TM73

文献标志码: A

Detection and Location of High Impedance Faults in Distribution Network by Using Smart Meters

LIU Xingzhi^{1,3}, TIAN Juan^{1,3}, LI Songnong^{2,3}, LIU Chang^{1,3}, HUANG Ke^{1,3}(1. Marketing Service Center of State Grid Chongqing Electric Power Co. Ltd., Chongqing 400023, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Co. Ltd., Chongqing 401120, China
3. Chongqing Key Laboratory of Advanced Measurement and Testing Technology for Energy Internet, Chongqing 401120, China)

Abstract: In order to further promote the efficient and steady operation of distribution network, this paper proposes a detection and location method of high impedance fault of distribution network based on smart electricity meter. A distribution network high impedance fault parameter driving model is constructed. Combined with the damping energy characteristic analysis method, the data of distribution network high impedance fault are reconstructed, and the characteristic quantity of fault distribution is analyzed. DC modulation parameters of high impedance of distribution network are carried out by intelligent electricity meters, and fault characteristics of high impedance of distribution network are extracted by DC rated active power compensation method. Combined with the machine learning algorithm, the high impedance fault features extracted from the distribution network are classified by adaptive learning, and the high impedance fault features fusion and attribute classification recognition are realized in the smart electricity meter. Then the optimized detection and intelligent location of high impedance faults in distribution network are realized by the optimized learning algorithm and fault feature clustering analysis algorithm. The simulation results show that this method has high accuracy in fault detection and location of high impedance in distribution network, which proves the effectiveness of this method.

Key words: smart meters; distribution network; high impedance equipment; fault detection

0 引言

随着配电网建设的发展, 配电网中的高阻抗设备分布越来越多。然而, 在严峻的工况条件下, 配电网高阻抗设备长期工作容易出现配电网高阻抗故障^[1]。因此, 需要建立配电

网高阻抗设备的检测模型, 结合对配电网高阻抗设备的故障特征提取技术实现故障特征融合和信息检测, 从而提高配电网高阻抗设备的稳定性、维护配电网的文件运行^[2]。而相关的配电网高阻抗故障检测和特征提取方法研究受到了相关领域的极大关注。

作者简介: 刘型志(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能计量技术;

田娟(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能计量技术;

李松浓(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能传感与量测技术;

刘畅(1983—), 女, 本科, 工程师, 研究方向为电能计量技术;

黄可(1987—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电能计量技术。

一般来说,对配电网高阻抗故障检测和定位是建立在对配电网高阻抗的故障分布式特征提取和大数据信息融合基础上的,通过构建配电网高阻抗设备的故障信息融合模型,结合特征优化辨识方法完成配电网高阻抗设备的故障特征信息融合和检测,可有效提高配电网高阻抗设备的故障信息分析和检测能力。目前,常用于配电网高阻抗设备的故障检测和定位的方法主要有光谱特征提取方法、统计特征提取方法、自相关特征分析方法等^[3],此外,基于主频分量相关性的配电网故障定位方法^[4]和基于 FP-Growth 算法的配电网故障定位方法^[5]应用也较为广泛。但应用传统方法进行配电网高阻抗设备的故障检测时抗干扰性不好,导致故障特征定位性能不好。

针对上述问题,本文提出基于智能电表的配电网高阻抗故障的检测与定位方法,利用智能电表实现对配电网高阻抗故障的特征融合和属性分类识别。最后进行仿真测试分析,证明了本文方法在提高配电网高阻抗故障的检测与定位能力方面的优越性能。

1 故障检测总体设计

为了实现基于智能电表的配电网高阻抗故障的检测与定位,首先需实现对配电网高阻抗故障的诊断。通过提取配电网高阻抗故障信息,结合特征信息预处理方法建立配电网高阻抗故障特征提取和选择模型,再通过模糊分类决策完成对配电网高阻抗故障特征的分类和优化训练^[6]。上述过程的结构框如图 1 所示。

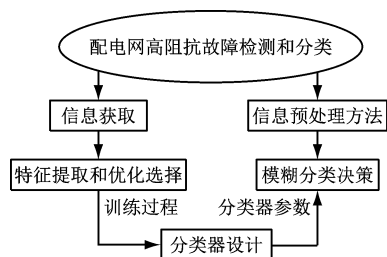


图 1 配电网高阻抗故障检测定位过程结构

在如图 1 所示的配电网高阻抗故障检测定位结构图中,在分析配电网的阻抗故障参数的基础上,建立故障参数驱动模型,然后采用阻尼能量特征分析方法重建配电网高阻抗故障的数据^[7],并分析配电网高阻抗的故障分布特征量,通过模糊化信息匹配和模糊推理技术实现信息组合,从而有效提高配电网高阻抗故障定位能力。故障特征信息处理模型结构如图 2 所示。

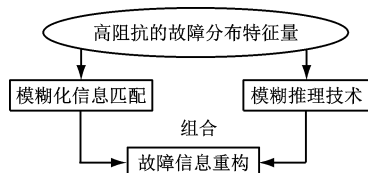


图 2 配电网高阻抗故障特征信息处理模型

根据图 1、图 2 所示的总体结构模型和故障信息处理模型检测配电网高阻抗故障并完成信息重构,在此基础上,采用暂态能量信息重构的方法分析配电网高阻抗故障的协同

特征,并完成故障挖掘^[8],继而可构建配电网高阻抗故障性检测统计特征量如下:

$$M = p(t) \times c_i \quad (1)$$

式中, c_i 代表配电网高阻抗故障样本的特征匹配集, $p(t)$ 代表配电网的超低频振荡模型。根据高阻抗故障性检测统计特征量,得到配电网高阻抗故障样本的直流信息输出如下:

$$d(y) = \frac{(c_i + 1) \times p}{M} \quad (2)$$

式中, p 代表数据相关性特征。针对式中得到的故障样本的直流信息进行重构处理,为后续的故障信息挖掘、检测和定位提供基础条件。

2 故障信息挖掘

在完成故障检测总体设计的基础上,分析配电网高阻抗的故障分布特征量,采用智能电表调制配电网高阻抗的直流参数,并通过直流额定有功功率补偿方法提取配电网高阻抗故障特征^[9],从而得到配电网高阻抗故障关联暂态能量 V ,然后分析配电网高阻抗设备的稳定域边界特征量,得到统计特征值如下:

$$L = d(y) + \theta \left(\frac{V \times U}{t_g - t_0} \right) \quad (3)$$

式中, t_0 和 t_g 分别代表配电网高阻抗故障数据的初始采样时间间隔和终止采样时间间隔, θ 代表配电网高阻抗相角, V 代表配电网高阻抗电压。然后采用多维尺度降维方法计算配电网高阻抗电压输出增益,分析系统振荡衰减,得到配电网高阻抗故障样本数据的挖掘输出如下:

$$G(t) = d(y) + \frac{U + \theta}{L} \quad (4)$$

当系统频率振荡偏差在死区范围内时,得到配电网高阻抗的动态特征匹配结果为

$$Q = \text{sgn } a_n + G(t)c_i \quad (5)$$

式中, a_n 代表配电网高阻抗设备的能量变化量。在此基础上,根据直流调制量确定配电网高阻抗故障的关联规则^[10],从而实现故障样本挖掘和故障识别分析。故障样本聚类分析模型如图 3 所示。

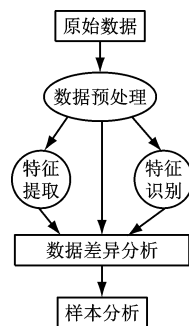


图 3 故障样本聚类分析模型

3 高阻抗故障检测定位

3.1 故障特征提取

在高阻抗故障检测定位前,需对故障样本中的故障信息展开特征提取。采用智能电表调制配电网高阻抗的直流参

数,再通过直流额定有功功率补偿方法提取配电网高阻抗故障特征。

假设存在 p 个分布式电气设备故障目标点, $A_j(L)$ 为配电网高阻抗故障聚类中心,其中 $j=1,2,\dots,k,\dots$,则配电网高阻抗故障数据的相干特征分布集如下:

$$Z_p = A_j(L) + Q[G(t) + a_n] \quad (6)$$

假设配电网高阻抗故障的演化信息聚类分析模型为 $s(t)$,自相关特征匹配矢量为 $n(t)$,二者之间相互独立,则可采用模糊推理的方法得到配电网高阻抗故障数据的自相关特征分布矢量 $z(t)$ 的协方差矩阵如下:

$$H_z(y) = \sum_{t=0} z(t) + \{s(t) + n(t)\} \times B \quad (7)$$

式中, B 代表直流线路中的最大可控功率,在配电网高阻抗故障演化聚类集中,采用功率偏差稳定性调节的方法^[11-12],得到配电网高阻抗故障特征分布模型为

$$R = \frac{U_s + U_n}{Q} \sum a_n + G(t) \quad (8)$$

式中,矩阵 U_s 和 U_n 代表配电网高阻抗故障信号列矢量,分析 l 条直流的控制敏感点 σ_l ,并故障特征点信息强度按下列顺序排列: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq \dots > \sigma_l$,然后通过子空间模型辨识的方法完成对故障特征的提取和挖掘,提高故障故障检测能力。

3.2 基于智能电表故障定位

假设配电网高阻抗故障特征数据中包含有限元数据组 (E_i, E_j, d, t) 的关联关系,通过子空间模型辨识得到故障特征分布属性 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$,配电网高阻抗故障特征分布的幅值为 D ,故障信息融合的特征状态为

$$E = \frac{A}{s(t) + n(t)} + \frac{R}{A_j(L)} \quad (9)$$

对输入输出的 Hankel 数据进行信息辨识^[13-14],并在智能电表中完成故障检测。假设配电网高阻抗故障特征定位

的统计序列为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$,对配电网高阻抗故障特征进行概率分布式融合,得到融合特征量如下:

$$f = E \times |U_s + U_n| \times \sum_{t=1} G(t) \quad (10)$$

通过智能电表进行信息重组,得到配电网高阻抗故障信息参数估计值为 $p(x_0)$,根据新的状态变量进行故障挖掘^[15],得到故障定位的优化目标函数表示为

$$\alpha = p(x_0)\epsilon + \left(\phi f + \frac{R}{E}\right) \quad (11)$$

式中, ϕ 代表配电网高阻抗故障定位的特征参数集, ϵ 代表配电网高阻抗故障检测定位系统的状态空间函数。继而可通过智能电表检测方法得到故障检测定位的节点优化部署模型为

$$M = l(t) + \alpha \times \sum_{t=1} z(t) \quad (12)$$

式中, $l(t)$ 代表故障输出波束输出。在此基础上,通过优化的学习算法和故障特征聚类分析算法,实现配电网高阻抗故障的优化检测和智能定位,过程如下:

$$W = \frac{\alpha M}{g(T)} \quad (13)$$

综上所述,实现了对配电网高阻抗故障的检测与定位。

4 仿真实验与结果分析

通过仿真实验验证本文方法在实现配电网高阻抗故障检测与定位的应用性能。

仿真实验环境如下:配电网的故障数据采样的节点数为 1 200 个,输出电压的波动幅值为 16 kV,故障特征分布样本数目为 1 024 个,机器学习的迭代步数为 240,步长为 20,直流调制系数为 0.35。

根据上述参数设定,分析配电网在存在高阻抗故障时的有功功率、无功功率、电压幅值和相角等参数检测结果,如图 4 所示。

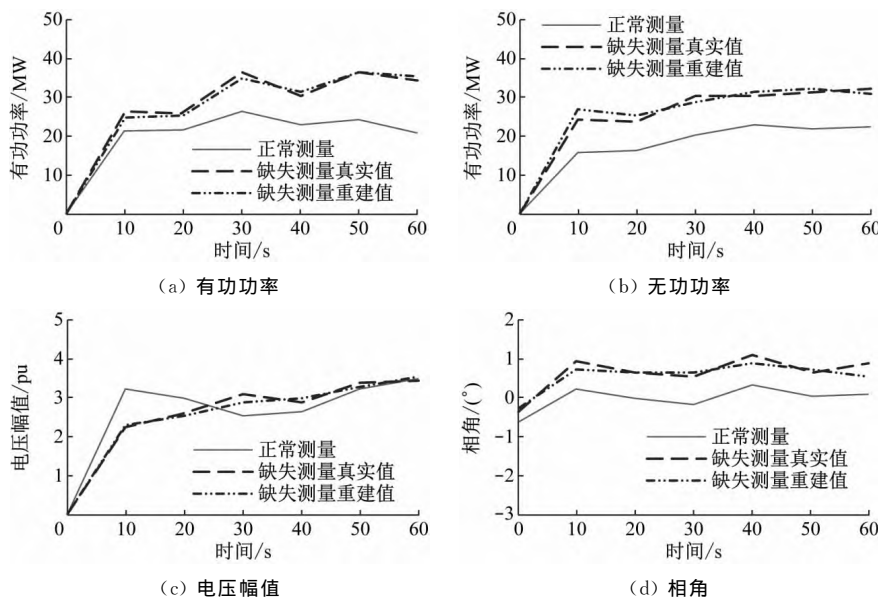


图 4 配电网高阻抗故障检测定位参数识别结果

分析图 4 结果可知,利用智能电表对配电网高阻抗故障检测和定位,能够有效提高对配电网高阻抗性能参数的重建和修正能力,实现对配电网高阻抗故障的优化检测。

在此基础上,利用对比实验的形式,测试本文方法对配电网高阻抗故障的定位检测精度。应用的对比方法分别为传统的基于主频分量相关性的配电网故障定位方法和基于 FP-Growth 算法的配电网故障定位方法,得到对比结果如表 1 所示。

表 1 不同方法对电网高阻抗故障检测定位的精度对比结果

测试次数/ 次	本文 方法	基于主频分量 相关性的方法	基于 FP-Growth 算法的方法
10	0.970	0.873	0.763
20	0.978	0.895	0.788
30	0.981	0.901	0.834
40	0.985	0.913	0.877

分析表 1 结果可知,随着迭代次数的增加,不同方法对配电网高阻抗故障检测与定位的精度也随之发生变化。但相比之下,利用本文方法进行配电网高阻抗故障检测的精度明显更高,其精度始终保持在 0.97 以上。

5 总结

本文利用智能电表设计了一种新的配电网高阻抗故障的检测与定位方法。通过模糊分类决策实现配电网高阻抗故障特征分类和优化训练,再通过直流额定有功功率补偿方法提取配电网高阻抗故障特征,在此基础上,结合模糊推理的方法获取配电网高阻抗故障数据的自相关特征分布。然后再通过故障特征聚类分析算法实现配电网高阻抗故障的优化检测和智能定位。经实验分析可知,该方法对配电网高阻抗故障检测定位的精度较高,证明该方法对故障诊断的性能较好,具有更好的应用前景。

参考文献

- [1] 童晓阳,余森林,温豪.基于正序电流故障分量的输电线路故障检测[J].电力系统自动化,2018,42(24):150-156.
- [2] 高博,张超.直流频变电缆参数测量与故障定位原理[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(4):7-15.
- [3] 王晓卫,高杰,吴磊,等.柔性直流配电网高阻接地故

障检测方法[J].电工技术学报,2019,34(13):2806-2819.

- [4] 方涛,陈豪威,王媛媛,等.基于主频分量相关性的谐振接地配电网故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2018,33(1):88-92.
- [5] 刘思怡,苏运,张焰.基于 FP-Growth 算法的 10 kV 配电网分支线断线故障诊断与定位方法[J].电网技术,2019,43(12):4575-4582.
- [6] 徐铭铭,王鹏,高明春.基于潮流计算的直流配电网单极接地故障定位算法[J].电力系统保护与控制,2018,46(8):103-109.
- [7] 许贤泽,刘静,施元,等.基于 Spark 和梯度提升树模型的短期负荷预测[J].华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(5):84-89.
- [8] 孙谊嫒,李宁,董小顺,等.智能电表可靠性预计的优化模型[J].电力科学与技术学报,2017,32(3):15-21.
- [9] 周步祥,廖敏芳,魏金萧,等.基于 RVM 和阻抗法对串联电容补偿输电线路的故障定位[J].电测与仪表,2019,56(8):9-15.
- [10] 卢诗华,孙密,谢景海,等.一种基于最大相关-最小冗余算法的输电线路故障定位方法[J].电测与仪表,2020,57(3):79-85.
- [11] 张伯明,吴文传,郑太一,等.消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J].电力系统自动化,2011,35(1):1-6.
- [12] 林俐,谢永俊,朱晨宸,等.基于优先顺序法的风电场限出力有功控制策略[J].电网技术,2013,37(4):960-966.
- [13] 田福粮,田秀霞,陈希.基于区块链的智能电表身份认证方案[J].华东师范大学学报(自然科学版),2018(5):135-143.
- [14] 金涛,许立彬,高伟,等.一种基于 LCD-Hilbert 变换和奇异谱熵的配电网暂态过电压类型识别方法[J].电机与控制学报,2018,22(11):26-36.
- [15] 王兆军,朱珂,矫真,等.多基准数据生成器的智能电表平台性能分析[J].计算机工程与设计,2019,40(7):2087-2093.

(收稿日期:2020-09-10)