

基于分形理论与聚类分析的小电阻接地系统 高阻接地保护方法

曹文思¹, 吴 擎¹, 徐铭铭², 牛荣泽²

(1. 华北水利水电大学 电力学院, 河南 郑州 450045; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450002)

摘要:针对目前小电阻接地系统保护由于整定值过大而对高阻接地故障易出现拒动的问题, 基于分形理论和聚类分析提出了高阻接地保护新方法。该方法提取故障线路和非故障线路零序电流的相似性特征, 利用零序电流比值和分形维数对相似度进行量化计算, 构建了接地故障特征矩阵, 采用 K -means 聚类算法对接地故障特征矩阵进行分析, 避免了保护整定困难的问题。经真型实验录波数据验证, 所提方法将保护的耐阻能力提高到 $2000\ \Omega$, 具有一定的应用价值。

关键词:小电阻接地系统; 高阻接地; 分形理论; 相似性; 聚类分析; 继电保护

中图分类号: TM 771

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202002020

0 引言

近年来, 小电阻接地系统在我国发达城市得到了广泛应用, 针对单相接地故障, 国内 10 kV 小电阻接地配电网现场接地保护的整定值较大, 在发生高阻接地故障时易出现拒动情况^[1-3], 故障长时间存在可能引发火灾, 导致设备损伤和人员伤亡等事故^[4], 严重威胁配电网的运行安全。根据国内外学者对小电阻接地系统单相接地故障的研究, 过渡电阻值在 $100\ \Omega$ 以上就认为是高阻接地故障^[5]。目前国内配电网现场零序过电流保护的動作电流一般为 40 A , 适用的过渡电阻值最高为 $130\ \Omega$ 左右^[6]。

近年来, 学者对高阻接地保护技术进行了大量的研究和改进, 但也存在一些问题。文献[7]基于零序功率方向判断是否发生接地故障, 但是发生高阻接地故障时, 零序电流、电压极性检测比较困难。文献[8]提出了基于零序电压制动的零序电流保护, 将接地保护耐电阻能力提高到 $1000\ \Omega$, 但是该方法工程难度较大。文献[9]利用故障线路和任一非故障线路的暂态零序电流与母线暂态零序电压, 计算故障点过渡电阻以识别高阻接地故障。文献[10]利用小波分析方法对故障线路与非故障线路的电压、

电流进行离散小波分解重构, 提取特征系数作为识别高阻故障的判据。文献[9-10]所提方法对硬件要求较高, 且抗干扰能力较弱, 容易发生误判。文献[11]提出利用快速傅里叶变换、小波变换提取故障电流中的各次谐波, 根据谐波电流大小识别高阻接地故障。文献[12]提出采用高灵敏度零序过电流保护和零序电流群体比较法提高保护灵敏度, 但是该方法需配置高精度的零序电流互感器。文献[13]将随机系统检测方法应用于高阻接地故障检测, 实现对系统的保护。另外, 通过信号的多分辨率分析产生的一系列小波系数的绝对值^[14]、人工智能算法^[15]也被应用于高阻接地故障检测。

针对高阻接地故障, 本文对故障线路和非故障线路的零序电流相似度进行聚类分析, 避免零序电流值较小对高阻接地故障识别的影响, 提高了识别高阻接地故障的能力, 并利用真型实验录波数据验证了所提方法的准确性。

1 分形理论

分形几何学已经成为20世纪后期三大非线性理论突破之一, 在接地故障研判技术中得到了应用^[16-17]。已有研究定义了多种分形维数判断分形几何自相似性, 其中, 基于盒维数算法和结构函数算法的分形维数应用成熟, 计算迅速且容易实现, 因此本文选择基于盒维数和结构函数算法的分形维数。

1.1 盒维数

设 A 是 $\mathbf{R}^n$ 空间的任意非空有界子集, 对于任意一个 $r > 0$, $N_r(A)$ 表示覆盖 A 所需的边长为 r 的 n 维立体的最小数目。如果存在一个数 D , 使得当 $r \rightarrow 0$ 时, 有:

$$N_r(A) \propto 1/r^D \quad (1)$$

则称 D 为 A 的盒维数。

收稿日期: 2019-03-10; 修回日期: 2019-12-20

基金项目: 2019年度河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(192102210229); 河南省高等学校重点科研项目(19A-470006); 2019年度河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS104)

Project supported by the Key Scientific and Technological Research Projects of Henan Province(192102210229), the Key Scientific Research Projects Plan of Henan Higher Education Institutions(19A470006) and the Cultivation Plan of Young Backbone Teachers in Colleges and Universities of Henan Province(2019GGJS104)

在实际计算中,可以采用估算法近似计算盒维数。以 $-\ln r$ 为横坐标、 $\ln N_r(A)$ 为纵坐标,在平面直角坐标系中描出点 $(-\ln r, \ln N_r(A))$,采用最小二乘线性回归方法计算分布点的斜率,从而估计出集合 A 的盒维数。

1.2 利用结构函数法计算分形维数

结构函数法将分形几何视为一空间序列 $z(x)$,则具有分形特征的分形几何结构函数满足:

$$S(\tau) = (z(x + \tau) - z(x))^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) [\exp(j\omega\tau) - 1] d\omega = C\tau^{4-2D} \quad (2)$$

其中, $S(\tau)$ 为结构函数测度,表示差方的算术平均值; τ 为数据间隔的任意取值; ω 为工频; $S(\omega)$ 为功率谱密度函数; C 为尺度系数。

对式(2)两边取对数,则其在双对数坐标中为一直线。在实际计算中,针对若干尺度 τ 计算出相应的 $S(\tau)$,在双对数坐标系中得到近似的直线,采用最小二乘线性回归方法计算分布点的斜率 α ,最后计算得到分形维数 D 为:

$$D = 2 - \alpha/2 \quad (3)$$

2 单相接地故障特征分析

2.1 接地故障模型分析

图1为典型小电阻接地系统。图中, C_1 — C_3 分别为线路1—3的每相对地电容; 10 kV 母线通过Z型变压器中性点接地,接地电阻为 R_N ,忽略Z型变压器阻抗^[18-19]。中性点电压即系统母线处零序电压为 U_0 ,电流正方向为由线路流向大地。

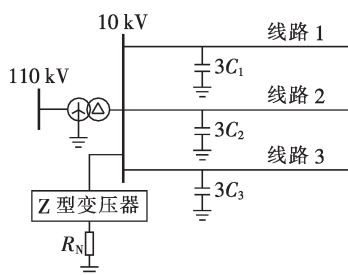


图1 小电阻接地系统

Fig.1 Low resistance grounding system

假设线路3的C相发生单相接地故障,过渡电阻为 R_f ,则零序等效电路如图2所示。图中, $U_f = -U_C$,为故障点虚拟电源; $I_{0i}(i=1,2,3)$ 为线路 i 的零序电流; I_{0f} 为故障点的零序电流; I_{0R_N} 为中性点的零序电流。

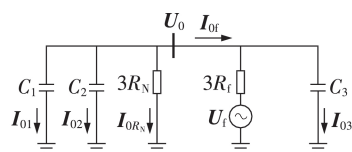


图2 零序等效电路

Fig.2 Zero-sequence equivalent circuit

序电流。

零序阻抗由中性点零序电阻与各条出线的对地零序电容并联得到:

$$Z_0 = \frac{1}{\frac{1}{3R_N} + j\omega \sum_{i=1}^3 C_{0i}} = \frac{3R_N}{1 + 3j\omega R_N C_{0\Sigma}} \quad (4)$$

其中, $C_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^3 C_{0i}$ 为系统对地零序电容, C_{0i} 为线路 i 的对地零序电容。

因此母线处零序电压为:

$$U_0 = U_f \frac{Z_0}{Z_0 + 3R_f} = -U_C \frac{Z_0}{Z_0 + 3R_f} \quad (5)$$

故障后母线三相电压示意图如图3所示。由于母线处中性点存在零序电压 U_0 ,导致母线电压发生偏移,发生接地故障后母线三相电压 U'_A 、 U'_B 、 U'_C 分别为:

$$\begin{cases} U'_A = U_A + U_0 \\ U'_B = U_B + U_0 \\ U'_C = U_C + U_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, U_A 、 U_B 、 U_C 为正常运行时的电网三相电压。

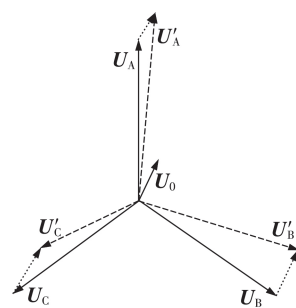


图3 故障后母线三相电压示意图

Fig.3 Schematic diagram of three-phase voltage of bus after fault

(1)线路1为非故障线路,其零序电流等于本线路对地零序电容电流:

$$I_{01} = -j\omega \times 3C_1 (U'_A - U_A) = -j\omega C_1 \times 3U_0 \quad (7)$$

线路2的情况同线路1,即有:

$$I_{02} = -j3\omega C_2 U_0 \quad (8)$$

(2)线路3为故障线路,其零序电流等于所有非故障线路零序电流与中性点低电阻电流之和,即有:

$$I_{03} = -\left(j3\omega C_1 U_0 + j3\omega C_2 U_0 + \frac{U_0}{3R_N} \right) \quad (9)$$

假设 $C_1=C_2=C_3$,由于式(7)~(9)计算的是相量值,因此 I_{01} 和 I_{02} 基本相同,且与 I_{03} 具有较大的差异。

由上述分析可知,各条非故障线路的零序电流基本相同,且与故障线路的零序电流具有较大的差异性。

2.2 零序电流波形分析

基于某真型实验场的接地故障录波数据,对1

个工频周期内的零序电流波形进行分析。

以线路2的C相发生过渡电阻分别为 $1000\ \Omega$ 和 $2000\ \Omega$ 的接地故障以及高阻电弧接地故障的录波数据为例进行分析。图4为过渡电阻为 $1000\ \Omega$ 时各条线路的零序电流,由图可见故障线路2的零序电流值为 $21.5\ \text{A}$;图5为过渡电阻为 $2000\ \Omega$ 时各条线路的零序电流,由图可见故障线路2的零序电流值为 $11.1\ \text{A}$;图6为发生高阻电弧接地故障时各条线路的零序电流,由图可见故障线路2的零序电流值为 $14.7\ \text{A}$ 。现场零序过电流保护动作电流一般为 $40\ \text{A}$,因此零序过电流保护对上述3种高阻接地故障均发生拒动。

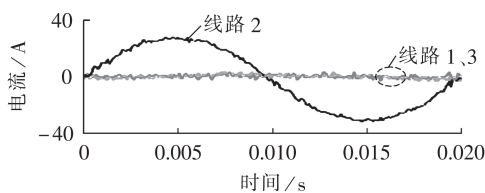


图4 过渡电阻为 $1000\ \Omega$ 时的零序电流波形
Fig.4 Zero-sequence current waveforms when transition resistance is $1000\ \Omega$

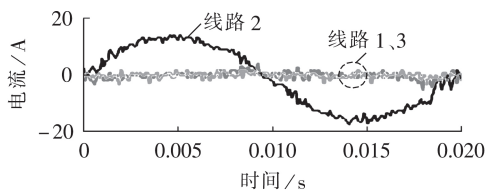


图5 过渡电阻为 $2000\ \Omega$ 时的零序电流波形
Fig.5 Zero-sequence current waveforms when transition resistance is $2000\ \Omega$

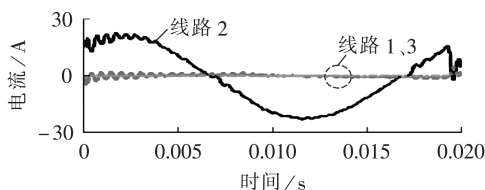


图6 发生高阻电弧接地故障时的零序电流波形
Fig.6 Zero-sequence current waveforms under arc grounding fault with high resistance

发生高阻接地故障时零序电流较小,故障特征不明显,但是根据式(7)—(9)和图4—6进行计算和分析后可知,在发生高阻接地故障时,非故障线路零序电流相似度高,非故障线路与故障线路零序电流相似度低的特征较为明显。因此,可利用零序电流的相似性特征识别高阻接地故障。

2.3 单相接地故障特征量化

针对零序电流相似度的特征,从计算各线路零序电流的分形维数和相对大小这2个方面进行量化计算。

2.3.1 计算零序电流分形维数

基于2.2节真型实验场的接地故障录波数据,利用盒维数法和结构函数法分别计算零序电流分形维数,计算结果分别如表1和表2所示。

表1 基于盒维数法的零序电流分形维数

Table 1 Zero-sequence current fractal dimension based on box dimension algorithm

故障	故障相	分形维数		
		线路1	线路2	线路3
高阻接地	$R_t = 250\ \Omega$	A	1.378	1.181
		B	1.410	1.135
		C	1.536	1.068
	$R_t = 500\ \Omega$	A	1.436	1.138
		B	1.482	1.199
		C	1.452	1.169
	$R_t = 750\ \Omega$	A	1.386	1.099
		B	1.573	1.121
		C	1.434	1.156
	$R_t = 1000\ \Omega$	A	1.457	1.160
		B	1.612	1.141
		C	1.481	1.112
	$R_t = 1500\ \Omega$	A	1.391	1.078
		B	1.538	1.118
		C	1.461	1.097
	$R_t = 2000\ \Omega$	A	1.441	1.159
		B	1.560	1.228
		C	1.467	1.258
高阻电弧接地	A	1.441	1.153	1.436
	B	1.459	1.175	1.445
	C	1.434	1.133	1.445

表2 基于结构函数法的零序电流分形维数

Table 2 Zero-sequence current fractal dimension based on structure function method

故障	故障相	分形维数		
		线路1	线路2	线路3
高阻接地	$R_t = 250\ \Omega$	A	1.974	1.665
		B	1.888	1.384
		C	2.003	1.057
	$R_t = 500\ \Omega$	A	1.985	1.331
		B	2.011	1.680
		C	1.912	1.520
	$R_t = 750\ \Omega$	A	1.897	1.225
		B	2.008	1.291
		C	1.979	1.418
	$R_t = 1000\ \Omega$	A	2.006	1.494
		B	1.970	1.451
		C	1.937	1.309
	$R_t = 1500\ \Omega$	A	1.896	1.150
		B	1.982	1.380
		C	1.942	1.271
	$R_t = 2000\ \Omega$	A	1.932	1.486
		B	1.935	1.611
		C	1.964	1.727
高阻电弧接地	A	2.048	1.759	2.030
	B	2.107	1.751	2.097
	C	2.117	1.771	2.107

由表1和表2可见,在一定的过渡电阻范围内,非

故障线路的零序电流分形维数基本相同;故障线路的零序电流分形维数小于非故障线路的零序电流分形维数,具有差异性,计算结果与前文的理论分析一致。

2.3.2 零序电流比值计算

基于2.2节真型实验场的接地故障录波数据,计算3条线路在故障发生后1个周期内的零序电流有效值。以3条线路中最小的零序电流有效值为基准,每条线路的零序电流有效值与基准值之比如表3所示。

表3 零序电流比值

Table 3 Zero-sequence current ratio

故障	故障相	零序电流比值		
		线路1	线路2	线路3
高阻接地	$R_f=250\ \Omega$	A	2.455	47.861
		B	2.813	75.047
		C	1.207	68.636
	$R_f=500\ \Omega$	A	2.900	37.277
		B	3.070	44.154
		C	3.225	35.107
	$R_f=750\ \Omega$	A	2.426	27.622
		B	2.154	39.668
		C	2.310	26.163
高阻电弧接地	$R_f=1000\ \Omega$	A	2.696	22.366
		B	1.963	26.739
		C	2.029	20.296
	$R_f=1500\ \Omega$	A	1.000	8.165
		B	1.000	4.609
		C	1.000	7.103
	$R_f=2000\ \Omega$	A	2.329	12.826
		B	1.921	13.585
		C	2.340	9.970
高阻电弧接地	A	1.000	6.482	1.684
	B	1.000	5.450	1.616
	C	1.000	5.550	1.516

由表3可知,在一定的过渡电阻范围内,非故障线路的零序电流比值基本相同,故障线路的零序电流比值与非故障线路的零序电流比值具有差异性。

2.4 构建接地故障特征矩阵

2.4.1 数据预处理

构成接地故障特征矩阵的故障特征向量之间存在着较大的数值和量纲差异,对K-means聚类分析将产生较大的负面效果,因此需要对原始数据进行预处理。基于Z-score归一化方法可以将不同量级的数据统一转化为同一个量级,保证了数据之间的可比性,消除了量级对数据的影响,因此采用Z-score归一化方法对原始数据进行预处理,变换公式如式(10)~(12)所示。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (11)$$

$$x'_i = (x_i - \bar{x})/S \quad (12)$$

其中, $\bar{x}$ 为样本均值; x_i 为原始样本数据; S 为样本标准差; x'_i 为规格化预处理后的样本数据; n 为样本数据数量。

2.4.2 建立接地故障特征矩阵

经过数据预处理的接地故障特征矩阵 T 为:

$$T = [Z' \ D'_1 \ D'_2]$$

其中, Z' 、 D'_1 、 D'_2 分别为零序电流比值向量 Z 、基于盒维数法的分形维数向量 D_1 、基于结构函数法的分形维数向量 D_2 经过预处理后的向量。

3 K-means 聚类分析

聚类分析可以处理大量数据信息,是大数据挖掘领域的一种重要的分析手段,其具有设计思路明确、设计难度较小、聚类效果突出和聚类速度快等优点,因此本文选择K-means聚类算法对接地故障特征矩阵进行分析。

已知样本集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, k 为类别数,选择样本点到聚类中心的距离之和为目标函数:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n d_{ij} \|x_j - \omega_i\|^2 \quad (13)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & x_j \in U_i \\ 0 & x_j \notin U_i \end{cases}$$

其中, ω_i 为第 i 个类别的聚类中心; U_i 为聚类后第 i 类样本集合。

针对构建的接地故障特征矩阵,利用K-means聚类算法对接地故障矩阵进行聚类分析,计算故障簇和非故障簇的聚类中心。

4 高阻接地保护技术的实现

4.1 基于仿真实验数据的高阻接地保护技术实现

用MATLAB搭建10 kV小电阻接地系统,中性点接地电阻为 $10\ \Omega$ 。该10 kV小电阻接地系统有3条出线,线路的正序、负序参数为 $R=0.27\ \Omega$ 、 $L=2.55 \times 10^{-4}\ \text{H}$ 、 $C=3.39 \times 10^{-7}\ \text{F}$,零序参数为 $R_0=2.7\ \Omega$ 、 $L_0=1.109 \times 10^{-3}\ \text{H}$ 、 $C_0=2.8 \times 10^{-7}\ \text{F}$ 。故障分别设置在线路1—3的A相、B相和C相,故障类型为单相高阻接地,过渡电阻分别为250、500、750、1000、2000 Ω 。Mayr电弧模型适用于电流过零前的大电阻燃弧期间分析,因此选择Mayr电弧模型进行高阻电弧接地故障。

4.1.1 计算故障簇聚类中心和非故障簇聚类中心

对仿真实验数据先进行预处理,然后构建用于选线的零序电流接地故障矩阵 T ,然后对接地故障矩阵 T 进行聚类分析,分析结果如图7所示。从图7可见,零序电流接地故障特征矩阵 T 中的故障特征向量在三维空间直角坐标系中被聚类为非故障线路簇和故障线路簇。经过计算可得,故障线路簇的聚类中心为(1.155, -1.083, -0.919),非故障线路簇的聚类中心为(-0.577, 0.541, 0.459)。

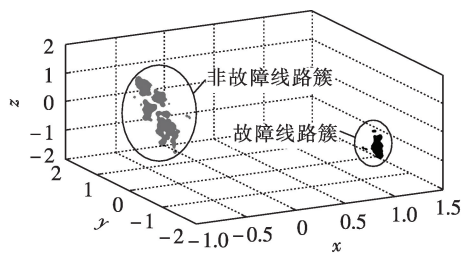


图7 仿真实验聚类分析结果

Fig.7 Cluster analysis result of simulation experiment

4.1.2 高阻接地保护技术仿真实验验证

基于建立的10 kV配电网仿真模型,将故障设置在线路1的A相,过渡电阻分别为500、1000、2000 Ω ,故障初相角为45°,利用故障仿真数据按照图8所示的高阻接地故障判断流程,对4.1.1节计算的聚类中心进行验证,验证结果如表4所示。

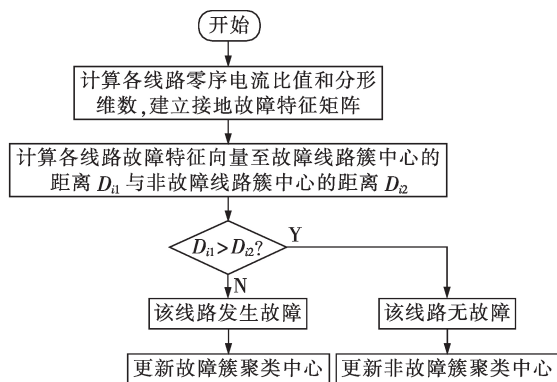


图8 高阻接地故障判断流程

Fig.8 Judgment flowchart of grounding fault with high resistance

表4 聚类分析验证结果

Table 4 Verification results of cluster analysis

故障	线路	D_{i1}	D_{i2}	是否故障
高阻接地	$R_f=500 \Omega$	1	0.090	是
		2	2.426	否
		3	2.959	否
	$R_f=1000 \Omega$	1	0.096	是
		2	2.626	否
		3	3.024	否
高阻电弧接地	$R_f=2000 \Omega$	1	0.100	是
		2	2.616	否
		3	3.032	否
	高阻电弧接地	1	0.122	是
		2	2.340	否
		3	3.250	否

由表4可知,线路1的A相发生高阻接地故障时,根据计算各线路故障特征向量至故障簇和非故障簇聚类中心的距离,可以正确识别故障线路以及非故障线路。

4.2 基于真型实验数据的高阻接地保护技术实现

4.2.1 计算故障簇聚类中心和非故障簇聚类中心

按照对仿真数据的处理计算方法,对真型实验

场的接地故障实验数据进行预处理,然后构建用于选线的零序电流接地故障矩阵 T 。对矩阵 T 进行分类分析,结果如图9所示。

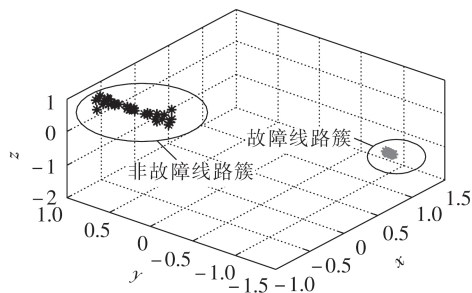


图9 真型实验聚类分析结果

Fig.9 Cluster analysis result of true-mode experiment

从图9可见,零序电流接地故障特征矩阵中的故障特征向量在三维空间直角坐标系中被聚类为非故障线路簇和故障线路簇。经过计算可得,故障线路簇的聚类中心为(1.152, -1.119, -1.147),非故障线路的簇聚类中心为(-0.576, 0.560, 0.573)。

4.2.2 高阻接地保护技术真型实验验证

在真型实验场进行接地故障实验,故障设置在线路2的A相,过渡电阻分别为750、1000、2000 Ω ,作为验证数据,验证结果如表5所示。

表5 聚类分析验证结果

Table 5 Verification results of cluster analysis

故障	线路	D_{i1}	D_{i2}	是否故障
高阻接地	$R_f=750 \Omega$	1	2.6300	否
		2	0.0470	是
		3	3.2810	否
	$R_f=1000 \Omega$	1	2.7900	否
		2	0.0090	是
		3	3.1460	否
	$R_f=2000 \Omega$	1	2.5930	否
		2	0.0350	是
		3	3.3100	否
高阻电弧接地	高阻电弧接地	1	3.4107	否
		2	0.1992	是
		3	1.8324	否

由表5可知,线路2的A相发生高阻接地故障时,本文提出的高阻接地保护方法可以正确识别出故障线路以及非故障线路。

5 结论

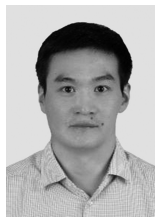
(1)从零序电流相似度的角度提取了高阻接地故障特征,利用零序电流比值和分形维数对故障特征进行了量化计算,基于K-means聚类算法,提出了一种小电阻接地系统高阻接地保护技术,耐受电阻能力理论上最高达到2000 Ω 。

(2)本文方法不需要对保护进行整定值计算,避免了高阻接地保护整定困难的问题,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 陈念,吕艳萍,周凯,等. 110 kV 电阻接地系统零序方向电流保护的整定研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(13):91-96.
CHEN Nian, LÜ Yanping, ZHOU Kai, et al. Research on setting calculation of zero sequence directional overcurrent protection for 110 kV neutral point grounding via resistance system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 91-96.
- [2] 罗隆福,向博,许加柱,等. 10 kV 小电阻接地系统单相接地故障时的跨步电压仿真与实验研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):21-26.
LUO Longfu, XIANG Bo, XU Jiazhū, et al. Simulation and test of step voltage caused by single-phase grounding fault of 10 kV system earthed with low resistance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 21-26.
- [3] CAO Wensi, WU Qing, LI Yibo. Analysis of large hydro generator neutral grounding mode[J]. Paper Asia, 2018, 1(2): 34-37.
- [4] 陶洪铸. 2014 年国际大电网会议学术动态系列报道系统运行与控制技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 1-5.
TAO Hongzhu. A review of CIGRE' 2014 on system operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 1-5.
- [5] 薛永端,徐丙垠,李天友,等. 配网自动化系统小电流接地故障暂态定位技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):27-32.
XUE Yongduan, XU Bingyin, LI Tianyou, et al. Small-current grounding fault location based on transient signals of distribution automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 27-32.
- [6] 徐丙垠,李天友,薛永端. 配电网触电保护与中性点接地方式[J]. 供用电,2017,34(5):21-26.
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Electric shock protection and earthing methods of distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 21-26.
- [7] 许庆强,许扬,周栋骥,等. 小电阻接地配电网线路保护单相高阻接地分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):91-94,115.
XU Qingqiang, XU Yang, ZHOU Dongji, et al. Analysis of distribution network line relay protection during single-phase high-resistance grounding faults in low resistance neutral grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 91-94, 115.
- [8] 薛永端,刘珊,王艳松,等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化,2016,40(16):112-117.
XUE Yongduan, LIU Shan, WANG Yansong, et al. Grounding fault protection in low resistance grounding system based on zero-sequence voltage ratio restraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 112-117.
- [9] 索南加乐,王增超,康小宁,等. 基于线性微分方程参数识别的单端准确故障测距算法[J]. 电力自动化设备,2011,31(12):9-14.
SUONAN Jiale, WANG Zengchao, KANG Xiaoning, et al. Accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation with single end data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 9-14.
- [10] 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 Dabai, 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.
- [11] HUBANA T, SARIC M, AVDAKOVIĆ S. Approach for identification and classification of HIFs in medium voltage distribution networks[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(5): 1145-1152.
- [12] 李天友,徐丙垠,薛永端. 配电网高阻接地故障保护技术及其发展[J]. 供用电,2018,35(5):2-6,24.
LI Tianyou, XU Bingyin, XUE Yongduan. High-impedance fault protection of distribution networks and its developments[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(5): 2-6, 24.
- [13] BISWAL M, BISWAL S. A positive-sequence current based directional relaying approach for CCVT subsidence transient condition[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 81-91.
- [14] 黄俊恺. 小电阻接地系统复杂故障分析及保护新原理研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
HUANG Junkai. Study on complex fault analysis and new relaying principles in low resistance grounding system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [15] 翟进乾. 配电线路在线故障识别与诊断方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
ZHAI Jinqian. Research for online fault recognition and diagnosis method of distribution line[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [16] 束洪春. 谐振接地系统虚拟接地的辨识和综合选线方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):122-129.
SHU Hongchun. Unreal grounding identification and comprehensive line selection for resonant grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 122-129.
- [17] 梁睿,王崇林,王洋洋. 基于多重分形的煤矿电网单相接地故障类型的判别[J]. 煤炭学报,2012,37(增刊1):245-251.
LIANG Rui, WANG Chonglin, WANG Yangyang. Identification method of single-phase earth fault type in coalmine power system based on multi-fractal theory[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(Supplement 1): 245-251.
- [18] 李海峰,陈嘉权,曾德辉,等. 小电阻接地系统高灵敏性零序电流保护[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):198-204.
LI Haifeng, CHEN Jiaquan, ZENG Dehui, et al. High sensitive zero-sequence current protection for low-resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 198-204.
- [19] 喻磊,郭晓斌,韩博文,等. 小电阻接地系统馈线自适应零序电流保护原理及装置实现[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):125-131,137.
YU Lei, GUO Xiaobin, HAN Bowen, et al. Principle of adaptive zero-sequence current protection and implementation of its device for feeder of low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 125-131, 137.

作者简介:



曹文思

曹文思(1978—),男,河南开封人,副教授,主要从事电力系统安全稳定运行和配电网自动化方面的研究工作(E-mail: eegscaows@ncwu.edu.cn);

吴擎(1993—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定性、配电网自动化方面的研究工作;

徐铭铭(1985—),男,河南郑州人,高级工程师,博士,主要从事智能配电网方面的研究工作;

牛荣泽(1989—),男,河南新乡人,工程师,硕士,主要从事配电网停电分析方面的研究工作。

(编辑 任思思)

(下转第224页 continued on page 224)

Application of nonlinear finite element method in electric field calculation of composite insulation structure of transformer outlet

ZHANG Shiling

(Chongqing Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China)

Abstract: The polarity reversal is a special state of composite insulation in converter transformer's outlet system, which can lead to electric field distortion within insulating dielectric and at the interface of insulating dielectric due to space charge effect. On the other hand, the electrical property parameters of insulating dielectric are function of temperature, thus, the changes of electrical parameters caused by temperature gradient will affect transient electric field distribution of insulation structure in process of polarity reversal. On this basis, to accurately simulate the polarity reversal transient electric field of composite insulation structure with temperature gradient, it is proposed to apply the nonlinear finite element method in the coupled analysis of the above two affecting factors of transient electric field. Firstly, the relationship between electrical parameters of composite insulation dielectric of oil-immersed paper and temperature is investigated. Then, the flowchart of transient electric field calculation based on the nonlinear finite element method is introduced in detail and verified by the double coaxial composite insulation structure model. Finally, a 2D simulation model of oil impregnated paper insulating dielectric of actual converter transformer's outlet system is established to simulate and analyze the transient electric field during polarity reversal considering the nonlinear characteristics of materials, which shows that the results of traditional simulation are quite different from those considering material non-linearity, and a local high electric field strength area easily appears during polarity reversal process.

Key words: converter transformer; polarity reversal; converter transformer's outlet system; composite insulation; nonlinear finite element method; transient electric field

(上接第209页 continued from page 209)

Protection method based on fractal theory and cluster analysis for grounding fault with high resistance of low resistance grounding system

CAO Wensi¹, WU Qing¹, XU Mingming², NIU Rongze²

(1. School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Because the setting value of the protection in low resistance grounding system is too large, the protection in low resistance grounding system easily refuses to operate when a high-impedance grounding fault occurs. Aiming at this problem, a novel protection method based on fractal theory and cluster analysis for grounding fault with high resistance of low resistance grounding system is proposed. The similarity characteristics of zero-sequence current between fault line and normal lines are extracted. The characteristic matrix of grounding fault is constructed by the similarity of zero-sequence currents that quantified by ratio of zero-sequence currents and fractal dimension, and analyzed by *K*-means clustering algorithm. The proposed method avoids the difficulty of protection setting. The true-mode experimental recording data verify that the high resistance capacity of protection is improved to 2 000 Ω by the proposed method, which has certain application value.

Key words: low resistance grounding system; high resistance grounding; fractal theory; similarity; cluster analysis; relay protection