

基于暂态零序导纳值的谐振接地系统单相接地故障选线方法

吴江雄¹, 郑茂然², 王欣³, 李海锋³, 罗会洪²

(1. 广西电网有限责任公司桂林供电局, 广西 桂林 541002; 2. 中国南方电网电力调度控制中心, 广州 510663; 3. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 谐振接地系统削弱了故障线路和非故障线路的零序特征差异, 为此提出了一种基于暂态零序导纳值的谐振接地系统选线方法。首先从理论上推导了单相接地故障下故障线路和非故障线路的暂态零序导纳公式, 比较了两者的特征差异。在此基础上, 构建了基于暂态零序导纳最大均值指标的单相接地故障选线方法。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 软件对所提方法的性能进行了全面的验证和测试。结果表明, 所提方法具有耐受过渡电阻能力强的优势。仅需计算故障后半半个工频周期内的暂态零序导纳, 计算量小、速度快、易于实现。同时, 在噪声干扰、电流互感器反接、网络拓扑结构变化、线路参数变化、采样频率变化等干扰因素下仍有较高的选线准确度。

关键词: 单相接地故障; 故障选线; 暂态零序导纳; 谐振接地系统

Single-Phase Grounding Fault Line Selection Method for Resonant Grounding System Based on Transient Zero-Sequence Admittance Value

WU Jiangxiong¹, ZHENG Maoran², WANG Xin³, LI Haifeng³, LUO Huihong²

(1. Guilin Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Guilin, Guangxi 541002, China; 2. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The zero-sequence characteristic difference between faulty line and healthy line is weakened by resonant grounding system, so a line selection method based on transient zero-sequence admittance is proposed in this paper. Firstly, the transient zero-sequence admittance formulas of faulty line and healthy line under single-phase grounding fault are deduced theoretically, and the characteristic differences between them are compared. On this basis, a single-phase grounding fault line selection method based on the maximum mean value index of transient zero-sequence admittance is constructed. Finally, based on PSCAD/EMTDC software, the performances of the proposed method are verified and tested comprehensively. The results show that proposed method has the advantage of strong resistance tolerance to the transition resistance. Only the transient zero-sequence admittance in half power frequency cycle after the fault needs to be calculated, so the calculation load is small, the speed is fast and the implementation is easy. At the same time, the line selection accuracy is still high under the interference factors such as noise interference, current transformer reverse connection, the changes in network topology, line parameters and sampling frequency.

Key words: single-phase grounding fault; fault line selection; transient zero-sequence admittance; resonant grounding system

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977080); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515011035); 广西电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20222111)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51977080); the Basic and Applied Basic Research Fund Project of Guangdong Province (2023A1515011035); the Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Co., Ltd. (GXKJXM20222111).

0 引言

我国配电网大多采用经消弧线圈接地系统^[1], 其中单相接地故障是配电网的常见故障, 占有故障的 80% 以上^[2], 且高阻故障时有发生^[3-4]。故障如果不及时处理, 会影响电力系统供电稳定性, 甚至可能危害人身安全, 因此研究其故障选线技术尤为重要^[5]。

对于单相接地故障选线, 最常见的方法是采用零序分量特征, 如零序电流。但对于经消弧线圈接地的系统而言, 消弧线圈的补偿作用削弱了单相接地故障时故障线路与非故障线路之间零序电流幅值与极性的差异, 尤其在高阻接地故障下故障选线面临很大困难^[6-7]。

为此, 国内外学者也提出了一些改进方法。文献[8]比较了故障发生后线路的稳态零序电压和零序电流, 提高了选线的准确性, 但消弧线圈过补偿后故障电流失去原有特征, 将不再适用。文献[9-10]计算了各线路零序有功功率, 确定其大小与方向, 不受消弧线圈影响, 但实际故障的有功分量很小, 可靠性较低。文献[11]提取了零序电流五次谐波分量, 结合 Duffing 振子检测原理, 克服了系统中其它谐波源的干扰, 无需精确测量五次谐波, 但实际五次谐波含量低, 应用效果受限。文献[12]计算了各条线路的零序导纳相角及其相角差系数, 提取了零序导纳相角特征。

上述研究基于零序电气量的稳态过程, 受稳态信号微弱、间歇性电弧和运行方式的影响较大, 且易受故障初相角和过渡电阻的影响^[13], 无法满足实际系统复杂多变的情况, 选线效果不佳^[14]。而故障暂态过程中蕴含丰富的故障信息, 可构成有效的故障选线判据^[15-16]。文献[17]基于故障后首半波电流的幅值和相位, 但当故障接地电阻较大时其值很小, 难以检测。文献[18]通过集合经验模态分解求取特征频段内的配电网各线路首端零序电流分量能量之和, 从而判定故障线路。文献[19-20]基于小波变换提取故障暂态量构成选线识别判据, 灵敏性较高, 但对噪声较为敏感, 且存在基函数不易选取的问题。

相比之下, 零序导纳特征由于不受故障电阻的影响, 保护精度高, 因而受到了关注^[21]。但现有的零序导纳法大多基于故障稳态过程, 在弧光高阻接

地故障时易发生误判, 且没有充分利用暂态过程的丰富信息。为此, 本文提出一种基于暂态零序导纳(即零序暂态电流与电压的比值)的谐振接地系统故障选线方法。利用故障暂态过程中线路间暂态零序导纳值的差异识别出故障线路。最后对该方法进行仿真测试与适应性分析, 验证了其可行性和有效性。

1 单相接地故障下的暂态零序导纳特征

图 1 为谐振接地系统第 n 条出线发生单相接地故障时系统的零序等值网络^[22]。图中 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 为各线路的对地电容。

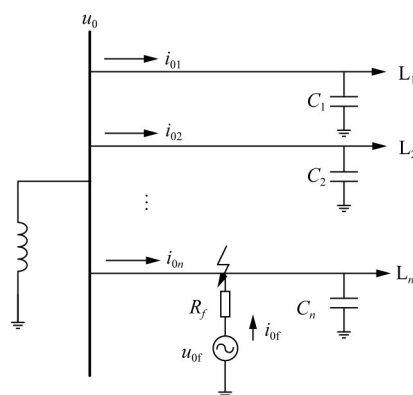


图 1 谐振接地系统单相接地故障零序等值网络

Fig. 1 Zero-sequence equivalent network for single-phase-ground fault in resonant grounding systems

1.1 故障线路的暂态零序导纳

根据过渡电阻的大小, 分低阻、高阻接地两种情况对故障线路的暂态零序导纳值进行分析^[23]。

1) 经低阻接地

低阻接地故障时过渡电阻 R_f 满足式(1)。

$$R_f < 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_\Sigma}} \quad (1)$$

式中: L_f 为过渡电阻的等效电感; C_Σ 为系统零序对地电容之和。

此时故障电流暂态分量的振荡频率较高, 消弧线圈等效阻抗远大于并联分布电容, 可忽略消弧线圈的影响^[24], 则故障线路的零序导纳值可表示为:

$$\frac{i_{0n}(t)}{u_0(t)} = \omega \sum C_{0j} \cot(\omega t + \varphi) + \omega \sum C_{0j} \times \frac{\left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}}}{\sin(\omega_f t + \varphi)} \quad (2)$$

式中: $i_{0n}(t)$ 为故障线路 L_n 的零序电流; $u_0(t)$ 为母线零序电压; t 为时间; ω 为工频角频率; C_{0j} 为第 j 条线路零序对地电容; φ 为故障初相角; ω_f 为高频振荡分量的角频率; $\tau_c = L_0/2R_0$, 为电路时间常数。

由此可见, 低阻接地时故障线路的零序导纳值为非故障线路零序导纳值总和与高频振荡分量组成, 其值很大, 但高频振荡分量将随着时间逐渐衰减。

2) 经高阻接地

高阻接地故障时过渡电阻 R_f 满足式(3)。

$$R_f \geq 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_\Sigma}} \quad (3)$$

此时故障电流暂态分量频率在工频附近, 不能忽略消弧线圈的影响, 同理可得故障线路的零序导纳值如式(4)所示。

$$\frac{i_{0n}(t)}{u_0(t)} = (\omega \sum C_{0j} - \frac{1}{\omega L}) \cot(\omega t + \varphi) + \omega \sum C_{0j} \times \left(\frac{\omega_f \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t}{\sin(\omega_f t + \varphi)} \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} + \frac{1}{\omega L} \frac{(\cos \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_L}}}{\sin(\omega_f t + \varphi)} \quad (4)$$

式中: L 为消弧线圈电感值; τ_L 为电感时间常数。

由式(4)可见, 高阻接地时故障线路的零序导纳值为非故障线路零序导纳值总和减去消弧线圈等效导纳并叠加高频振荡分量组成, 该值仍然较大。

1.2 非故障线路的暂态零序导纳

非故障线路的暂态零序导纳值如式(5)所示。

$$\frac{i_{0j}(t)}{u_0(t)} = \omega C_{0j} \cot(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

式中 $i_{0j}(t)$ 为非故障线路 L_j 的零序电流, $j=1, 2, \dots, n-1$ 。

由此可见, 非故障线路的暂态零序导纳值与线路本身对地电容成正比, 与故障线路的暂态零序导纳相比其值很小。

1.3 故障线路和非故障线路的特征差异

为了更直观地对比故障线路和非故障线路的特征差异, 以典型配电网参数代入式(2)、(4)~(5), 并对暂态零序导纳波形取绝对值进行分析, 以突出相互间的大小差异, 如图2所示。由图2可见, 故障后 10 ms 内各线路的暂态零序导纳值随着时间变化, 在某个时间达到最大值。故障线路暂态零序导

纳在高阻和低阻情况下的最大值均远大于非故障线路的, 这与理论分析相符。其主要原因是故障线路的零序导纳值由于接地点的存在会发生很大改变, 且当 $t=\pi/2\omega_f$ 时达最大值, 从而远大于其他非故障线路。因此可以根据线路间的暂态零序导纳值的大小差异进行故障选线。

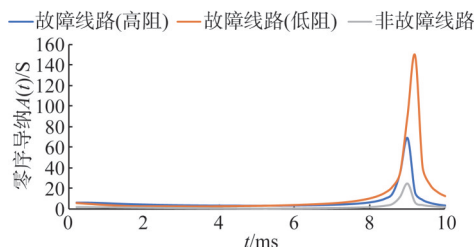


图2 故障线路与非故障线路的暂态零序导纳

Fig. 2 Transient zero-sequence admittances of faulty lines and healthy lines

进一步考虑故障暂态过程对暂态零序导纳值的影响。设置不同的故障电阻、故障初相角, 对比不同情况下故障线路与非故障线路的暂态零序导纳特征, 其波形如图3所示。

由图3可见, 改变故障初相角会影响零序导纳最大值出现的时间及大小; 改变故障接地电阻会一定程度上影响零序导纳最大值的大小。但总体上看, 不同故障情况下故障线路的暂态零序导纳值总是远大于非故障线路的暂态零序导纳值。因此可计算出故障后半周波时间内各线路暂态零序导纳值的最大值进行比较, 实现有效的故障选线。

2 基于暂态零序导纳值的故障选线方法

根据上述分析提出基于暂态零序导纳值的故障选线方法。系统正常运行时实时监测母线零序电压, 当零序电压突变量 Δu_0 大于或等于阈值时^[25]判断馈线发生单相接地故障, 即满足式(6)。

$$\Delta u_0 \geq \Delta u_{0\text{set}} \quad (6)$$

式中: 阈值 $\Delta u_{0\text{set}}$ 可整定为确保高阻接地故障具有足够灵敏性, 即可选取 $\Delta u_{0\text{set}} = \Delta u_{0\text{HIF}}/K_{\text{rel}}$ 。其中, $\Delta u_{0\text{HIF}}$ 为高阻接地故障时的母线零序电压突变量, K_{rel} 为可靠系数, 可取 1.1~1.2。

为了有效提取各线路的暂态零序导纳特征, 构造一个基于一段时窗的零序导纳绝对值的平均值指标 $A_j(k)$, 其定义如式(7)所示。

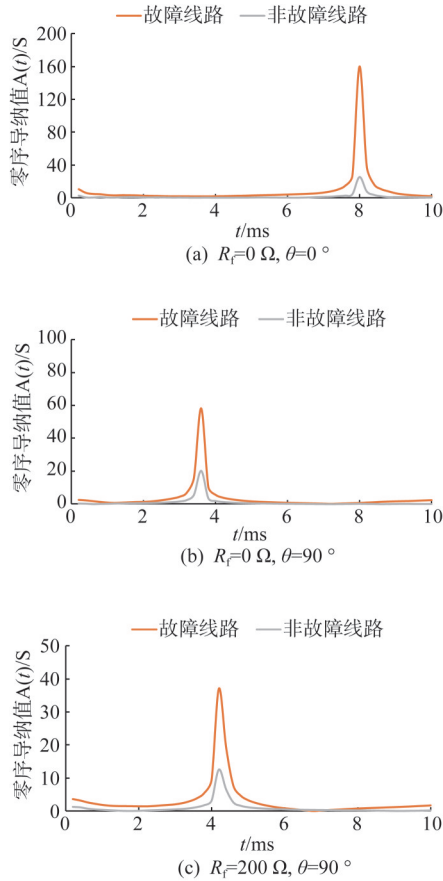


图3 不同故障情况下的暂态零序导纳值

Fig. 3 Transient zero-sequence admittance values under different fault conditions

$$A_j(k) = \frac{1}{N_s} \sum_{t=k}^{k+N_s} \left| \frac{i_j(t)}{u_j(t)} \right| \quad (7)$$

式中: $i_j(t)$ 和 $u_j(t)$ 分别为各线路零序电流和零序电压采样数据; j 为线路编号; k 为线路暂态零序导纳计算起点; N_s 为所选取的时窗采样点数量, 在本文取 1/10 个工频周期内 (即 2 ms) 的采样数据点 (即 10 个点)。

定义在一段时间内线路 j 的平均值指标最大值 $\max A_j$ 为:

$$\max A_j = \max (A_j(k)), \quad k < N_{T/2} - N_s \quad (8)$$

式中 $N_{T/2}$ 为半周对应的采样点数量。

在此基础上比较各线路中暂态零序导纳的最大值与次大值即可实现故障选线, 具体比值判据 D 为:

$$D = \frac{\max A_I}{\max A_{II}} > D_{\text{set}} \quad (9)$$

式中: $\max A_I$ 和 $\max A_{II}$ 分别各线路中的暂态零序导

纳平均值中的最大值与次大值; D_{set} 为动作阈值, 取大于 1 的值, 取值越大可靠性越高。满足判据 (9) 时导纳最大值 $\max A_I$ 对应的支路即为故障支路。

3 仿真实验及分析

3.1 仿真模型及参数

为验证所提选线方法, 在 PSCAD 仿真软件上搭建 10 kV 谐振接地系统模型, 包含 4 条馈电线路, 如图 4 所示。其中, 各线路包含了不同长度的架空线路和电缆线路, 采用了分布参数模型, 其对应的参数如表 1 所示。设置采样频率为 5 kHz, 获取不同故障情况下的电压电流数据, 分别计算其暂态零序导纳, 验证算法正确性, 其中阈值取 $\Delta u_{0\text{set}} = 0.1$ kV, $D_{\text{set}} = 1.5$ 。

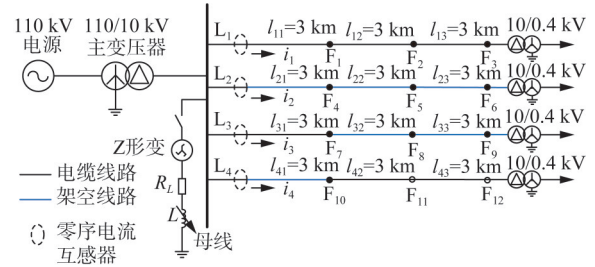


图4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model

表1 仿真模型线路参数

Tab. 1 Line parameters of simulation models

线路参数	电阻 R /($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)		电感 L /(mH $\cdot \text{km}^{-1}$)		对地电容 C /($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)	
	正序	零序	正序	零序	正序	零序
电缆线路	0.27	2.7	0.25	1.02	0.339	0.280
架空线路	0.17	0.23	1.21	5.48	0.110	0.050

3.2 不同故障情况测试结果及分析

1) 不同故障初相角

分别设置故障线路为 $L_1 \sim L_4$, 对应图 4 中的故障点 F_1 、 F_4 、 F_7 、 F_{10} , 故障接地电阻为 0Ω , 故障初相角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° , 各线路的暂态零序导纳值如表 2 所示。

分析表 2 数据可得, 非故障线路的暂态零序导纳值与其对地电容的大小正相关, 故障线路暂态零序导纳值远大于非故障线路的值, 与理论分析相符。由于故障初相角的改变影响了暂态过程故障电流波形畸变程度, 从而对所提判据的特征量产生一

表 2 $R_f=0\Omega$ 时的测试结果
Tab. 2 Test results when $R_f=0\Omega$

故障线路	$\theta/(^\circ)$	$\max A_1$	$\max A_2$	$\max A_3$	$\max A_4$	D	选线结果
L_1	0	75.815	0.837	6.976	11.931	6.35	1
	30	54.928	0.747	6.115	8.740	6.28	1
	60	37.337	0.510	5.953	7.958	4.69	1
	90	35.103	0.339	4.235	6.498	5.40	1
L_2	0	15.184	59.880	8.463	15.010	3.94	2
	30	15.069	50.890	8.054	13.347	3.38	2
	60	14.609	33.092	7.147	10.903	2.27	2
	90	10.389	24.771	5.972	9.494	2.38	2
L_3	0	16.484	0.705	38.458	15.076	2.33	3
	30	15.059	0.630	24.338	13.963	1.62	3
	60	12.885	0.611	21.433	12.097	1.66	3
	90	9.271	0.570	18.224	6.009	1.97	3
L_4	0	18.130	0.599	7.662	39.515	2.18	4
	30	14.803	0.403	5.151	29.882	2.02	4
	60	10.413	0.374	3.354	24.573	2.36	4
	90	9.601	0.378	3.331	20.738	2.16	4

定的影响。其中,在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间,随着相角的增大,会造成暂态零序导纳值降低,导致故障判据 D 值在一定范围内波动。但不会造成故障特征量的明显变化,对保护判据的影响是有限的。

2) 不同故障位置和过渡电阻

为测试不同故障位置和过渡电阻对所提方法的影响,选取表 2 中故障判据平均值最小的线路 L_3 进行测试,对应故障点为 $F_7\sim F_9$,故障接地电阻为 0Ω 、 200Ω 、 $1\,000\Omega$ 、 $2\,000\Omega$ 、 $3\,000\Omega$ 和 $5\,000\Omega$,故障初相角为 30° ,各线路的暂态零序导纳值如表 3 所示。

分析表 3 数据可得,同一故障位置接地电阻增大时,故障线路暂态零序导纳值减小,非故障线路在一定范围内波动,因此 D 值也随之在一定范围内波动,且总体上略微减少。当故障位置改变时,故障线路随着故障位置与母线的距离增大而略微增大,非故障线路暂态零序导纳值变化量较小,基本不变。根据比值阈值为 1.5 进行故障选线时, L_3 线路故障,在接地电阻达 $2\,000\Omega$ 时仍能够可靠识别故障线路,在 $3\,000\Omega$ 和 $5\,000\Omega$ 时可能会漏选。若要准确识别更高阻值的故障,可适当降低选线阈值 D_{set} 。

3) 弧光高阻接地

表 3 不同故障位置和过渡电阻下的测试结果

Tab. 3 Test results for different faulty locations and different impedances

故障位置	R_f/Ω	$\max A_1$	$\max A_2$	$\max A_3$	$\max A_4$	D	选线结果
F_7	0	15.059	0.630	24.338	13.963	1.62	3
	200	14.630	0.590	23.775	13.670	1.63	3
	1000	15.125	0.649	23.309	13.410	1.54	3
	2000	14.452	0.630	22.804	13.475	1.58	3
	3000	14.966	0.614	22.694	13.087	1.52	3
	5000	14.875	0.684	21.633	13.974	1.45	3
F_8	0	15.696	0.608	26.128	14.215	1.66	3
	200	15.428	0.575	25.972	13.408	1.68	3
	1000	15.147	0.563	24.671	13.811	1.63	3
	2000	14.688	0.605	23.204	14.007	1.58	3
	3000	16.093	0.534	23.124	13.556	1.44	3
	5000	15.262	0.540	22.718	13.288	1.49	3
F_9	0	15.304	0.689	27.380	13.539	1.79	3
	200	15.968	0.718	27.255	13.560	1.71	3
	1000	15.527	0.766	26.147	12.993	1.68	3
	2000	15.352	0.646	25.537	13.085	1.66	3
	3000	15.834	0.712	25.124	12.881	1.59	3
	5000	15.543	0.729	24.197	12.861	1.56	3

为研究弧光高阻接地对所提方法的影响,选取 Emanuel 故障模型^[26],如图 5 所示。图 5 中,两个直流电源 V_p 和 V_n 表示高阻故障弧光放电时导线与介质之间的电弧电压, R_p 和 R_n 表示接地电阻,选择不同的值可模拟高阻故障的不对称性。本文中设置 $R_p=550\Omega$, $R_n=500\Omega$, $V_p=3\,500\text{V}$, $V_n=3\,000\text{V}$,模拟弧光接地故障。设置故障初相角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° ,故障线路为 L_3 ,对应故障点为 F_7 ,故障接地电阻为 $2\,000\Omega$ 和 $5\,000\Omega$,各线路的暂态零序导纳值如表 4 所示。

根据表 4 的数据,弧光高阻接地故障时各线路暂态零序导纳值均增大,且随着故障初相角的增大

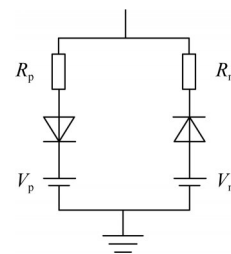


图 5 Emanuel 模型

Fig. 5 Emanuel model

表 4 弧光高阻接地故障的测试结果

Tab. 4 Test results of arc high impedance grounding fault

R_f/Ω	$\theta/(^{\circ})$	$\max A_1$	$\max A_2$	$\max A_3$	$\max A_4$	D	选线结果
2 000	0	25.317	1.828	53.720	20.539	2.12	3
	30	20.232	1.823	45.782	18.834	2.26	3
	60	18.633	1.779	39.788	16.603	2.14	3
	90	15.461	1.611	37.648	15.648	2.44	3
5 000	0	24.691	1.789	59.135	18.953	2.40	3
	30	21.329	1.726	50.528	17.820	2.37	3
	60	16.337	1.690	42.452	14.589	2.60	3
	90	14.908	1.571	39.080	12.869	2.62	3

而有所减小, D 值在一定范围内波动, 与表 2 数据相比故障识别的区分度更为明显。因此所提方法在弧光高阻接地情况下有较好的适用性。

4 算法适应性分析

实际系统中对于接地故障选线的影响因素, 包括噪声干扰、电流互感器 (current transformer, CT) 反接、网络拓扑结构变化、线路参数变化、采样频率变化等^[27]。下面结合上述各种情况对所提方法的适应性进行分析。

4.1 噪声干扰

采集实际故障信号时往往会遇到噪声干扰, 而对算法构成影响。本文在原始信号上叠加高斯白噪声, 模拟真实环境中的噪声干扰^[28]。

以 L_3 故障为例, 对应故障点为 F_7 , 设置故障接地电阻为 2 000 Ω , 故障初相角为 0°、30°、60°、90°, 设置信噪比为 20 dB 和 10 dB, 其暂态零序导纳值如表 5 所示。

根据表 5 中的数据, 可见噪声干扰增大时各线路的暂态零序导纳值有所增大, 但故障线路的暂态零序导纳最大值始终远大于非故障线路的值, 根据 D 值可以很好地选出故障线路, 抗噪声干扰的能力强。

4.2 CT 反接

在实际系统中, 互感器由于人为的失误可能会被反接^[29], 导致采集到的故障零序电流波形与实际波形极性相反。为此, 设置故障线路为 L_1 和 L_2 , 对应故障点为 F_1 和 F_4 , 故障接地电阻为 0 Ω , 故障初相角为 0°、30°、60°、90°, 在考虑 CT 反接的情况下对各线路的暂态零序导纳值进行了计算, 如

表 5 噪声干扰后的测试结果

Tab. 5 Test results after noise interference

信噪比	$\theta/(^{\circ})$	$\max A_1$	$\max A_2$	$\max A_3$	$\max A_4$	D	选线结果
无噪声	0	15.184	0.700	23.389	13.566	1.54	3
	30	14.452	0.630	22.804	13.475	1.58	3
	60	11.224	0.520	21.939	12.580	1.95	3
	90	9.389	0.491	17.191	7.548	1.83	3
20 dB	0	31.675	1.566	63.056	25.273	1.99	3
	30	26.900	1.130	59.256	21.660	2.20	3
	60	20.437	1.086	43.877	13.757	2.15	3
	90	13.255	0.779	35.714	10.999	2.69	3
10 dB	0	39.453	1.908	87.201	35.989	2.21	3
	30	29.872	1.783	62.523	21.064	2.09	3
	60	28.378	1.559	53.833	16.006	1.90	3
	90	15.362	1.313	49.341	11.847	3.21	3

表 6 所示。

由于所提方法的判据取的是暂态零序导纳绝对值, 结合表 2 和表 6 中的数据, 可见故障线路 CT 反接后各线路的暂态零序导纳值不变, D 值不变, 即所提方法不受 CT 极性的影响。

表 6 故障线路 CT 反接后的测试结果

Tab. 6 Test results after CTs of faulty line reverse

故障线路	$\theta/(^{\circ})$	$\max A_1$	$\max A_2$	$\max A_3$	$\max A_4$	D	选线结果
L_1	0	75.815	0.837	6.976	11.931	6.35	1
	30	54.928	0.747	6.115	8.740	6.28	1
	60	37.337	0.510	5.953	7.958	4.69	1
	90	35.103	0.339	4.235	6.498	5.40	1
L_2	0	15.184	59.880	8.463	15.010	3.94	2
	30	15.069	50.890	8.054	13.347	3.38	2
	60	14.609	33.092	7.147	10.903	2.27	2
	90	10.389	24.771	5.972	9.494	2.38	2

4.3 网络拓扑结构变化

为研究网络拓扑结构对所提方法的正确性, 假设线路 L_4 退出运行, 分别设置故障线路为 L_1 — L_3 , 对应故障点 F_1 、 F_4 、 F_7 , 故障接地电阻为 0 Ω , 故障初相角为 0°、30°、60°、90°, 各线路的暂态零序导纳值如表 7 所示。

结合表 2 和表 7 数据可知, 当线路 L_4 退出运行时网络拓扑结构发生变化, 各线路的暂态零序导纳值受到影响而有一定程度的降低, 造成 D 值在一定

表 7 不同拓扑结构的测试结果

Tab. 7 Test results for different topology structures

故障线路	$\theta/(^{\circ})$	$\max A_1$	$\max A_2$	$\max A_3$	$\max A_4$	D	选线结果
L_1	0	36.598	0.636	6.010		6.09	1
	30	31.006	0.442	6.055		5.12	1
	60	33.386	0.233	5.089		6.56	1
	90	25.218	0.206	3.584		7.04	1
L_2	0	11.207	28.618	3.426		2.55	2
	30	10.315	28.162	3.334		2.73	2
	60	10.067	18.579	3.041		1.85	2
	90	8.613	17.175	2.936		1.99	2
L_3	0	13.650	0.642	35.435		2.60	3
	30	11.390	0.607	22.460		1.97	3
	60	10.374	0.536	20.922		2.02	3
	90	9.397	0.472	16.796		1.89	3

范围内波动,但并不会造成故障特征差异的本质性变化,利用本文所提判据仍然能够可靠识别故障线路。因此,网络拓扑结构变化对所提方法的影响较小。

4.4 线路参数变化

为研究线路参数变化对所提方法的影响,将故障线路的分布参数进行 $\pm 10\%$ 的调整后对算法进行了测试。设置故障线路为 L_3 ,对应故障点 F_7 ,故障接地电阻为 $0\ \Omega$,故障初相角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 。各线路的暂态零序导纳最大值如表 8 所示。根据表 8 中的数据可见,线路参数改变时各线路暂

表 8 线路参数变化的测试结果

Tab. 8 Test results for line parameter change

线路参数变化/%	$\theta/(^{\circ})$	$\max A_1$	$\max A_2$	$\max A_3$	$\max A_4$	D	选线结果
0	0	16.484	0.705	38.458	15.076	2.33	3
	30	15.059	0.630	24.338	13.963	1.62	3
	60	12.885	0.611	21.433	12.097	1.66	3
	90	9.271	0.570	18.224	6.009	1.97	3
+10	0	17.323	0.779	38.311	14.836	2.21	3
	30	15.121	0.738	25.488	13.670	1.69	3
	60	11.255	0.649	19.355	11.087	1.72	3
	90	8.365	0.437	17.373	6.846	2.08	3
-10	0	18.238	0.775	39.279	16.943	2.15	3
	30	15.695	0.683	27.630	14.053	1.76	3
	60	12.303	0.619	20.306	12.407	1.65	3
	90	9.136	0.572	18.493	7.303	2.02	3

态零序导纳值变化量较小, D 值基本不变。因此,所提方法对线路参数的变化不敏感。

4.5 采样频率变化

为研究不同采样频率对所提方法的影响,分别设置采样频率为 $5\ \text{kHz}$ 、 $2.5\ \text{kHz}$ 和 $1\ \text{kHz}$ 进行了分析。其中,故障线路为 L_3 ,对应故障点 F_7 ,故障接地电阻为 $2\ 000\ \Omega$,故障初相角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 。各线路故障后半周波的暂态零序导纳最大值如表 9 所示。

表 9 不同采样频率的测试结果

Tab. 9 Test results for different sample frequencies

采样频率/ kHz	$\theta/(^{\circ})$	$\max A_1$	$\max A_2$	$\max A_3$	$\max A_4$	D	选线结果
5	0	15.184	0.700	23.389	13.566	1.54	3
	30	14.452	0.630	22.804	13.475	1.58	3
	60	11.224	0.520	21.939	12.580	1.95	3
	90	9.389	0.491	17.191	7.548	1.83	3
2.5	0	17.279	1.478	34.938	16.701	2.02	3
	30	16.671	1.413	27.667	10.359	1.66	3
	60	16.074	1.382	25.940	9.629	1.61	3
	90	14.570	1.203	24.485	8.607	1.68	3
1	0	19.272	1.699	35.028	12.212	1.82	3
	30	16.578	1.312	31.358	10.709	1.89	3
	60	11.830	1.230	24.404	8.489	2.06	3
	90	10.393	1.185	23.742	7.127	2.28	3

根据表 9 中的数据可见,采样频率降低时会对各线路的计算精度产生一定程度的影响,造成暂态零序导纳值在一定范围内波动。但同样不会对故障特征产生本质上的影响。因此,所提方法对采样频率的要求并不高。

综上所述,本方法在噪声干扰、故障线路 CT 反接、网络拓扑结构变化、线路参数变化、采样频率变化情况下选线效果良好,适应性强。

5 结语

针对谐振接地系统的故障选线难题,本文通过分析暂态零序导纳在故障线路和非故障线路的特征差异构建了暂态零序导纳最大均值指标,并基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件对所提方法的性能进行了全面的验证和测试。结果表明,本文所提方法具有耐受过渡电阻能力强的优势,仅需计算故障后半工频周期内的暂态零序导纳,计算量小,速度快,

易于实现。同时,在噪声干扰、电流互感器反接、网络拓扑结构变化、线路参数变化、采样频率变化等干扰因素下仍能实现正确的故障选线,抗干扰能力强。

参考文献

- [1] 杨以涵,齐郑.中压配电网单相接地故障选线及定位技术[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [2] 涂春鸣,侯玉超,郭祺,等.计及配电网线路阻抗影响的自适应接地故障消弧控制策略[J].电力系统自动化,2022,46(8):163-171.
TU Chunming, HOU Yuchao, GUO Qi, et al. Adaptive arc suppression control strategy for grounding fault considering influence of line impedance in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 163-171.
- [3] GHADERI A, MOHAMADPOUR H A, GINN H L I, et al. High-impedance fault detection in the distribution network using the time-frequency-based algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1260-1268.
- [4] 梅广,季天瑶,陈嘉伟,等.基于数学形态学和沃尔什变换的配电网高阻接地故障检测[J].广东电力,2024,37(4):10-23.
MEI Guang, JI Tianyao, CHEN Jiawei, et al. High impedance grounding fault detection for distribution network based on mathematical morphology and walsh transform [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 10-23.
- [5] 郭清滔,吴田.小电流接地系统故障选线方法综述[J].电力系统保护与控制,2010,38(2):146-152.
GUO Qintao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system [J]. Power system protection and control. 2010, 38(2): 146-152.
- [6] 韦明杰,石访,张恒旭,等.基于同步零序电流谐波群体比相的谐振接地系统高阻故障选线及区段定位方法[J].中国电机工程学报,2021,41(24):8358-8372.
WEI Mingjie, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. Feeder selection and section location of high impedance fault at resonant networks based on the phase differences between the synchronous harmonics of the zero sequence currents [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8358-8372.
- [7] 李浩,张禄亮.基于改进VMD和特征分布系数的配电网高阻接地故障检测方法[J].南方电网技术,2022,16(12):109-117.
LI Hao, ZHANG Luliang. High impedance grounding fault detection method for distribution network based on improved VMD and characteristic distribution coefficient [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 109-117.
- [8] 李鑫.配电线路单相接地故障定位及选线研究[D].保定:华北电力大学,2018.
- [9] 季鹏,陈芳芳,徐天奇,等.基于Spearman相关系数法与有分量法的高阻接地故障选线方法研究[J].山东电力技术,2022,49(12):8-13,31.
JI Peng, CHEN Fangfang, XU Tianqi, et al. Research on high-resistance grounding fault line selection method based on spearman correlation coefficient and active component [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(12): 8-13, 31.
- [10] 郭亮,屈新宇,王晓卫,等.基于改进Hough变换的消弧线圈接地配电网故障选线新方法[J].中国电力,2024,57(7):132-142.
GUO Liang, QU Xinyu, WANG Xiaowei, et al. A novel fault feeder selection method for resonant grounding distribution networks based on improved hough transform [J]. Electric Power, 2024, 57(7): 132-142.
- [11] 薛太林,靳贰伟,吴杰.基于五次谐波和混沌系统的谐振接地系统故障选线[J].电测与仪表,2022,59(1):176-182.
XUE Tailin, JIN Erwei, WU Jie. Fault line selection of resonant grounding system based on fifth harmonic and chaotic system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 176-182.
- [12] 栾晓明,武守远,贾春娟,等.基于改进零序导纳法的单相接地故障选线原理[J].电网技术,2022,46(1):353-360.
LUAN Xiaoming, WU Shouyuan, JIA Chunjuan, et al. Fault line selection principle of single-phase-to-ground fault based on improved zero-sequence admittance [J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 353-360.
- [13] 王尊贤,武守远,栾晓明.基于虚拟能量变化率的谐振接地系统高阻接地故障选线方法[J].电力系统自动化,2022,46(3):137-146.
WANG Zunxian, WU Shouyuan, LUAN Xiaoming. Fault line selection method for high-impedance grounding fault of resonant grounded system based on change rate of virtual energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 137-146.
- [14] 张玉玺,王增平,李振钊,等.基于特征频带暂态无功功率的配电网故障选线新方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(1):1-11.
ZHANG Yuxi, WANG Zengping, LI Zhenzhao, et al. A new method of fault line selection in a distribution network based on characteristic frequency band transient reactive power [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 1-11.
- [15] 庄胜斌,缪希仁,江灏,等.基于改进欧氏-动态时间弯曲距离的谐振接地配电网单相高阻接地故障选线方法[J].电网技术,2020,44(1):273-281.
ZHUANG Shengbin, MIAO Xiren, JIANG Hao, et al. A line selection method for single-phase high-impedance grounding fault in resonant grounding system of distribution network based on improved euclidean-dynamic time warping distance [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 273-281.
- [16] 王建元,张宇辉,刘铖.基于参数优化VMD和改进K聚类判断融合的配电网故障选线方法[J].南方电网技术,2023,17(7):135-145.
WANG Jianyuan, ZHANG Yuhui, LIU Cheng. Fault line selection method of distribution network based on the fusion of parameter optimized variational modal decomposition and improved K clustering criterion [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(7): 135-145.
- [17] 刘漫雨,吕立平,丁冬,等.基于TDFT非同步采样的首半波法小电流接地故障研究[J].电测与仪表,2018,55(23):22-28,33.
LIU Manyu, LÜ Liping, DING Dong, et al. Study of the small current neutral grounding fault based on TDFT sampling method of first half wave [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(23): 22-28, 33.
- [18] 邹长青,刘对,林兵,等.基于特征能量和BFAGA算法的含分布式电源配电网单相接地故障区段定位[J].高电压技术,

- 2024, 50(6): 2706 – 2715.
- ZOU Changqing, LIU Dui, LIN Bing, et al. Single-phase ground fault location of distribution network with distributed generator based on characteristic energy and BFAGA algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2706 – 2715.
- [19] 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.
- [20] 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-solidearthed network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70 – 75.
- [21] 杨帆, 金鑫, 沈煜, 等. 基于零序导纳变化的灵活接地系统接地故障方向判别算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 88 – 94.
- YANG Fan, JIN Xin, SHEN Yu, et al. Discrimination algorithm of grounding fault direction based on variation of zero-sequence admittance in flexible grounding system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 88 – 94.
- [22] 闫森, 黄纯, 刘映彤, 等. 基于零序功率比的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(3): 46 – 52.
- YAN Sen, HUANG Chun, LIU Yingtong, et al. Flexible fault selection method of grounding system based on zero-sequence power ratio [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3): 46 – 52.
- [23] 王睿章. 10kV 配电网单相接地故障选线方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [24] 冯光, 管廷龙, 王磊, 等. 利用电流 – 电压导数线性度关系的小电流接地系统接地故障选线[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 302 – 311.
- FENG Guang, GUAN Tinglong, WANG Lei, et al. Grounding fault line selection of non-solidly grounding system based on linearity of current and voltage derivative [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 302 – 311.
- [25] 邵文权, 程畅, 卫晓辉, 等. 利用暂态电流 Hausdorff 距离的谐振配电网故障选线方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 33 – 42.
- SHAO Wenquan, CHENG Chang, WEI Xiaohui, et al. Fault line selection scheme using the Hausdorff distance of transient current in resonant distribution networks [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 33 – 42.
- [26] 龙茹悦. 谐振接地系统单相高阻接地故障检测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [27] 邵翔, 郭谋发, 游林旭. 基于改进 DTW 的接地故障波形互相关度聚类选线方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 63 – 71, 78.
- SHAO Xiang, GUO Moufa, YOU Linxu. Faulty line selection method using mutual correlation cluster of grounding fault waveforms based on improved DTW method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 63 – 71, 78.
- [28] 魏科文, 张靖, 何宇, 等. 基于 VMD 和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 105 – 113.
- WEI Kewen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Single-phase grounding fault line selection in a resonant grounding system based on VMD and correlation clustering [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 105 – 113.
- [29] 刘朋跃, 邵文权, 弓启明, 等. 利用零序电流相位变化特征的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1830 – 1838.
- LIU Pengyue, SHAO Wenquan, GONG Qiming, et al. Fault line detection of flexible grounding system based on phase variation characteristics of zero-sequence current [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1830 – 1838.

收稿日期: 2023-09-30; 网络首发日期: 2024-04-30

作者简介:

吴江雄(1986), 男, 通信作者, 高级工程师, 学士, 研究方向为电力系统故障分析与继电保护, 252315563@qq.com;

郑茂然(1981), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制, ranran_zheng@126.com;

王欣(2001), 女, 硕士研究生, 研究方向为含分布式电源配电网故障分析与保护原理, epwangxin@mail.scut.edu.cn。