

基于 S 变换和可信度决策的谐振接地系统故障 选线新方法^{*}

罗立波¹, 高阳², 谷彩连², 冷雪敏²

(1. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100; 2. 沈阳工程学院 电力学院, 沈阳 110136)

摘要:为了解决配电网谐振接地系统发生单相接地时故障选线效果欠佳的问题, 提出了一种基于 S 变换和可信度决策融合的谐振接地系统故障选线新方法。利用 S 变换强大时频分析能力提取各条线路的复时频矩阵, 通过可信度决策融合各条线路幅频矩阵综合相关系数和暂态能量参数两种判据, 从而实现自适应地进行故障选线, 提高单一选线方法的准确性和灵敏性。利用 EMTP / ATP 软件搭建了 10 kV 配电网混合线路仿真模型, 仿真结果表明该方法能够较好融合多种特征量, 受中性点接地方式、故障位置、故障电阻、故障初始角、网络结构的影响较小, 且判据裕度较高, 在不同补偿度下均具有较高的选线准确率。

关键词:谐振接地; 故障选线; S 变换; 可信度决策

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.015.013

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2019)15-0084-07

A new method of fault line selection for resonant grounding system based on the S-transform and credibility decision

Luo Libo¹, Gao Yang², Gu Cailian², Leng Xuemin²

(1. Changji Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji 831100, Xinjiang, China.

2. School of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor fault line selection when single-phase grounding occurs in resonance grounding system of distribution network, a new method of fault line selection for resonance grounding system based on S-transform and reliability decision fusion is proposed in this paper. The S-transformation powerful time-frequency analysis capability is used to extract the complex time-frequency matrix of each line, and the two criteria of the correlation coefficients and the transient energy parameter of each line frequency-frequency matrix are integrated by credibility decision, so that the fault line selection can be realized adaptively and the accuracy and sensitivity of the single line selection method can be improved. On the other hand, this paper adopts EMTP/ATP software to build a hybrid line simulation model of 10 kV distribution network. The simulation results show that this method can fuse a variety of characteristic variables well. It is less affected by neutral grounding mode, fault location, fault resistance, fault initial angle and network structure, and has higher criterion margin. The accuracy of line selection is higher under different compensation degrees.

Keywords: resonant grounding system, fault line selection, S-transform, credibility decision

0 引言

配电网是提升供电可靠性及智能化程度的关键环节, 其运行情况直接关系到各个电力用户的切身利益。在配电网故障中, 单相接地故障占比超过八

成, 判断接地线路是排除故障的基础, 而选线准确迅速与否直接影响抢修时效长短, 决定供电可靠性高低^[1]。

随着微机保护的不断成熟, 城市配电网的可靠性不断提高, 故障选线的方法也多种多样, 有必须向电网人工注入额外信号来实现选线的主动式选线

^{*} 基金项目: 辽宁省重点研发项目(2017106018)

方法,也有以故障引起的电流、电压为信号实现选线而不需要额外信号注入的被动式选线方法。由于主动式选线需要人为的向电网注入信号,还需配合其他设备,不具备良好的经济效益和实用价值;被动式选线根据国内外的使用情况和研究结果分析显示,因其具有明显的经济效益,系统安全性高等优势,具有非常大的发展前景,也是目前我们国家主流的研究方向。目前,国内外常用被动式选线包括:基于稳态信号、基于故障暂态信号和基于多源信息融合的选线法,其中基于稳态信号选线法^[24]由于故障稳态分量微弱,加之使用稳态信号法需要对持续稳态的短路过程进行检测时容易受间歇性电弧的影响,导致不能准确检测故障特征量,降低可靠性。故障暂态信号^[5-8]具有频率高、消弧线圈电流不能突变和暂态电流(无功功率)幅值较大等特点,但会受到配电网复杂的工作环境和运行状况的影响。文献[9]依据产生故障后健全线路与故障线路的瞬时功率之和不同来判别哪一条线路发生故障,但其中能量函数容易产生积累误差,降低了可靠性。文献[10-11]选取合适的小波对所有线路的零序电流进行分解,通过提取除去低频和高频段的分解信号进行比较,该方法具有很好的适应性,但是其中小波包的选取需要进一步进行研究。相比于以上两种类型的故障选线方法,基于多源故障信息融合^[12-16]的保护方法具有更加明显的优势,同时提高了选线的精度,但是在实际应用中需要进一步证明。

针对以上不足,本文利用S变换时频特性分解单相接地故障后各线路零序电流信号,得到表征各线路的复时频矩阵。分别提取各条线路的S变换相关系数和暂态能量两种故障特征量,通过可信度决策融合各条线路幅频矩阵综合相关系数和暂态能量两种判据构建故障选线方案。

1 S变化基本理论

S变换^[17]是在连续小波变换的基础上延伸发展而来,适用于非平稳信号的时频分析方法,其定义为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t - \tau, f) \exp(-2\pi j f t) dt \quad (1)$$

$$w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} \quad (2)$$

在等式(1)和(2)中, $x(t)$ 为原始时域信号, $w(\tau - t, f)$ 为高斯窗函数,时间 t 轴位置对应的高斯窗

口参数为 τ , 频率为 f 。

当 $\tau \rightarrow kT, f \rightarrow n/NT$ 时,由公式(1)和(2)可得离散S变换表现形式如下:

$$\begin{cases} S[kT, \frac{n}{NT}] = \sum_{m=0}^{N-1} X[\frac{n+m}{NT}] e^{(-\frac{2\pi^2 k^2}{n^2} + \frac{2\pi m k}{N})}, (n \neq 0) \\ S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(\frac{m}{NT}), (n = 0) \end{cases} \quad (3)$$

其中: T 为采样间隔; N 为采样点数; $k, m = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $X[\frac{n+m}{NT}]$ 由输入信号 $x(t)$ 经离散快速傅里叶变换后移位获得。

当 f_s 为实际采样频率时,相邻两行的频率差为:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (4)$$

2 谐振接地系统单相接地零序电流特征分析

单相接地故障发生后,暂态接地电流 i_d 微分方程表达式^[18]可表示为:

$$i_d = i_C + i_L = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} + I_{Cm} \left(\frac{\omega t}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega t \right) e^{-\frac{t}{\tau_C}} \quad (5)$$

式中 ω 为工频; φ 为零序电压的初始相位; τ_L 为电感回路的时间常数; τ_C 为电容回路的时间常数。在谐振接地系统中,当相电压过峰值时产生金属性接地故障,其健全线路和故障线路的暂态零序电流波形如图1所示。

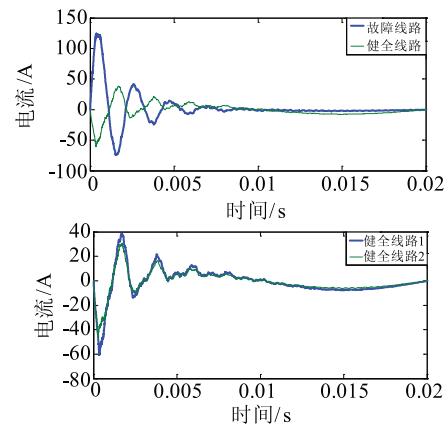


图1 谐振接地系统接地故障的暂态零序电流

Fig. 1 Transient zero-sequence current of grounding fault in resonant grounding system

3 故障选线判据及流程

3.1 综合相关系数

通过对每一条线路零序电流进行提取,得到其S

变换的复时频幅值矩阵。矩阵中每个元素均是由幅值的复数形式构成,将矩阵中各频率下幅值向量进行细分,由于每个频率有 N 个采样点,可以进行等分为 M 个块,定义第 i 个频率下第 n 个时段块所对应的幅值 E_i^n 如下所示:

$$E_i^n = \sum_{j=1+(n-1) \times N/M}^{n \times N/M} \text{real}[S(i,j)] \quad (6)$$

提取上述中各个时频块,得到幅值时频矩阵 E 如下所示:

$$E = \begin{bmatrix} E_1^1 & \cdots & E_1^j & \cdots & E_1^M \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_i^1 & \cdots & E_i^j & \cdots & E_i^M \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_{N/2+1}^1 & \cdots & E_{N/2+1}^j & \cdots & E_{N/2+1}^M \end{bmatrix} \quad (7)$$

定义线路 a 和线路 b 幅值时频矩阵之间的相似程度为:

$$D_{ab} = \sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M [E_a(i,j) - E_b(i,j)]^2 \quad (8)$$

式(8)中, D_{ab} 代表线路 a 和线路 b 幅值矩阵之间的相似程度。为了方便阈值设定,需对上式进行归一化处理,最终得到处理后的相关系数 ρ_{ab} 表达式如下所示:

$$\rho_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M E_a(i,j) E_b(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M E_a^2(i,j) \sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M E_b^2(i,j)}} \quad (9)$$

按照上式(9)可求得各线路的相关系数矩阵如下所示:

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \cdots & \rho_{1j} & \cdots & \rho_{1l} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \rho_{i1} & \cdots & \rho_{ij} & \cdots & \rho_{il} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \rho_{l1} & \cdots & \rho_{lj} & \cdots & \rho_{ll} \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式中,由相关性原理可以看出,此相似矩阵是一个对称矩阵,对角元素全为1,定义每条线路相对于其他线路的综合相关系数 ρ_i 为:

$$\rho_i = \frac{1}{l-1} \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^l \quad (11)$$

式中 $\sum_{j=1}^l \rho_{ij}$ 为馈线和系统所有馈线的相似度之和; i 为配电系统的馈线条数。由于故障线路与非故障线路的差异性比较大,故障线路的 ρ_i 接近于 -1,非故障

线路的 ρ_i 接近于 $\frac{1}{l-1}$ 。

3.2 暂态能量参数

由于每条线路零序电流信号在不同频率信号中故障信息不同,本文对故障零序电流进行 S 变换提取特征频带,依据能量最大值原则进行特征频带 f_i (包含 $f_i=0$ 的直流分量)的选取,并计算每条线路故障后 1/4 周期的暂态能量为:

$$W_i(\frac{T}{4}) = \int_0^{\frac{T}{4}} u_0(\tau) i_{0i}(\tau) d\tau, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (12)$$

上式中, W_i 为第 i 条线路 1/4 周期内的母线零序电压 $u_0(\tau)$ 和零序电流 $i_{0i}(\tau)$ 的乘积积分。定义故障主导特征频率 f_i 下各线路的短窗能量 W_{i-t} 为:

$$W_{i-t} = \sum_m |S(m, k)|^2, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (13)$$

对式(13)中的 W_{i-t} 进行归一化:

$$p_i = W_{i-t} / \sum_{i=1}^m W_{i-t} \quad (14)$$

$$Q_i = \frac{p_i - \min\{p_i\}}{\max\{p_i\} - \min\{p_i\}} \quad (15)$$

式中 p_i 为故障主导频率下第 i 条线路短窗能量占比, Q_i 代表标准化后的 S 变换暂态能量特征。故障线路的能量远大于健全线路的能量参数,因此可以进行区分。

3.3 基于 S 变换和可信度决策的判别方法

由上文可知,本文所提出的两种判据均能较好反映了故障的暂态阶段特征,若两种故障判据所得到的结果一致时,则可以判定线路发生故障;若其中一种故障判据出现误差,可能会产生误判的情况。因此本文结合信息融合技术考虑两种判据的各自适用范围,利用模糊理论的思想建立判据的可信度系数函数,这里定义一种投票信心度 y_i 如式(16)所示:

$$y_i = \rho_i \cdot Q_i \quad (16)$$

由于式(10)和式(15)可知,综合相关系数 ρ_i 和暂态能量参数 Q_i 其值域为 $[0, 1]$ 区间,故式(16)中 y_i 的值域也为 $[0, 1]$ 区间,且 y_i 的值越大代表其可信度越高,选线的正确性越大。这种故障选线方法相比于其他的融合类神经网络算法的计算效率高,并且融合了两种判据,选线精度大为提高。

3.4 选线机制

综上所述,所提出的故障选线机制如图 2 所示。

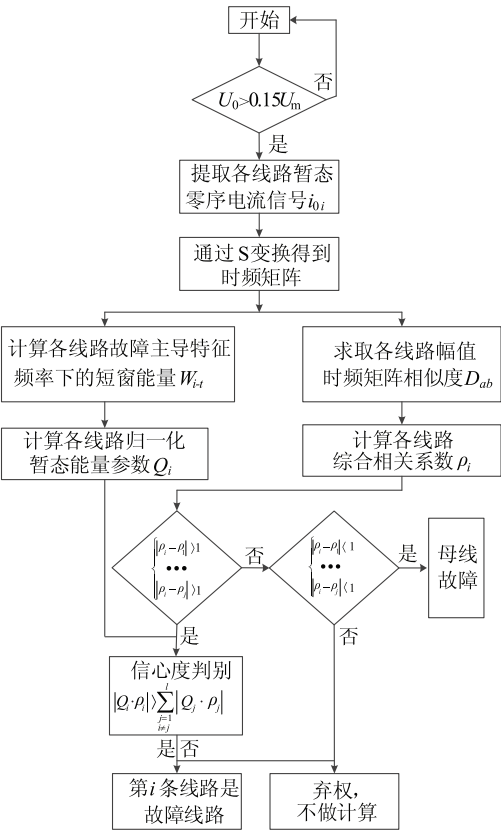


图 2 故障选线机制图
Fig. 2 Flow chart of fault line selection

4 仿真分析

利用电磁暂态仿真软件搭建了 10 kV 配电网仿真模型，具体如图 3 所示。

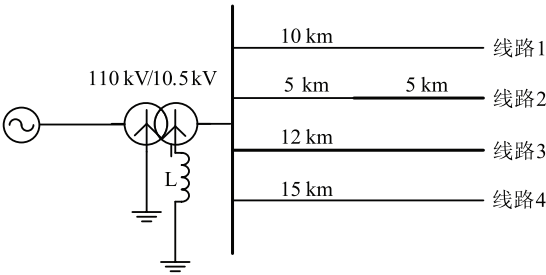


图 3 仿真模型
Fig. 3 Simulation model

考虑了配电网线路的实际情况，模拟包含架空—电缆两种类型线路的配电网单相接地故障仿真，其各条线路的长度分布如表 1 所示。

考虑谐振接地系统中，故障电流易受消弧线圈的影响，本文设置消弧线圈的补偿度 p 设置为 8%（即 L 取为 0.773 H），仿真中各条线路正负零序参数如表 2 所示。

表 1 各条线路长度
Tab. 1 The length of each lines

线路	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄
架空线长度/km	10	5	0	15
电缆长度/km	0	5	12	0

表 2 单位长度(km)线路参数
Tab. 2 Parameters of lines

馈线类型	R ₁ /Ω	L ₁ /mH	C ₁ /μF	R ₀ /Ω	L ₀ /mH	C ₀ /μF
架空线	0.175	1.210	0.0097	0.230	5.478	0.008
电缆	0.270	0.354	0.3391	2.700	1.019	0.280

4.1 算例分析

假设线路 L₁ 发生单相接地故障，故障情况如下：

- (1)故障位置:线路 L₁ 的 50% 处；
- (2)过渡电阻:100 Ω；
- (3)故障合闸角:90°

由式(10)可以得到故障馈线 1 与健全馈线的零序电流幅值时频特性图如图 4 所示。

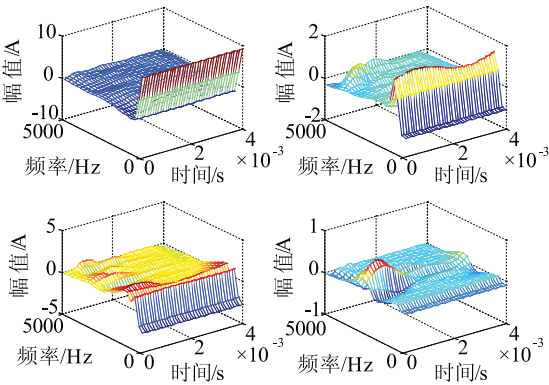


图 4 各线路零序电流幅值时频特性图
Fig. 4 Time-frequency characteristic of zero-sequence current

由图可知，线路 L₁ 的幅值时频特性与其他出现的时频分布特性完全不一致，尤其在所对应的时频区段内前者分布特征与后者完全相反，则可通过各馈线之间相关系数可靠的判别出故障线路。

通过对故障零序电流进行 S 变换提取得到各条线路的暂态能量分布如图 5 所示。

由图 5 可知，故障线路 L₁ 对应的故障特征频率分别为 200 Hz，因此可以计算出故障主导频率下各条线路所对应的暂态能量如图 6 所示。

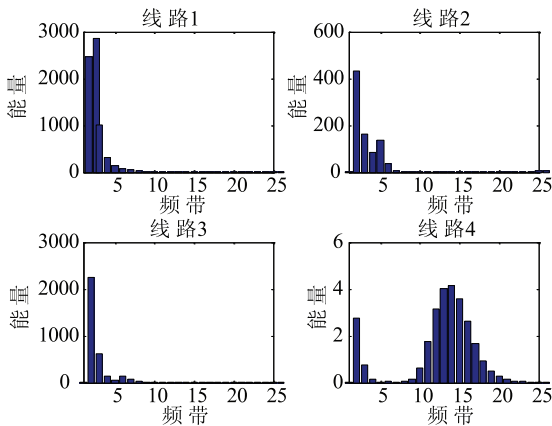


图 5 各线路不同频带下的能量分布

Fig. 5 Energy distribution at different frequency of each line

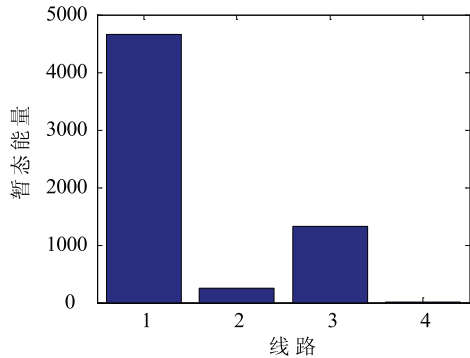


图 6 各线路特征频带下的能量分布

Fig. 6 Energy distribution at characteristic frequency of each line

由式(10)和式(15)可以计算出得到, 每条线路的综合相关系数为 $\mathbf{p} = [-0.897, 0.321, 0.308, 0.337]$, 每条线路的暂态能量参数 $\mathbf{Q} = [1.000, 0.054, 0.285, 0.000]$ 。由式(10)可以计算出四条线路的投票信心度 $\mathbf{y} = [-0.897, 0.017, 0.088, 0.000]$, 满足由图 2 中的选线判据 $|Q_i p_i| > \sum_l |Q_l p_l|$, 故判定线路 1 为故障线路, 选线正确。

4.2 选线方式的适用性

为了进一步验证本方法的适用性, 本文对线路不同故障情况进行了单相接地故障仿真分析, 其所对应选线结果如表 3 所示。

从表 3 中的选线结果可以看出, 当故障初始角为 0° 时, 故障线路的投票信心度值接近于 -1 , 能较好的判别出故障线路。当故障初始角增大到 90° 时, 投票信心度值较为下降, 但是仍然可以正确判别故障线路, 且不受过各种故障工况的影响。

表 3 不同故障条件下谐振接地系统单相接地故障选线结果

Tab. 3 Simulation results in the system under different fault conditions

L	X_f /km	R_f / Ω	$\theta/(^\circ)$	$y_i[y_1, y_2, y_3, y_4]$	结果
1	2	20	0	$[-0.997, 0.012, 0.066, 0.000]$	正确
	5	500	90	$[-0.897, 0.017, 0.088, 0.000]$	正确
	8	1000	0	$[-0.996, 0.014, 0.078, 0.000]$	正确
2	1	20	0	$[0.000, -0.997, 0.097, 0.000]$	正确
	5	500	90	$[0.000, -0.874, 0.001, 0.000]$	正确
	9	1000	0	$[0.000, -0.994, 0.118, 0.000]$	正确
3	2	20	0	$[0.000, 0.037, -0.989, 0.000]$	正确
	6	500	90	$[0.000, 0.000, -0.769, 0.000]$	正确
	10	1000	0	$[0.000, 0.048, -0.985, 0.000]$	正确
4	3	20	0	$[0.000, 0.012, 0.068, -0.996]$	正确
	7.5	500	90	$[0.000, 0.043, 0.139, -0.815]$	正确
	12	1000	0	$[0.000, 0.046, 0.247, -1.000]$	正确

4.3 不同补偿度下的故障分析

由于消弧线圈的补偿度不同, 单相接地故障的零序电流也会发生变化。仿真中考虑了不同补偿度下本文所提方法的适用性, 模拟了架空-电缆混合线路 2 在不同补偿度下末端发生单相接地故障, 其中故障合闸角为 0° , 接地电阻为 500Ω , 仿真结果表明该方法对不同补偿度下的接地故障仍适用, 其故障选线结果如表 4 所示。

表 4 基于不同补偿度下的故障选线结果

Tab. 4 Simulation results of fault line selection under different compensation degrees

$P\%$	X_f /km	R_f / Ω	$\theta/(^\circ)$	$y_i[y_1, y_2, y_3, y_4]$	结果
1	1	20	0	$[0.000, -0.997, 0.010, 0.000]$	正确
	5	500	90	$[0.000, -0.883, 0.001, 0.000]$	正确
	9	1000	0	$[0.000, -0.995, 0.120, 0.000]$	正确
8	1	20	0	$[0.000, -0.997, 0.097, 0.000]$	正确
	5	500	90	$[0.000, -0.874, 0.001, 0.000]$	正确
	9	1000	0	$[0.000, -0.994, 0.118, 0.000]$	正确
10	1	20	0	$[0.000, -0.997, 0.097, 0.000]$	正确
	5	500	90	$[0.000, -0.874, 0.001, 0.000]$	正确
	9	1000	0	$[0.000, -0.994, 0.116, 0.000]$	正确

通过上述仿真分析可知, 该选线方法在不同不同

补偿度下依然能够进行有效地选线,且不受故障工况影响,具有较好的应用前景。

5 结束语

提出了一种基于S变换和可信度决策融合的谐振接地系统故障选线新方法。论文利用S变换强大时频分析能力提取各条线路的复时频矩阵,通过可信度决策融合各条线路幅频矩阵综合相关系数和暂态能量参数两种判据,从而实现自适应地进行故障选线,该方法具有如下特点:

(1)充分融合两种故障判据进行选线,弥补了单一故障选线方法的不足;

(2)该选线方法在不同的故障条件下均有效地识别出各类故障线路,具有良好的适用性;

(3)投票信心度的有效定义,使得该方法能够有效克服高阻接地故障中接地电阻大、故障初始角小等情况下导致故障暂态零序电流微弱的影响,实现正确选线,且判别裕度高;

(4)对于不同补偿情况下的谐振接地系统,该方法都能实现正确选线,且对于同时或不同时接地的两点故障也能可靠选线,抗干扰能力强。

参考文献

- [1] 陈奎,唐轶,刘长江,等. 谐振接地电网单相接地故障选线的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 61-65.
Chen Kui, Tang Yi, Liu Changjiang, et al. Research on detecting single-phase-to-ground faulted feeder in resonant grounded power distribution system [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 61-65.
- [2] 樊淑娴,徐丙垠,张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 91-95.
Fan Shuxian, Xu Bingyin, Zhang Qingzhou. A new method for fault line selection in distribution system with arc suppression coil grounding with square-wave signal injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 91-95.
- [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接地选线新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 183-189.
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): 183-189.
- [4] 潘本仁,宋华茂,张秋凤,等. 小电流接地故障无功功率分析及选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 51-56.
Pan Benren, Song Huamao, Zhang Qiufeng, et al. Analysis of reactive power and novel faulty selection method in resonant grounding system [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 51-56.
- [5] 张海申,何正友,张钧. 谐振接地系统单相接地故障频谱特征分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 79-84.
Zhang Haishen, He Zhengyou, Zhang Jun. Frequency Spectrum Characteristic Analysis of Single-phase Grounding Fault in Resonant Grounded Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 79-84.
- [6] 姜博,董新洲,施慎行,等. 自适应时频窗行波选线方法研究[J]. 电机工程学报, 2015, 35(24): 6387-6397.
Jiang Bo, Dong Xinzhou, Shi Shenxing, et al. A method of adaptive time frequency window traveling wave based fault feeder selection [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6387-6397.
- [7] 刘谋海,方涛,姜运,等. 基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 74-79.
Liu Mouhai, Fang Tao, Jiang Yun, et al. A new correlation analysis approach to fault line selection based on transient main-frequency components [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 74-79.
- [8] 束洪春,朱梦梦,黄文珍,等. 基于暂态零序电流时频特征量的配网故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 1-6.
Shu Hongchun, Zhu Mengmeng, Huang Wenzhen, et al. Faulty line selection based on time-frequency characteristics of transient zero-sequence current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 1-6.
- [9] 束洪春,彭仕欣. 基于短窗数据S变换能量的缆-线混合配电网故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 152-159.
Shu Hongchun, Peng Shixin. A fault line detection algorithm for distribution network of overhead line and underground cable mixed lines using S-transform energy from short window data [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 152-159.
- [10] 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.
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.
- [11] 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.
- [12] 郭谋发,林妙玉,杨耿杰. 谐振接地系统暂稳态信息智能融合选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 60-66.
Guo Moufa, Lin Miaoyu, Yang Gengjie. The transient and steady-state information fusion method for single phase grounding line detection in resonant grounding system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 60-66.
- [13] 肖先勇,张文海,汪颖,等. 基于故障相暂态信号特征的二维故障选线法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 178-184.
Xiao Xianyong, Zhang Wenhai, Wang Ying, et al. Two-Dimensional Fault Line Detection Based on Transient Signal Features of Fault Phase [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 178-184.
- [14] 简金宝,王媛媛,曾祥君,等. 基于系统聚类分析的馈线接地保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 111-116.
Jian Jinbao, Wang Yuanyuan, Zeng Xiangjun, et al. Earth Fault Feeder Detection Based on Hierarchical Clustering Analysis [J]. Automation

- of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 111-116.
- [15] 张海平, 何正友, 张钧. 基于量子神经网络和证据融合的小电流接地系统选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 172-178.
Zhang Haiping, He Zhengyou, Zhang Jun. A Fault Line Detection Method for Indirectly Grounding Power System Based on Quantum Neural Network and Evidence Fusion [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 172-178.
- [16] 庞清乐, 孙同景, 穆健, 等. 基于神经网络的中新店经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 78-81.
Pang Qingle, Sun Tongjing, Mu Jian, et al. Neural network based faulty line detection method for power system with neutral grounding via arc suppression coil [J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 78-81.
- [17] 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, 2012, 31(10): 109-115.
Zhang Jun, He Zhengyou, Jia Yong. Fault line identification approach based on S-transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 31(10): 109-115.

- [18] 闫光太, 梁甲文, 王新涛, 等. 利用暂态幅值故障测度的谐振电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 64-68.
Yan Guangtai, Liang Jiawen, Wang Xintao, et al. A faulty line selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 64-68.

作者简介:



罗立波(1973—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 高级工程师, 工学学士, 主要从事电力系统相关工作。
Email: 619405450@qq.com

高阳(1974—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 工学博士, 主要研究方向为电力系统自动化。

收稿日期: 2019-05-07; 修回日期: 2019-06-26
(王克祥 编发)

(上接第46页)

- [3] LEWIS F L, VRABIE D. Reinforcement learning and adaptive dynamic programming for feedback control [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2009, 9(3): 32-50.
- [4] 沈郁, 陈伟彪, 姚伟, 等. 采用新型自适应动态规划算法的柔性直流输电附加阻尼控制[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3768-3774.
Shen Yu, Chen Weibiao, Yao Wei, et al. A new adaptive dynamic programming algorithm for flexible DC transmission with additional damping control [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3768-3774.
- [5] 肖浩, 裴玮, 杨艳红. 计及电池寿命和经济运行的微电网储能容量优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3256-3265.
Xiao Hao, Pei Wei, Yang Yanhong. Energy Storage Capacity Optimization for Microgrid Considering Battery Life and Economic Operation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3256-3265.
- [6] 黄伟, 黄婷, 周欢. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 211-217.
Huang Wei, Huang Ting, Zhou Huan. Optimal Economic Dispatch for Microgrid Considering Improved differential evolution algorithm [J]. Automation of electric power system, 2014, 38(9): 211-217.

- [7] J. Chen, F. Yang. Data-driven subspace-based adaptive fault detection for solar power generation systems [J]. IET Control Theory & Applications, 2013, 7(11): 1498-1508.
- [8] Q. Wei, D. Liu, G. Shi. A novel dual iterative Q-learning method for optimal battery management in smart residential environments [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2509-2518.

作者简介:



周步祥(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统调度自动化。Email: hiway_scu@126.com

张烨(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为调度自动化。
Email: 314990793@qq.com

收稿日期: 2018-05-13; 修回日期: 2018-09-26
(王克祥 编发)