a

基于暂态零序电流时频特征量的配网故障选线方法

· 束洪春··朱梦梦··黄文珍··段锐敏··董 俊2.高 利3

(1. 昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650051;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程与自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 昆明理工大学 机电工程学院,云南 昆明 650093)

摘要:中性点经消弧线圈接地的配电网系统不同故障条件下发生单相接地故障时,健全馈线和故障馈线的 暂态零序电流在短窗时域和频域分布特性不同。利用各馈线故障后 1/4 工频周期时窗的故障暂态零序电流 数据,经小波包分解并将其重构至不同频段,进而求得的时频特征量能在一时频窗内充分反映信号的时频特 性,利用相关系数表征暂态零序电流的时频分布特性及其变化规律,并结合综合相关系数形成选线判据,实 现配电网单相接地故障选线。大量电磁暂态仿真表明,该方法准确、可靠。

关键词: 配电; 故障分析; 暂态零序电流; 故障选线; 时频特征; 综合相关系数

中图分类号: TM 713; TM 714.3 文献标识码: A

0 引言

中性点经消弧线圈接地的配电网系统发生单相 接地故障时,因故障电流较小和电弧不稳定因素,使 得基于稳态量的选线方法在实际应用时效果不甚理 想。此外,由于导线坠地、树木与架空馈线接触引起 的高阻故障时有发生,使得实际运行中常常存在漏 选和误选。而故障后的暂态分量相比稳态分量有很 大的优势,利用暂态量进行选线成为故障选线方法 之首选^[1]。

目前,众多学者已提出多种暂态量故障选线方法,主要利用暂态零序电流突变量、能量、幅值及极 性等^[2-13],使得选线效果不同程度上得到改善。利用 小波包分析工具能够很好地刻画暂态零序电流信号 的时频特征,文献[5-7]利用小波包分解,按照能量 最大的观点确定各条馈线故障暂态零序电流的特征 频带,并根据故障馈线与健全馈线的暂态电容电流 在特征频段的相似性最弱的原理,形成故障选线保 护判据。文献[14]提出了一种利用衰减直流分量进 行选线的方法,可以作为暂态高频分量不足时的辅 助选线判据。然而,配电网在缆-线混合馈线发生单 相接地故障时,由于电缆线路单位长度对地电容较 架空线路大很多倍,而且依频特性不同,同时缆-线 混合线路存在波阻抗不连续点,这些都增加了暂态 信号的复杂性。因此,在小角度故障情况下,流过健 全电缆线路与流过健全架空线路的故障零序电流相 似性变差且幅值有可能相近,此时暂态量很小,使得 选线困难。

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.001

由于消弧线圈的补偿作用,故障零序电流可能出 现倒相现象,以及电流互感器(TA)饱和引起二次电 流失真等多种因素的影响,本文选取各馈线故障后 1/4 工频周期时窗的故障暂态零序电流数据,经小波 包分解并将其重构至不同频段,进而求得的时频特 征量能在短时频窗内充分反映信号的时频特性,利 用相关系数表征零序电流信号的时频特性及其变化 规律,并结合综合相关系数构成选线判据。

1 中性点经消弧线圈接地的配电网单相接 地故障特征分析

中性点经消弧线圈接地的配电网发生单相接地 故障后可利用如图1所示的等值回路分析接地故障 暂态过程,考察故障接地电流的暂态特性。



图 1 经消弧线圈接地配电网单相接地时 暂态电流等值回路

Fig.1 Equivalent circuit of transient current for single-phase grounding fault of distribution system grounded with arc suppression coil

收稿日期:2013-07-04

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012-AA050213);国家自然科学基金资助项目(50977039,51267009, U1202233);云南省科技攻关项目(2011BA004);云南省重点 项目(2011FA032);高等学校博士学科点专项科研基金资助 项目(20105314110001)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA050213), the National Natural Science Foundation of China (50977039, 51267009, U1202233), the Scientific and Technological Key Projects in Yunnan Province (2011BA004), the Key Projects in Yunnan Province (2011FA032) and the Research Fund for Doctoral Program of Higher Education of China (20105314110001)

在分析暂态电容电流时由于其自由振荡频率很高,同时消弧线圈的电感 $L \ge L_0$,因此等效电路图中的 $r_L = L$ 可忽略不计。单相接地故障发生瞬间,就相当于一个零序正弦电压 $u_0(t) = U_{\rm m} \sin(\omega t + \varphi)$ 接入图 1 所示等效电路中,则:

$$R_0 i_c + L_0 \frac{\mathrm{d}i_c}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c \,\mathrm{d}t = U_\mathrm{m} \sin(\omega t + \varphi) \qquad (1)$$

经拉普拉斯变换得到电容电流瞬时表达式为:

$$\begin{aligned} \vec{i}_{C} &= \vec{i}_{C}' + \vec{i}_{C}'' = I_{Cm} \bigg[\left(\frac{\omega_{f}}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_{f} t \right) e^{-\delta t} + \\ &\cos(\omega t + \phi) \bigg] \end{aligned}$$

$$(2)$$

消弧线圈支路的暂态电感电流表达式为:

$$i_{L} = I_{Lm} \left[\cos \phi e^{-t/\tau_{L}} - \cos(\omega t + \phi) \right]$$
(3)

由上述暂态电容电流和暂态电感电流的分析可得,暂态接地故障电流 *i*₄的数学表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{d} &= i_{C} + i_{L} = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + \\ I_{Cm} \left(\frac{\omega_{f}}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_{f} t \right) e^{-t/\tau_{C}} + \\ I_{Lm} \cos \varphi e^{-t/\tau_{L}} \end{aligned}$$
(4)

式(4)中第2个等号右侧第1项为接地故障电 流稳态分量;其余为接地故障电流的暂态分量,等于 电容电流的暂态自由振荡分量与电感电流的暂态直 流分量之和。

经消弧线圈接地的配电网故障暂态零序电流的 频率范围约为0~3000 Hz,在实际配电网络中馈线 的零序阻抗远小于电容的容抗,可以忽略不计,单相 接地故障时零序网络可以简化为图2所示^[15]。



图 2 单相接地故障零序网络简化图 Fig.2 Simplified zero-sequence network for single-phase grounding fault

可简化得到故障馈线 i 零模电流、电压关系为:

$$i_{0i} = -C_{0i} \frac{\mathrm{d} u_0}{\mathrm{d} t}$$
 $i = 1, 2, \cdots, n$ (5)

而对于健全馈线 i 零模电流、电压关系为:

$$E_{0i} = C_{0i} \frac{\mathrm{d}\,u_0}{\mathrm{d}\,t} \quad i = 1, 2, \cdots, n$$
 (6)

其中, i_{α} 为流过线路i的零模电流; u_{0} 为母线零模 电压; $U_{f_{0}}$ 为故障点虚拟电源在零序网络上的压 降; $R_{f_{0}}$ 为零模过渡电阻;L为消弧线圈零模电感; R 为消弧线圈串联零模电阻;C₀ 为第 *i* 条线路的 零模分布电容。

从式(5)和式(6)可以看出,故障馈线的暂态零 序电压导数与零序电流极性相反,健全馈线的暂态 零序电压导数与零序电流极性则相同。暂态零序电 流的幅值主要与馈线的零序分布电容相关。图3为 小电流接地系统选线装置记录下的2次故障录波波 形,其中图3(a)为稳定型接地故障,图3(b)为不稳 定型接地故障,而实际中电缆线路的存在使得不稳 定型故障常有发生。

-V	the last lost
Y	
(a) 稳定故障	(b) 不稳定故障

图 3 配电网单相接地故障实测波形 Fig.3 Measured waveforms of single-phase grounding fault in distribution system

2 单相接地故障暂态零序电流时频特征分析

配电网经消弧线圈接地系统发生单相接地故障 后,量测端检测到的暂态零序电流分量是由不同频 率分量构成的非线性、非平稳信号。小波包分解技术 能够把任意信号映射到一个由小波伸缩而成的一组 基函数上^[16],信息量完整无缺,在通道范围内得到分 布在不同频带的分解序列,更加清晰地刻画出故障 暂态信号某频段的时频特性,可以为故障选线进行 特征信息处理提供依据,所以利用小波包理论结合 能量的观点,提高选线的准确性。

2.1 暂态零序电流时频特征量分析

当配电网系统发生单相接地故障时,对故障暂 态零序电流按照适当的频带宽度采用小波包分解故 障暂态信号采样序列,按照式(7)计算分解后各频带 信号对应的幅值。

$$E_k = \sum \left[\omega_k^{(j)}(n) \right] \tag{7}$$

其中, $\omega_k^{(j)}(n)$ 为小波包分解第(j,k)子频带下的系数, 每个子频带下共有n个系数,j为小波包分解层数,k为小波包分解的第k个节点。

定义暂态零序电流时频特征量为:

$$L_{\rm TF}=$$

$$\left[\sum_{n=1}^{w_{\mathrm{T}}} E_1(n), \sum_{n=1}^{w_{\mathrm{T}}} E_2(n), \cdots, \sum_{n=1}^{w_{\mathrm{T}}} E_k(n), \cdots, \sum_{n=1}^{w_{\mathrm{T}}} E_{w_{\mathrm{F}}}(n)\right]^{\mathrm{T}}(8)$$

其中,w_T和w_F分别为时间窗和频率窗的长度。时频 特征量能够较全面地反映暂态零序电流的时频变化 特性。经消弧线圈接地配电网系统在相电压过峰值 发生单相接地故障时,暂态零序电流主要是高频电 容分量,暂态特征十分明显;当配电网在相电压过零

0

点发生单相接地故障时,暂态零序电流主要是电感分量,暂态特征不明显,但是由于消弧线圈电感所引起的故障馈线衰减直流分量较大,健全馈线衰减直流 分量较小,其只流过故障馈线而不流过健全馈线;当 发生高阻接地故障时,暂态高频分量小,衰减速度 快。综上,不同故障条件下暂态零序电流的时频特征 分布则不相同。

利用时频相关系数来考察同一时频窗内不同馈 线暂态零序电流的时频特征量的相似程度。设某 2 条馈线的暂态零序电流的时频特征量分别为 L_{ITF,x}、 L_{ITF,y},其中 x、y 为系统中任意 2 条馈线,则可以定义 2 条馈线之间的时频特征相关系数为:

$$\rho_{xy} = \left| \frac{\text{Cov}(L_{\text{TF},x}, L_{\text{TF},y})}{\sqrt{D(L_{\text{TF},x})} \sqrt{D(L_{\text{TF},y})}} \right|$$
(9)

其中, Cov($L_{\text{IF},x}, L_{\text{IF},y}$)为时频特征量 $L_{\text{IF},x}, L_{\text{IF},y}$ 的协方 差, Cov($L_{\text{IF},x}, L_{\text{IF},y}$)= $E(L_{\text{IF},x} \cdot L_{\text{IF},y})$ - $E(L_{\text{IF},x})E(L_{\text{IF},y})$, $\sqrt{D(L_{\text{IF},x})}, \sqrt{D(L_{\text{IF},y})}$ 为时频特征量的均方差,其中 $D(L_{\text{IF},x})=E(L_{\text{IF},x}^2)-E^2(L_{\text{IF},y}), D(L_{\text{IF},y})=E(L_{\text{IF},y}^2)-E^2(L_{\text{IF},y})$ 。 ρ_{xy} 的取值为 0~1,当 2 条馈线之间的时频特征量越 相似,即 2 条馈线的暂态零序电流的时频分布越接 近,则 ρ 值越大^[17]。

2.2 暂态零序电流时频特征分布

建立 110 kV/35 kV 配电网单相接地故障模型 如图 4 所示,Z 型变压器中性点通过消弧线圈串联 电阻接地。架空馈线 l_1 =15 km, l_3 =18 km, l_5 =30 km; 线-缆混合馈线 l_4 =17 km,其中架空馈线 12 km,电 缆 5 km;电缆馈线 l_2 =6 km, l_6 =8 km。架空馈线为 JS1杆型,LGJ-70 型导线,档距为 80 m,电缆馈线为 YJV23-35/95 型电缆。



Fig.4 Resonantly earthed distribution system

该电网中的 G 为无限大电源;T 为主变压器, Yn/d11 接线,变比为 110 kV/35 kV;Tz 是 Z 型变压器;L 为消弧线圈电感值;R 为消弧线圈的阻尼电阻。馈线采用架空线路、架空线-电缆混合线路和电缆线路 3 种线路。 设图 4 所示配网的电缆馈线 L₂ 距离母线 3 km 处发生 AG 故障,故障初始相角为 90°,故障过渡电 阻为 20 Ω 时,采样频率为 10 kHz,仿真一次侧检测 到故障馈线 L₂ 及健全馈线 L₄ 的零序电流如图 5 所示。





当故障初始相角为 90°时,故障暂态特征明显, 暂态零序电流主要是高频电容分量,健全馈线与故 障馈线零序电流波形相似度较低。利用小波包分析 得到的健全馈线 L₄ 及故障馈线 L₂ 的零序电流时频 特征分布如图 6 所示。



一般配电网故障电弧的过渡电阻小于 2 Ω,但 是由于导线坠地、树木与架空馈线接触引起的高阻 故障时有发生,尤其是当故障初始相角为 0° 时,使得 常规的选线方法难以检测此类故障。设图 3 所示配 网的电缆馈线 L₂距离母线 3 km 处发生 AG 故障,故 障初始相角为 0°,故障过渡电阻为 1000 Ω 时,采样 频率为 10 kHz,仿真一次侧检测到故障馈线 L₂ 及健 全馈线 L₄ 的零序电流如图 7 所示。相对于低阻故障 而言,高阻故障时暂态高频分量小,衰减速度快。



利用小波包分析得到的健全馈线 L₄ 及故障馈 线 L₂ 的零序电流时频特征分布如图 8 所示。



3 基于时频特征量的故障选线原理

前文理论与仿真分析表明,时频特征相关系数能 够很好地表征各馈线暂态零序电流之间的时频特征 分布相似度。但当系统出现不同条件下的单相接地 故障时,可能会导致时频相关系数差别很小,故需要 借助暂态零序电流时频能量观点更加完整、全面地 描述各馈线零序电流的时频特性差异。定义时频特 征相似度为:

$$P_{xy} = \rho_{xy} \frac{E(L_{\text{TF},x})}{E(L_{\text{TF},y})}$$
(10)

其中, E(L_{IF,x})和 E(L_{IF,y})为时频特征量的期望, P_{xy} 表征 2条馈线暂态电流行波时频特征的总体分布 相似度。

用时频相似度 *P_{xy}*进行故障选线的判定需要做 多次判断。由时频相似度 *P_{xy}*求取每条线路相对于其 他线路的综合相关系数 ρ_i(*i*=1,2,…,*n*),利用 ρ_i形 成直观简便的故障选线判据,加剧了故障馈线与健 全馈线之间的差异性,同时提高了选线裕度。定义馈 线*i*的综合相关系数^[18]为:

$$\rho_{li} = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{j=1}^{n} P_{ij} - P_{i=j} \right)$$
(11)

其中, $\sum_{j=1}^{n} P_{ij}$ 为馈线 *i* 与自身及其他所有馈线的相似度的和; $P_{i=i}$ 为馈线 *i* 与自身的相似度, 其值为 1。

基于上述选线原理,经中性点消弧线圈配电网接

地故障时,分3个步骤实现故障选线。

a. 当零序电压超过门槛值时,选取 5 ms 的暂态 零序电流数据利用 db10 进行 3 层小波包分解重构, 计算其时频特征量。

b. 求取时频相关系数,然后构造时频相似度并 求取各条馈线综合相关系数。

c. 将综合相关系数 ρ_{li} 最大的前 3 个按照大小 排序为 : ρ_{la} 、 ρ_{lb} 、 ρ_{lc} ,当满足 ρ_{la} > ρ_{lb} + ρ_{lc} 时,判断 ρ_{la} 对应 的馈线为故障馈线,否则,判断为母线故障。具体选 线流程如图9所示。



图 9 故障选线算法流程图 Fig.9 Flowchart of faulty line selection algorithm

4 仿真验证与适应性分析

采用本文所述的选线方法,图 4 所示配电网系统 距离馈线 L_2 始端 3 km 处发生 AG 单相接地故障,接 地电阻 50 Ω ,故障初始相角 90°,采样频率 10 kHz。 从故障后选取 5 ms 的暂态零序电流数据,利用 db10 进行 3 层小波包分解重构,求取各馈线的时频特征 量 $L_{\rm IF}$ 和时频特征相似度矩阵,形成综合相关系数矩 阵 P_{ij} :

$$P_{ij} =$$

1	0.0014	0.2585	0.0222	0.0225	0.0019
569.63	1	229.54	44.436	15.996	1.364
1.342	0.0029	1	0.2441	0.0466	0.004
1.4203	0.007	0.8557	1	0.1097	0.0094
35.75	0.0625	14.27	2.733	1	0.0853
418.73	0.733	167.48	32.208	11.72	1

 $i=1,2,\cdots,6; j=1,2,\cdots,6$ (12)

 $P_{1i} = \begin{bmatrix} 0.0613 & 172.1959 & 0.3280 & 0.4804 & 10.5826 \\ 126.1762 \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \cdots, 6$

综合相关系数最大的前3个按照大小顺序排列 分别为: P_2 =172.1959, P_6 =126.1762, P_5 =10.5826,因 此, P_2 > P_5 + P_6 成立, P_2 对应的馈线 L₂ 为故障馈线。由 此可见,基于暂态电流时频特征量能正确进行选线。 限于篇幅,本文只列出部分结果,如表1所示。

考虑选线算法在实际应用中可能存在的影响 因素,仿真验证在以下不同故障情况下能实现正确 选线。

4.1 电弧故障

馈线 L₂ 在距母线 4 km 处发生电弧故障的选线 结果如表 2 所示。



表 1 故障选线结果 Tab.1 Results of faulty line selection

			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
故障馈	$\delta K/\Omega$	$\theta/(^{\circ})$	综合相关系数	选线结果
L_6	100	0	[0.2161 4.2957 0.3044 2.4557 9.1460 25.5643]	正确
L_5	200	30	[0.2162 4.3057 0.3231 2.4927 20.8796 5.7429]	正确
L_2	20	90	[0.1135 68.2726 0.6857 1.8444 0.0179 4.2264]	正确
L_3	500	30	[0.0762 2.1950 30.1543 2.2117 5.8408 2.9734]	正确
L_4	200	30	[0.1741 4.3203 0.3619 19.0925 8.7451 5.2780]	正确
L_1	20	60	[29.4742 3.1091 0.2007 1.5968 0.4043 4.7677]	正确
母线	20	0	[0.3167 5.5926 0.4279 3.5602 0.8214 7.5560]	正确
	20	90	[4.8400 62.7906 0.0116 1.4534 96.5338 66.4349]	正确

表 2 馈线 L₂ 电弧故障的选线结果

Tab.	2 Rest	ults of	arc-g	groun	ding	fault in	line L ₂	
$\theta/(^{\circ})$		纺	合相	关系数	女		选线结果	
0	[0.24	38.05	1.17	3.79	0.35	2.42]	正确	•
90	[0.83	53.65	0.02	3.53	4.08	32.29]	正确	

4.2 缆-线混合馈线故障

当缆-线混合馈线发生小角度故障时候,故障暂态分量小,故障信号难以检测。图 3 所示系统距离馈线 L_4 始端 4 km 处发生 AG 单相接地故障,故障初始角为 0°,过渡电阻 10 Ω ,利用本文所述方法得到各馈线 的 综 合 相 关 系 数 为 : [0.297 3 5.602 9 0.408 4 16.9188 0.7945 7.6200], $P_4 > P_2 + P_6$ 成立,馈线 L_4 为故障线路。

5 结语

本文提出一种基于暂态零序电流时频特征量的 配电网单相接地故障选线,从零序电流的时域和频 域分析入手,利用小波包分解与重构更好地刻画了 故障馈线与健全馈线的时频特征差异性。该方法能 够有效克服缆-线混合馈线小故障角时暂态分量小 的特点。同时发生短线路接地故障时,能避免非故 障长线路电容电流的影响,实现正确选线。

参考文献:

- 東洪春,刘娟,王超,等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线 新方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(11):72-76.
 SHU Hongchun,LIU Juan,WANG Chao, et al. Adaptive method for fault circuit selection in arc suppression coils system by using transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2006, 30(11):72-76.
- [2] 王伟,焦彦军. 暂态信号特征分量在配网小电流接地选线中的应用[J]. 电网技术,2008,32(4):96-100.

WANG Wei, JIAO Yanjun. Application of characteristic components of transient signal in grounded wire detection of ineffectively earthed distribution systems [J]. Power System Technology, 2008,32(4):96-100.

[3] 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.

- [4] 東洪春,赵文渊,彭仕欣. 配电网缆-线混合线路故障选线的 HHT 检测方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):4-9.
 SHU Hongchun,ZHAO Wenyuan,PENG Shixin. Faulty line selection based on HHT detection for hybrid distribution network
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):4-9.
- [5] 東洪春,彭仕欣,赵兴兵. 一种配电网线-缆混合线路故障选线新方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(11):61-65.
 SHU Hongchun,PENG Shixin,ZHAO Xingbing. A new fault line detection method for hybrid transmission lines of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(11): 61-65.
- [6] 戴剑锋,张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究
 [J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):44-47.
 DAI Jianfeng,ZHANG Yanxia. Study on adaptively choosing fault line under single-phase to ground fault based on analysis

fault line under single-phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (5):44-47.

- [7] 王耀南,霍百林,王辉,等. 基于小波包的小电流接地系统故障选 线的新判据[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):54-58.
 WANG Yaonan,HUO Bailin,WANG Hui,et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(6):54-58.
- [8] 李斌,東洪春.基于瞬时零序功率的谐振接地系统单相接地选线 新方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):65-71.
 LI Bin,SHU Hongchun. Fault line detection based on instantaneous zero-sequence power for resonant earthed system[J].
 Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):65-71.
- [9] 董新洲,毕见广. 配电线路暂态行波的分析和接地选线研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):1-6.

DONG Xinzhou, BI Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4):1-6.

- [10] 東洪春,彭仕欣. 配网缆-线混合线路故障选线相对能量法[J].
 电力自动化设备,2009,29(11):1-5.
 SHU Hongchun,PENG Shixin. Faulty line detection by relative energy method for hybrid transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):1-5.
- [11] 東洪春,徐亮,彭仕欣,等. 谐振接地电网故障选线相关分析法
 [J]. 电力自动化设备,2008,28(9):6-9.
 SHU Hongchun,XU Liang,PENG Shixin,et al. Correlation analysis for faulty feeder detection in resonant earthed system
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(9):6-9.
- [12] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等.应用小波检测故障突变特性实现 配电网小电流接地故障选线保护[J].中国电机工程学报,2001,21 (10):78-82.

JIA Qingquan,LIU Lianguang,YANG Yihan,et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Pro-

ceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.

6

- [13] 徐靖东,张保会,尤敏,等. 基于暂态零序电流特征的小电流接 地选线装置[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):101-105.
 XU Jingdong,ZHANG Baohui,YOU Min,et al. Fault line selection device for non-solid earthed network based on transient zero-sequence current features[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):101-105.
- [14] 東洪春,刘娟,司大军,等.一种自适应消弧线圈接地系统故障选线的实用新方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(13):64-68.
 SHU Hongchun,LIU Juan,SI Dajun,et al. An adaptive new method for fault line selection in litter current grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(13): 64-68.
- [15] 束洪春,彭仕欣,李斌,等.利用测后模拟的谐振接地系统故障 选线方法[J].中国电机工程学报,2008,28(16):59-64.
 SHU Hongchun,PENG Shixin,LI Bin,et al. A new approach to detect fault line in resonant earthed system using simulation after test[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(16):59-64.
- [16] 庞清乐,孙同景,孙波,等. 基于小波包分析的配电网故障选线 新方法[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):19-22.

PANG Qingle, SUN Tongjing, SUN Bo, et al. Faulty Line detec-

tion based on wavelet packet analysis for distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(4):19-22.

[17] 林圣. 基于暂态量的高压输电线路故障分类与定位方法研究
[D]. 成都:西南交通大学,2011.
LIN Sheng. Study on fault classification and fault location methods based on transient signals for high voltage transmission lines[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2011.

[18] 束洪春. 配电网络故障选线[M]. 北京:机械工业出版社,2008: 93-101.

作者简介:

束洪春(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及 DSP 应用等方面的教研工作(E-mail: kmshc@sina.com.cn);

朱梦梦(1986-),男,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向 为新型继电保护与故障测距:

黄文珍(1989-),女,福建建瓯人,硕士研究生,研究方向 为新型继电保护与故障测距。

Faulty line selection based on time-frequency characteristics of transient zero-sequence current

SHU Hongchun¹, ZHU Mengmeng¹, HUANG Wenzhen¹, DUAN Ruimin¹, DONG Jun², GAO Li³

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, China)

Abstract: When single-phase grounding fault occurs in the power distribution system with its neutral point grounded through arc suppression coil, the distribution characteristics of transient zero-sequence current in short-window time-domain and frequency-domain are different between sound feeder and faulty feeder. The fault transient zero-sequence current data of different feeders are extracted for the last quarter of power cycle, which are then decomposed by the wavelet packet and reconstructed into different frequency bands. The time-frequency characteristics obtained for a short window can fully reflect the time-frequency characteristics of the signal. The correlation coefficients are then used to characterize the time-frequency distribution and variation law of transient zero-sequence current, which are combined with the complex correlation coefficient to form the criterion for faulty line selection. Electromagnetic transient simulations show the proposed method of faulty line selection is accurate and reliable.

Key words: electric power distribution; failure analysis; transient zero-sequence current; faulty line selection; time-frequency characteristics; comprehensive correlation coefficient