

DOI: 10.7667/PSPC160099

基于小波分析理论的特高压输电线路故障选相研究

肖文龙¹, 王维博¹, 刘勇², 谢东², 郑永康³, 张栋¹

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 国网四川省电力公司阿坝供电公司, 四川 茂县 623200;
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 为了满足特高压输电线路的超高速保护要求, 基于小波分析能检测故障信号中奇异信号突变时刻及其大小的特点, 提出了一种故障选相方法。首先为了消除各相间的耦合影响, 该方法将暂态故障电流经相模变换, 然后用离散小波变换(DWT)提取出各模故障电流中的奇异成分并求出其模极大值, 模极大值经归一化处理作为选相方法的判据因子。最后根据模故障电流特征总结出不同故障类型下判据因子之间的关系, 构造一种新型的特高压故障选相方法。通过 PSCAD 建模与 Matlab 计算, 验证了所提选相方法受暂态故障信号幅值的干扰较小, 自适应能力强, 耐过渡电阻能力强, 选相速度快且准确, 能简单、有效地实现特高压输电线路的超高速保护。

关键词: 小波分析; 特高压; 故障选相; 超高速保护; PSCAD 仿真

Research of fault phase selection on UHV transmission lines based on wavelet analysis

XIAO Wenlong¹, WANG Weibo¹, LIU Yong², XIE Dong², ZHENG Yongkang³, ZHANG Dong¹

(1. School of Electrical and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;
2. Aba Power Company, Sichuan Electric Power Company, Maoxian 623200, China;
3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: To meet the requirements of ultra-high speed protection on UHV transmission lines, this paper proposes a fault phase selection method based on the characteristic of wavelet analysis which can detect the mutations' time and size of singular signal in fault signal. Firstly, this method transforms the transient fault current into model fault current to eliminate the impact of the various phases' coupling, then extracts its singular ingredients and modulus maximum by discrete wavelet transform (DWT), treats the normalized modulus maximum as the criterion factors. Finally, it summarizes the relationship among criterion factors according to the characteristics of mode fault current, and constructs a new UHV fault phase selection method. Through PSCAD simulation and Matlab calculation, this method is proved that it is disturbed less by amplitude of the transient fault signal, and it has a good adaptive capacity and a strong ability for fault resistance, and its speed is also fast and accurate, the proposed approach can be implemented simply and effectively.

Key words: wavelet analysis; UHV; fault phase selection; ultra-high speed protection; PSCAD simulation

0 引言

随着社会经济的发展对电能需求日益增长, 特高压交流输电因具有输送容量大、距离远、损耗低、占地少、运行方式灵活等优势, 目前被大量研究并初步投入试验运行^[1-4], 特高压输电线路的保护也需要进行相应的研究^[5-6]。

传统的输电线路保护装置主要是基于工频量, 采用快速保护与稳态保护相结合的方案, 但从实际

应用情况看, 其选相速度不能满足快速跳闸的要求, 且易受系统运行方式和负荷电流的影响, 选相灵敏度低, 应用范围较小^[7-9]。近年来, 基于故障暂态量的超高速保护快速发展成为研究的热点, 但其易受外界干扰, 容易导致误选相^[10-11]。许多学者将新兴的数学工具和数字信号处理技术与暂态量选相方法相结合, 提出了基于行波故障特征、相关分析原理、神经网络、支持向量机等新型的选相方法^[12-15], 克服了传统方法的不足, 提高了选相速度。

有学者提出用小波分析的方法处理暂态行波的故障选相新方法, 文献^[16]提出基于小波变换的行波故障选相方法, 采用小波分析法辨识故障电流

基金项目: 国网四川省电力公司资助项目(03012841); 西华大学研究生创新基金资助项目(ycjj2015100)

模极大值进行故障选相; 文献[17]提出形态滤波与小波变换相结合的选相方法, 仅用一层小波分析即能识别行波模极大值进行选相; 文献[18]提出基于小波能量熵和最小二乘支持向量机(LS-SVM)的选相新方法, 有较强的通用性和实用性。暂态行波用于故障选相具有超高速的优势, 但行波幅值易受外界干扰, 会导致误选相。

本文利用小波分析适合检测故障信号中夹带的奇异信号并展示其成分与大小的特点, 先将暂态故障电流经相模变换转换成模故障电流用以消除相间的耦合影响, 然后经离散小波变换分解得到一个近似信号和一个细节信号(即奇异信号), 求出各模故障电流细节信号的模极大值。为减小暂态故障电流幅值对选相结果的干扰, 本文将各模极大值进行归一化处理, 并作为本文选相的判据因子, 根据发生不同的故障类型时的模故障电流特征, 总结出不同故障时各判据因子之间的关系, 最后将这种关系作为选相判据建立一种选相方法, 并在 PSCAD 中建立特高压仿真模型, 运行得到三相故障电流仿真数据, 最后在 Matlab 中进行离散小波变换和归一化处理, 验证本文选相方法的可靠性与准确性。

1 小波分析理论

小波分析理论是一种信号的时间-频率分析方法, 它可进行多分辨率分析, 且具有在时频两域都能表征信号局部特性的能力。其在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较低的时间分辨率和较高的频率分辨率, 能探测信号中夹带的奇异信号并展示其成分与大小, 被誉为分析信号的显微镜, 它很适合用来分析具有高频、瞬时突变特点的电力系统暂态信号, 且具有较好的实时性^[17]。

1.1 离散小波变换

设 $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ($L^2(\mathbb{R})$ 表示平方可积的实数区间, 即能量有限的信号空间), 若 $\psi(t)$ 的 Fourier 变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足条件^[19]:

$$C_{\psi} = \int_{\mathbb{R}} |\omega|^{-1} |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty \quad (1)$$

则称函数 $\psi(t)$ 为母小波函数, $\psi(t)$ 经伸缩和平移后得到一个小波序列, 如式(2)。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a \neq 0 \quad (2)$$

式中: a 为尺度因子; b 为平移因子。

函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 关于母小波 $\psi(t)$ 的连续小波变换定义为

$$W_a^b f(t) = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中, $\overline{\psi}$ 为 ψ 的共轭复函数。

实际应用中多采用小波变换的离散形式, 取 $a=2^j$, $k=2^j b$ ($j, k \in \mathbb{Z}$) 则得函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 关于母小波 $\psi_{j,k}(t)$ 的离散二进制小波变换形式为

$$W_j^k f(t) = 2^{-j/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi}(2^{-j}t - k) dt \quad (4)$$

1.2 多尺度分析

多尺度分析是将原始信号用正交变换在不同尺度下进行分解, 分解得到原始信号在不同尺度下连续逼近的近似信号和细节信号, 然后采用 Mallat 快速算法将暂态信号 $f(t)$ 分解成不同频率成分^[17]。

$$f(t) = A_j f(t) + \sum_{j=1}^J D_j f(t) \quad (5)$$

式中: J 为小波分解的层数, $j=1, 2, \dots, J$; $A_j f(t)$ 为在尺度 j 下的近似信号, 即原始信号 $f(t)$ 的频率不超过 2^j 的低频分量; $D_j f(t)$ 为在尺度 j 下的细节信号, 即信号的频率介于 2^j 与 2^{j+1} 之间的高频分量。

1.3 模极大值

假设函数 $f(t)$ 的小波函数为 $W_j^k f(t)$, 在尺度 j 下, 若有点 (j, k) 满足 $\partial(W_j^k f(t_0))/\partial t_0 = 0$, 且在 t_0 的某一邻域内, 对任意一点 t_n 都能满足 $|W_j^k f(t_n)| \leq |W_j^k f(t_0)|$, 则称 t_0 为小波变换 j 尺度下的模极大值点, $W_j^k f(t_0)$ 是小波变换 j 尺度下的模极大值。模极大值的极性表示突变的变化方向, 其大小表示突变的强度。

本文用 db5 函数作为母函数, 为减少计算, 对暂态模故障信号进行尺度为 1 的离散小波变换分解, 分解得到一个近似信号与细节信号, 由于信号出现突变时, 其细节信号在该突变时刻会出现一个模极大值, 可根据对细节信号模极大值的检测来判断是否发生故障及故障类型。

2 故障选相原理

电力系统输电线路发生故障时, 变电站保护装置检测的电气量可看成是故障分量与非故障分量的叠加, 而故障分量可由在故障点的故障附加网络求解, 相当于把电压源短接、电流源开路, 然后在故障点叠加一个与故障前电压幅值相等、极性相反的电压源, 本文仿真实验中电流故障分量是在故障点处直接测出的。由于实际的三相线路中存在电磁耦合, 为克服暂态故障信号波形畸变及突发性干扰的影响, 一般会将故障相量转换成故障模量用以消除各相间的耦合影响。与文献[17]不同, 本文在暂态电流故障分量的基础上, 采用 Clarke 变换 0 模和 α 模分量对故障相量进行解耦, 分别以 A, B, C 三

相的暂态电流故障分量为基准相进行 α 模变换, 其相模变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_0 \\ \dot{i}_{\alpha A} \\ \dot{i}_{\alpha B} \\ \dot{i}_{\alpha C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \dot{i}_A 、 \dot{i}_B 、 \dot{i}_C 为三相电流故障分量; \dot{i}_0 、 $\dot{i}_{\alpha A}$ 、 $\dot{i}_{\alpha B}$ 、 $\dot{i}_{\alpha C}$ 为电流故障分量经相模变换后的四个模故障电流分量; 后文分别简记为 \dot{i}_0 、 \dot{i}_1 、 \dot{i}_2 、 \dot{i}_3 。

2.1 模故障分量特征

根据发生不同的故障类型所对应的边界条件不同, 不同故障时, 各模故障电流分量都会呈现各自不同的特征, 由此得到不同故障类型下的模故障分量特征(如表 1 所示)。

表 1 不同故障下的模故障分量特征
Table 1 Characteristics of mode fault components

故障类型	模故障分量特征			
	\dot{i}_0	\dot{i}_1	\dot{i}_2	\dot{i}_3
AG	\dot{i}_A	$2\dot{i}_A$	$-\dot{i}_A$	$-\dot{i}_A$
BG	\dot{i}_B	$-\dot{i}_B$	$2\dot{i}_B$	$-\dot{i}_B$
CG	\dot{i}_C	$-\dot{i}_C$	$-\dot{i}_C$	$2\dot{i}_C$
ABG	$\dot{i}_A + \dot{i}_B$	$2\dot{i}_A - \dot{i}_B$	$2\dot{i}_B - \dot{i}_A$	$-\dot{i}_A - \dot{i}_B$
ACG	$\dot{i}_A + \dot{i}_C$	$2\dot{i}_A - \dot{i}_C$	$-\dot{i}_A - \dot{i}_C$	$2\dot{i}_C - \dot{i}_A$
BCG	$\dot{i}_B + \dot{i}_C$	$-\dot{i}_B - \dot{i}_C$	$2\dot{i}_B - \dot{i}_C$	$2\dot{i}_C - \dot{i}_B$
AB	0	$3\dot{i}_A$	$-3\dot{i}_A$	0
AC	0	$-3\dot{i}_C$	0	$3\dot{i}_C$
BC	0	0	$3\dot{i}_B$	$-3\dot{i}_B$
ABC	0	$3\dot{i}_A$	$3\dot{i}_B$	$3\dot{i}_C$

2.2 选相判据

将模故障分量 \dot{i}_0 、 \dot{i}_1 、 \dot{i}_2 、 \dot{i}_3 经小波变换求得各模极大值分别为 M_0 、 M_1 、 M_2 、 M_3 , 分别对其进行归一化处理(即 $\varepsilon_i = M_i / |\max(M_1, M_2, M_3)|$, $i=0, 1, 2, 3$)得到四个判据因子分别为 ε_0 、 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 (ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别对应 A、B、C 三相)。根据表 1 中的模故障分量特征, 结合模极大值反应故障时刻局部突变特性, 采用 ε_0 、 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 作为识别各个故障类型的判据因子, 总结得不同故障类型下各判据因子之间的关系如下。

(1) 单相接地故障

- $\varepsilon_0 \neq 0, |\varepsilon_1| = 2|\varepsilon_2| = 2|\varepsilon_3| = 1$ ——A 相为故障相;
- $\varepsilon_0 \neq 0, |\varepsilon_2| = 2|\varepsilon_1| = 2|\varepsilon_3| = 1$ ——B 相为故障相;
- $\varepsilon_0 \neq 0, |\varepsilon_3| = 2|\varepsilon_1| = 2|\varepsilon_2| = 1$ ——C 相为故障相。

(2) 两相接地故障

- $|\varepsilon_0| = |\varepsilon_1| = |\varepsilon_2 + \varepsilon_3| \neq 0$ ——BC 相为故障相;
- $|\varepsilon_0| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_1 + \varepsilon_3| \neq 0$ ——AC 相为故障相;

$|\varepsilon_0| = |\varepsilon_3| = |\varepsilon_1 + \varepsilon_2| \neq 0$ ——AB 相为故障相。

(3) 两相相间故障

$|\varepsilon_0| = |\varepsilon_1| = 0, |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3| = 1$ ——BC 相为故障相;

$|\varepsilon_0| = |\varepsilon_2| = 0, |\varepsilon_1| = |\varepsilon_3| = 1$ ——AC 相为故障相;

$|\varepsilon_0| = |\varepsilon_3| = 0, |\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = 1$ ——AB 相为故障相。

(4) 三相对称故障

$\varepsilon_0 = 0, |\varepsilon_1| \neq |\varepsilon_2| \neq |\varepsilon_3|$ 且 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 都不为 0。

2.3 选相流程

根据不同故障下各归一化后模极大值之间所满足的关系, 得到将小波分析理论应用到特高压输电线路故障选相方法表述如下。

1) 选相开始后, 从故障电流中提取出三相电流的故障分量 \dot{i}_A 、 \dot{i}_B 、 \dot{i}_C 。

2) 对三相电流故障分量进行相模变换, 提取出四个模故障分量 \dot{i}_0 、 \dot{i}_1 、 \dot{i}_2 、 \dot{i}_3 。

3) 对模故障分量进行离散小波变换, 求出各模极大值为 M_0 、 M_1 、 M_2 、 M_3 。

4) 对各模极大值进行归一化处理, 得四个判据因子 ε_0 、 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 。

5) 若 $\varepsilon_0 = 0$, 则可判断故障为相间故障, 否则可判断为接地故障。

6) 若为单相接地故障, 故障相对应的判据因子绝对值为 1, 且是其他判据因子的两倍; 若为两相接地故障, 两故障相对应的判据因子和的绝对值等于非故障相判据因子的绝对值。

7) 若为两相相间故障, 故障相对应的两个判据因子绝对值相等且为 1, 非故障相对应的判据因子为 0; 若 $\varepsilon_0 = 0$, 且不满足两相相间故障的关系, 则可判断为三相对称故障。

根据上述选相方法构造出一种新型的特高压故障选相方法, 其选相原理流程如图 1 所示。

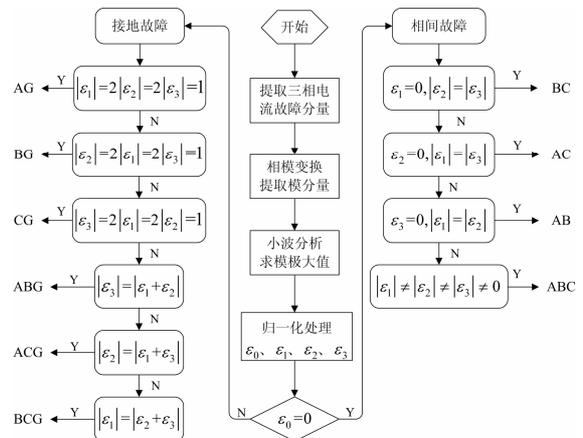


图 1 故障选相流程图

Fig. 1 Flow chart of fault phase selection

3 仿真验证

3.1 特高压模型与参数

本文用 PSCAD/EMTDC 软件建立晋东南-南阳-荆门 1 000 kV 交流特高压试验输电系统仿真模型 (如图 2 所示)。

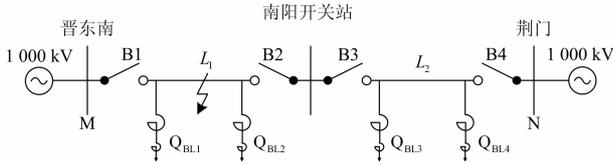


图 2 1 000 kV 特高压仿真系统模型

Fig. 2 Simulation system model of 1 000 kV UHV

系统电源参数如下:

$$E_M = E_N = 1000 \text{ kV}; Z_{M1} = 3.2 + j105.31 \Omega;$$

$$Z_{M0} = 1.63 + j97.3 \Omega; Z_{N1} = 3.32 + j102.5 \Omega;$$

$$Z_{N0} = 6.45 + j102.7 \Omega.$$

输电线路参数如下:

晋东南-南阳段输电线路长度 $L_1 = 363 \text{ km}$, 南阳-荆门段输电线路长度 $L_2 = 281 \text{ km}$, 输电线路模型采用贝瑞隆模型, 具体阻值参数设置如表 2 所示。

表 2 特高压输电线路参数

Table 2 Parameters of UHV transmission lines

	$R_1/(\Omega/\text{km})$	$X_1/(\Omega/\text{km})$	$C_1/(\Omega/\text{km})$	$R_0/(\Omega/\text{km})$	$X_0/(\Omega/\text{km})$	$C_0/(\Omega/\text{km})$
L_1	0.009 4	0.270 2	0.013 8	0.175 7	0.780 4	0.008 6
L_2	0.009 1	0.532 3	0.014 1	0.135 6	0.712 6	0.008 8

并联电抗器参数: $Q_{BL1} = 960 \text{ Mvar}$; $Q_{BL2} = Q_{BL3} = 720 \text{ Mvar}$; $Q_{BL4} = 600 \text{ Mvar}$ 。

本文仅分析晋东南-南阳段的输电线路故障, 分别在不同故障类型和不同的运行方式下进行仿真, 仿真时长设置为 0.5 s, 故障发生时刻为 0.3 s, 采样频率为 2 kHz。

3.2 不同故障类型下的仿真实验

取过渡电阻 $R_f = 50 \Omega$, 故障初始角 $\delta = 30^\circ$, 仿真故障发生在距 M 侧母线 181 km 处, 对不同故障类型大量仿真, 仿真结果如表 3 所示。以 A 相接地故障 AG 为例, 对模故障电流 \dot{I}_1 进行小波分解得到近似信号与细节信号, 结果如图 3 所示; 对各模故障信号进行小波分解, 求出细节信号的模极大值 M_0, M_1, M_2, M_3 , 如图 4 所示。

表 3 结果显示: 单相接地故障时 $\varepsilon_0 \neq 0$, 故障相对应的判据因子绝对值为 1, 且是其他判据因子的两倍; 两相接地故障时 $\varepsilon_0 \neq 0$, 两故障相对应的判据因子和的绝对值等于非故障相判据因子的绝对值; 两相相间故障时 $\varepsilon_0 = 0$, 故障相对应的两个判据因子绝对值相等且为 1, 非故障相对应的判据因子为 0;

三相故障时 $\varepsilon_0 = 0$, 三个判据因子各不相等且不为 0。

表 3 不同故障类型下的仿真结果

Table 3 Simulation results in various fault types

故障类型	判据因子				M_{\max}
	ε_0	ε_1	ε_2	ε_3	
AG	-0.500	-1.000	0.500	0.500	-0.951
BG	0.500	-0.500	1.000	-0.500	2.577
CG	-0.500	0.500	0.500	-1.000	-1.626
ABG	0.178	-0.822	1.000	-0.178	3.732
ACG	1.000	0.251	-1.000	0.749	-1.295
BCG	0.092	-0.092	1.000	-0.908	4.244
AB	0	-1.000	1.000	0	3.975
AC	0	1.000	0	-1.000	0.760
BC	0	0	1.000	-1.000	4.735
ABC	0	-0.369	1.000	-0.631	4.966

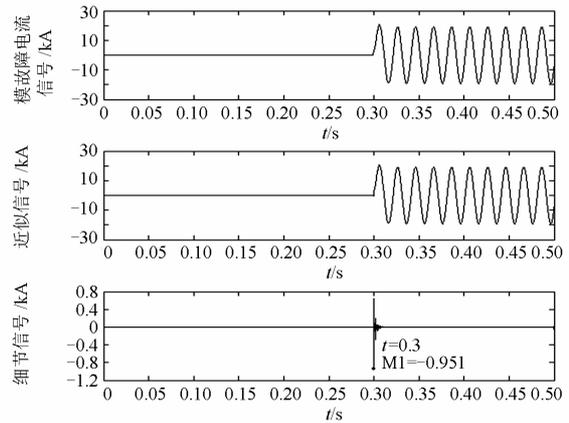


图 3 模故障电流小波分解

Fig. 3 Wavelet decomposition of mode fault current

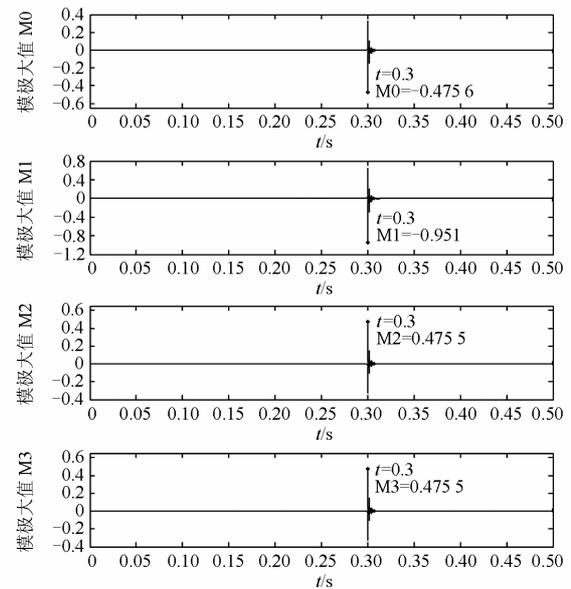


图 4 AG 故障各模极大值

Fig. 4 Modulus maximums in AG

由图 3 可看出：细节信号在 0.3 s 时突变明显，突变方向为负，强度大小为 0.951，说明用小波分析的方法可以很好地反映信号的突变时刻及大小，且反应时间极短，很适合用于电力系统超高速保护。由图 4 可看出，A 相接地时，各模故障信号的细节信号在 0.3 s 都会显示一个明显的突变，且判据因子满足 $\varepsilon_0 \neq 0$, $|\varepsilon_1| = 2|\varepsilon_2| = 2|\varepsilon_3| = 1$ 。

综合以上仿真结果：在不同故障类型下，判据因子均符合本文的选相判据，说明该方法能准确、快速地识别出故障相及故障类型。

3.3 不同运行条件下的仿真验证

电力系统运行状态的不同可能会对该选相方法有影响，本文设置了在不同的过渡电阻 R_f 、故障位置 d 和故障初始角 δ 等影响因素下对各类短路故障的仿真，验证不同影响因素下该选相方法的可靠性。

影响因素一： $R_f = 50 \Omega$, $\delta = 30^\circ$ ，故障位置分别设置为距 M 侧检测母线 10 km、181 km 和 353 km 处，仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同故障位置的仿真结果

Table 4 Simulation results of various fault places

d/km	故障类型	判据因子				M_{\max}
		ε_0	ε_1	ε_2	ε_3	
10	AG	-0.500	-1.000	0.500	0.500	-1.017
	ABG	-0.135	-0.867	1.000	0.135	3.267
	AB	0	1.000	-1.000	0	3.510
	ABC	0	-0.487	1.000	-0.513	4.103
181	AG	-0.500	-1.000	0.500	0.500	-0.951
	ABG	0.178	0.822	1.000	-0.178	3.732
	AB	0	-1.000	1.000	0	3.975
	ABC	0	-0.369	1.000	-0.631	4.966
353	AG	-0.500	-1.000	0.500	0.500	-0.594
	ABG	0.229	-0.771	1.000	-0.229	3.320
	AB	0	-1.000	1.000	0	3.439
	ABC	0	-0.242	1.000	-0.758	4.735

由表 4 中数据可看出：过渡电阻和故障初始角不变，只有故障位置改变，从距离检测母线 M 侧 10 km 的强电源侧到 353 km 的弱电源侧的不同位置，发生不同的故障，判据因子之间的关系都符合本文所提出的选相判据，均能用本文所提出的选相方法正确识别出故障相及其类型。

影响因素二： $R_f = 50 \Omega$, $d = 181 \text{ km}$ ，故障初始角改变，分别设置为 30° 、 90° 和 180° ，仿真结果如表 5 所示。

由表 5 可看出：过渡电阻和故障位置不变，故障初始角在 30° 、 90° 和 180° 之间变化，发生不同短路故障时，本文的选相方法都能正确将其识别出来。

影响因素三： $d = 181 \text{ km}$, $\delta = 30^\circ$ ，过渡电阻不同，

分别设置为 50Ω 、 500Ω 和 1000Ω ，仿真结果如表 6 所示。

表 5 不同故障初始角的仿真结果

Table 5 Simulation results of various fault initial angles

$\delta/^\circ$	故障类型	判据因子				M_{\max}
		ε_0	ε_1	ε_2	ε_3	
30	AG	-0.500	-1.000	0.500	0.500	-0.951
	ABG	0.178	0.822	1.000	-0.178	3.732
	AB	0	-1.000	1.000	0	3.975
	ABC	0	-0.369	1.000	-0.631	4.966
90	AG	-0.500	-1.000	0.500	0.500	-1.910
	ABG	-0.037	-1.000	0.963	0.037	-3.445
	AB	0	-1.000	1.000	0	3.954
	ABC	0	-1.000	0.838	0.162	-3.680
180	AG	0.500	1.000	-0.500	-0.500	-0.037
	ABG	-0.331	0.669	-1.000	0.331	-1.243
	AB	0	1.000	-1.000	0	1.213
	ABC	0	0.035	-1.000	0.965	-2.005

表 6 不同过渡电阻的仿真结果

Table 6 Simulation results of various fault resistances

R_f/Ω	故障类型	判据因子				M_{\max}
		ε_0	ε_1	ε_2	ε_3	
50	AG	-0.500	-1.000	0.500	0.500	-0.951
	ABG	0.178	0.822	1.000	-0.178	3.732
	AB	0	-1.000	1.000	0	3.975
	ABC	0	-0.369	1.000	-0.631	4.966
500	AG	-0.500	1.000	0.500	0.500	-0.314
	ABG	0.234	-0.766	1.000	-0.234	1.067
	AB	0	-1.000	1.000	0	1.574
	ABC	0	-0.369	1.000	-0.631	1.376
1000	AG	-0.500	1.000	0.500	0.500	-0.180
	ABG	0.248	-0.752	1.000	-0.248	0.596
	AB	0	-1.000	1.000	0	0.942
	ABC	0	-0.369	1.000	-0.631	0.763

由表 6 仿真数据可看出：故障位置和故障初始角一定，只改变过渡电阻，随着过渡电阻阻值不断增大，各模极大值最大值大幅减小，不同故障时，各判据因子之间的关系均满足本文选相判据，用本文提出的选相方法都能正确识别出其故障类型。

综合表 4—表 6 中数据可以看出：在不同故障位置、故障初始角、过渡电阻下，发生不同的短路故障时，各判据因子之间的关系都满足本文的选相判据，基本不受故障位置、故障初始角、过渡电阻等因素的影响，说明本文选相方法可靠性强，自适应能力好，能满足特高压输电线路在不同影响因素干扰下均能正确识别出故障相及其故障类型的要求。

4 结论

为满足特高压输电线路超高速保护要求, 本文提出了一种基于小波分析理论的故障选相方法。该方法首先将暂态故障电流经相模变换消除各相间的耦合影响, 然后用离散小波变换分解, 提取出模故障电流中的奇异成分并求出其模极大值, 对各模极大值进行归一化处理作为选相的判据因子, 并根据模故障电流特征总结出不同故障类型下各判据因子之间的关系, 最后由这种关系构造一种新型的特高压输电线路故障选相方法。通过大量仿真实验证明: 选相算法受暂态故障信号幅值的干扰较小, 且不受故障初始角、故障位置、过渡电阻等因素的影响, 自适应能力强, 可靠性强, 选相速度快, 很适合用于特高压输电线路的超高速保护。

参考文献

- [1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 567-574.
LIU Zhenya. Innovation of UHV AC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 567-574.
- [2] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑(2005年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 吴静文, 张龙伟, 曹保江, 等. 特高压交流同塔双回输电线路电磁耦合分量的计算分析[J]. 中国电力, 2014, 47(6): 12-17.
WU Jingwen, ZHANG Longwei, CAO Baojiang, et al. Analysis on the electromagnetic coupling components of UHV AC double-circuit on the same tower transmission lines[J]. Electric Power, 2014, 47(6): 12-17.
- [4] 文艺, 李淳, 李建明. 一种特高压交流输电线路冲击电晕的改进模型[J]. 高电压器, 2015, 51(2): 63-72.
WEN Yi, LI Chun, LI Jianming. Improved model of impulse corona on ultra high voltage alternating current transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 63-72.
- [5] 梁景芳, 高厚磊, 苏文博, 等. 一种适用于特高压线路的快速选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 33-38.
LIANG Jingfang, GAO Houlei, SU Wenbo, et al. A method of fast faulted phase detection suitable for UHV transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 33-38.
- [6] 陈双, 何正友, 李小鹏. 基于行波固有频率的特高压输电线路故障选相[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 15-21.
CHEN Shuang, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. Faulty phase selection for UHV transmission lines based on natural frequencies of traveling waves[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 15-21.
- [7] 马静, 王希, 王增平. 一种基于电流突变量的故障选相新方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 117-124.
MA Jing, WANG Xi, WANG Zengping. A new fault phase identification method based on phase current difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 117-124.
- [8] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 17-58.
- [9] 文明浩, 李瑞生. 基于阻抗比较的同杆并架选相新方法[J]. 继电器, 2006, 34(17): 1-3.
WEN Minghao, LI Ruisheng. A new fault phase selector for double circuit lines on the same tower based on impedance comparison[J]. Relay, 2006, 34(17): 1-3.
- [10] 田书, 刘芳芳, 任晓明. 基于暂态量的同塔双回线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 50-54.
TIAN Shu, LIU Fangfang, REN Xiaoming. Research on transient-based faulty phase selection for double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 50-54.
- [11] 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 fault feeder selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 64-68.
- [12] 王兴国, 张举. 基于相关分析和模糊推理的故障选相元件[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 93-97.
WANG Xingguo, ZHANG Ju. A novel faulty phase selector based on correlation analysis and fuzzy reasoning[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 93-97.
- [13] 徐高, 龚庆武, 关钦月. 利用行波固有频率和原子能量熵的故障选相方法[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1688-1693.
XU Gao, GONG Qingwu, GUAN Qinyue. A fault-phase selection method based on natural frequency of traveling wave and atomic energy entropy[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1688-1693.
- [14] 陈亚, 李梦诗. 基于瞬时能量比的输电线路故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 56-64.
CHEN Ya, LI Mengshi. A faulted phase selection scheme for transmission lines based on instantaneous energy ratio[J]. Power System Protection and Control, 2016,

- 44(1): 56-64.
- [15] 叶朝辉, 黄康乐, 孔凡坊. 基于分层模糊推理的快速综合故障选相新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 10-15.
YE Chaohui, HUANG Kangle, KONG Fanfang. New algorithm of speedy comprehensive faulty phase selection based on stratified fuzzy reasoning[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 10-15.
- [16] 林圣, 何正友, 罗国敏. 基于小波能量熵的输电线路暂态信号分类识别方法[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 30-34.
LIN Sheng, HE Zhengyou, LUO Guomin. A wavelet energy moment based classification and recognition method of transient signals in power transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 30-34.
- [17] 李勋, 龚庆武, 贾晶晶. 采用形态小波变换原理的超高速故障选相算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 57-63.
LI Xun, GONG Qingwu, JIA Jingjing. Ultra-high speed fault phase selection method using morphology-wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 57-63.
- [18] 张明光, 陆文辉, 刘昱晨. 基于小波能量熵和支持向量机的高压输电线路故障选相方法研究[J]. 电气自动化, 2011, 33(6): 67-70.
ZHANG Mingguang, LU Wenhui, LIU Yuchen. Research on a new faulty phase selector of high voltage power transmission lines based on wavelet energy entropy and SVM[J]. Electrical Automation, 2011, 33(6): 67-70.
- [19] 吕思颖, 裴岳, 秦昕, 等. 基于小波多尺度分析和Kalman滤波的微机保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 54-59.
LÜ Siying, PEI Chan, QIN Xin, et al. Microprocessor based protection algorithm based on wavelet multi-scale analysis and Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 54-59.

收稿日期: 2016-01-18; 修回日期: 2016-06-27

作者简介:

肖文龙(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护方面的研究;

王维博(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能变电站通信技术; E-mail: wangweibo@mail.xhu.edu.cn

刘勇(1969-), 男, 本科, 主要从事电力系统方面的研究。

(编辑 周金梅)