

DOI: 10.7667/PSPC160479

## 基于高频信号的输电线路主动式保护

解超<sup>1</sup>, 李凤婷<sup>1</sup>, 王彦鹏<sup>2</sup>, 王洪涛<sup>2</sup>

(1. 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830047;  
2. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 现行输电线路的故障类型和故障性质判别均依据线路中电气量的变化特征被动判断, 对于某些线路运行状况, 往往因缺乏主动性而造成保护误动或拒动。针对这个问题, 借鉴纵差保护输电线路载波通信技术, 分析高频信号在输电线路各种故障时的传播特性, 提出了一种基于高频信号的输电线路主动式保护。该保护通过向输电线路发射高频信号, 主动判断输电线路的故障类型和故障性质。仿真验证结果表明, 这种输电线路主动式保护可以准确判断出输电线路中各种类型的故障, 并通过延时循环判断, 可靠区分瞬时性故障和永久性故障。

**关键词:** 高频信号; 主动式保护; 故障类型; 瞬时性故障; 永久性故障

### An active protection of transmission line based on high-frequency signal

XIE Chao<sup>1</sup>, LI Fengting<sup>1</sup>, WANG Yanpeng<sup>2</sup>, WANG Hongtao<sup>2</sup>

(1. Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology (Xinjiang University), Ministry of Education, Urumqi 830047, China; 2. Economic Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Existing transmission line fault type and characteristic distinguishing methods are all based on variation features of electrical quantities passively, on some operation conditions, mal-operations or miss-operations are caused frequently because of lacking initiative. By drawing from power line carrier communication technology of longitudinal differential protection, and through analysis on transmission characteristics of high-frequency signal under various types of transmission line faults, an active protection scheme of transmission line based on high-frequency signal is proposed. The proposed protection scheme can distinguish fault type and characteristic actively by emitting high-frequency signal to transmission line. Results of simulation show that different types of faults can be detected by the proposed active protection scheme accurately, and through delayed cycle-judgment, temporary faults can be distinguished from permanent ones reliably.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267019 and No. 51467019).

**Key words:** high-frequency signal; active protection; fault type; transient faults; permanent faults

## 0 引言

在电力系统中, 多数故障是输电线路故障。为了提高供电可靠性, 在输电线路广泛采用继电保护和自动重合闸装置<sup>[1-4]</sup>。为实现故障选相和避免重合与永久性故障, 需要进行故障类型判定, 并对瞬时性故障和永久性故障做出区分<sup>[5-9]</sup>。

在故障类型判定方面, 可基于故障稳态分量进行故障选相<sup>[10]</sup>, 也可基于短路电流瞬时值、线路电

流微分和电流波形曲率等故障暂态分量进行故障类型判别<sup>[11-2]</sup>。文献[13]通过人工免疫算法对故障进行自我和非我的识别, 以此来实现故障类型判别。在对瞬时性故障和永久性故障区分方面, 可采用对比瞬时性故障与永久性故障时故障相电压与健全相电压<sup>[14-16]</sup>、计算潜供电流的大小<sup>[17]</sup>、区分各种故障类型下线路电压的不同特征<sup>[18-24]</sup>以及利用分相电流差动原理<sup>[25]</sup>等方法来进行故障性质判别。

现行输电线路保护均是根据线路电气量变化被动判断的“被动式保护”, 某些运行状况下, 往往因缺乏主动性而造成保护误动或拒动。本文通过对

输电线路各种故障特性的分析, 借鉴纵差保护电力线载波技术提出一种能够主动检测输电线路故障的“主动式保护”。以哈密地区某输电线路为算例仿真验证该方案故障类型和故障性质判别的可行性。

## 1 输电线路的各种故障特性分析

### 1.1 输电线路接地故障的特性

若线路发生永久性接地故障, 故障相中的电流会被全部引入地下; 若线路发生瞬时性接地故障, 当故障消失、电弧熄灭后, 线路恢复传输电流的能力。

### 1.2 输电线路相间短路故障的特性

若线路发生永久性相间短路故障, 故障相之间会有电流传递; 若线路发生瞬时性相间短路故障, 当故障消失、电弧熄灭后, 线路各相之间除耦合外不会有任何电流传递。

## 2 基于高频信号的输电线路主动保护

本文在线路各相的两端装设信号发射器和信号接收器(见图 1)。在线路故障时, 线路 M 端的信号发射器向输电线路发出高频信号, N 端的信号接收器接收高频信号。基于接收到的高频信号特征, 来判别故障类型和性质。

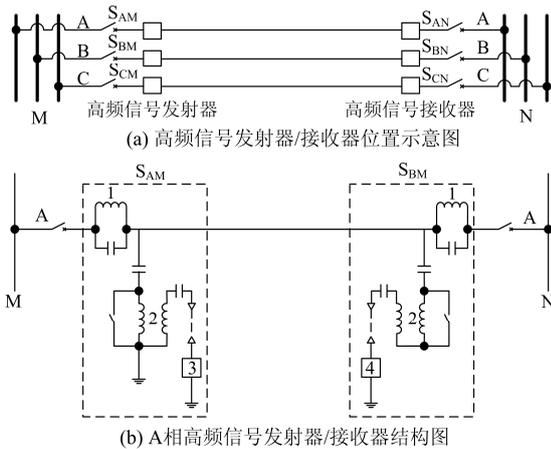


图 1 高频信号发射器/接收器位置及结构图

Fig. 1 Allocation and structure of high-frequency emitter and receiver

图 1(a)标明了三相输电线路信号发射器/接收器的装设位置。图 1(b)画出了输电线路 A 相的高频信号发射器/接收器结构图, 其中, 1 是阻波器, 可将高频信号限制在线路两端的阻波器之间; 2 是由一个可调节的空心变压器与两个电容器组成的连接滤波器, 只能通过所需频带的高频信号; 3 是高频发信机, 可向线路中发出高频信号; 4 是高频收信机, 用于检测线路中的高频信号<sup>[26]</sup>。

### 2.1 输电线路正常运行时的高频信号特征

线路正常运行时, 线路各相信号发射器发出的高频信号仅被本相信号接收器接收。令线路各相信号发射器按照 A, B, C 相的顺序发出一小段信号, 如果记接收到信号中最大幅值附近高频信号的行为为 1, 接收到最大幅值 30%以下幅值及幅值为 0, 高频信号的行为为 0, 则 A 相接收到的信号可记为 (1, 0, 0), B 相接收到的信号可记为 (0, 1, 0), C 相接收到的信号可记为 (0, 0, 1)。如果将 A, B, C 三相接收到的高频信号纵向排列, 可组成 3×3 矩阵如下:

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

即, 线路正常运行时, 对应的高频信号矩阵为单位矩阵  $\mathbf{I}$ 。

### 2.2 输电线路单相接地故障时的高频信号特征

线路 A 相接地时, A 相信号发射器发出的高频信号在故障处被引入地下, 无法被信号接收器接收。此时, A 相接收到的信号可记为 (0, 0, 0), B 相接收到的信号可记为 (0, 1, 0), C 相接收到的信号可记为 (0, 0, 1), 对应高频信号矩阵为

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{I} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

### 2.3 输电线路非单相接地故障时的高频信号特征

#### 2.3.1 输电线路两相接地时的高频信号特征

线路 A, B 两相接地故障时, 同理, A, B 两相信号发射器发出的高频信号无法被信号接收器接收。此时, A 相接收到的信号为 (0, 0, 0), B 相接收到的信号为 (0, 0, 0), C 相接收到的信号为 (0, 0, 1), 对应高频信号矩阵为

$$\mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{I} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

#### 2.3.2 输电线路三相接地时的高频信号特征

线路三相接地故障时, 同理, A, B, C 三相信号发射器发出的高频信号均无法被信号接收器接收。此时, A 相接收到的信号为 (0, 0, 0), B 相接收到的信号为 (0, 0, 0), C 相接收到的信号为 (0, 0, 0), 对应高频信号矩阵为

$$\mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \mathbf{O} \quad (4)$$

2.3.3 输电线路两相短路时的高频信号特征

线路 A, B 两相短路故障时, 线路 A, B 两相信号发射器发出的高频信号不仅在本相线路中存在, 也会经故障点流入非本相线路中, 使得 A, B 两相信号接收器会接收到不同相信号发射器发出的高频信号。此时, A 相接收到的信号为 (1, 1, 0), B 相接收到的信号为 (1, 1, 0), C 相接收到的信号为 (0, 0, 1), 对应高频信号矩阵为

$$M_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I + \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.3.4 输电线路三相短路时的高频信号特征

线路三相短路故障时, 同理, 三相信号接收器均接收到非本相信号发射器发出的高频信号。此

时, A 相接收到的信号为 (1,1,1), B 相接收到的信号为 (1,1,1), C 相接收到的信号为 (1,1,1), 此时对应高频信号矩阵为

$$M_5 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = I + \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.4 基于高频信号的输电线路主动保护流程

根据高频信号在输电线路正常工作和各种故障下的特征, 可制定一种基于高频信号的输电线路主动保护。具体流程如图 2 所示。

1) 线路故障时, 线路上配置的电压互感器和电流互感器即可判断出故障发生, 此时, 线路三相信号发射器按照 A, B, C 的顺序依次发出一段长度为 0.01 s, 频率为 3000 Hz 的高频信号, 发射间隔为 0.01 s。

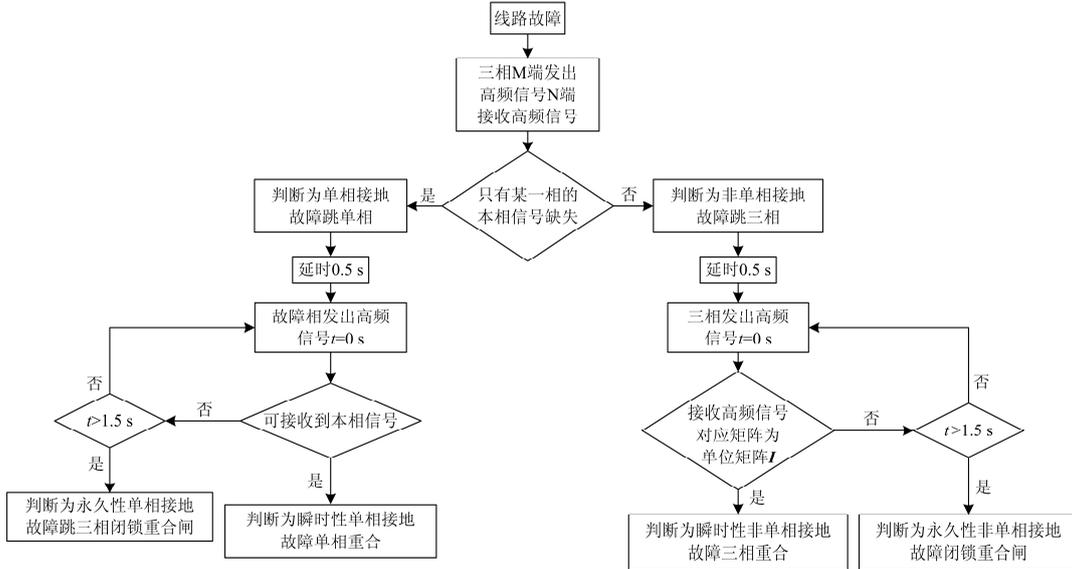


图 2 基于高频信号的输电线路故障类型判据流程图

Fig. 2 Flowchart of fault type criterion of transmission line based on high-frequency signal

2) 如接收到的高频信号只有某一相的本相信号缺失, 则判断线路发生了单相接地故障, 该相断路器跳闸。

3) 如没有发生 2) 中所述情况, 则判断发生了除单相接地故障外的其他故障, 三相断路器均跳闸。

4) 对于 2) 中所述情况, 根据熄弧时间经验公式 (7)<sup>[27]</sup>, 故障后经 0.5 s 延时, 由故障相信号发射器按照 1) 中的方式持续发出高频信号, 若 1.5 s 内故障相信号接收器接收到了本相高频信号, 则判定故障为瞬时性单相接地故障且故障已消失, 停发高频信号, 并重合该相断路器; 若 1.5 s 内仍未能接收到本相高频信号, 则判定故障为永久性单相接地故障, 停发高频信号, 跳开线路三相断路器, 并闭锁重合闸。

$$t_r = 10.5 + \frac{U_N}{34.5} \text{ (周期)} \quad (7)$$

式(7)中:  $U_N$  表示故障线路的额定线电压;  $t_r$  表示熄弧时间, 其单位为周期。

5) 对于 3) 中所述情况, 故障后经 0.5 s 延时, 三相信号发射器按照 1) 中的方式持续循环发出高频信号, 若 1.5 s 内对应的高频信号矩阵变为单位矩阵  $I$ , 则判定故障为瞬时性故障且故障已消失, 停发高频信号, 并重合三相断路器; 若 1.5 s 内对应的高频信号矩阵仍然不是单位矩阵  $I$ , 则判定故障为永久性故障, 停发高频信号, 并闭锁重合闸。

3 仿真验证

本文以新疆哈密地区哈密-兴民一条长度为 27 km

的 220 kV 输电线路为算例(图 3), 基于 PSCAD/EMTDC 搭建 220 kV 输电线路模型, 仿真该线路正常运行状态下以及线路中部在 A 相单相接地, A, B 两相接地, 三相接地, A, B 两相短路, 三相短路 5 种故障状态下线路中高频信号的特征, 验证本文所提主动式保护的可行性。信号发射器发出高频信号的方式如 2.4 节所述, 故障发生时间设定为 1 s。

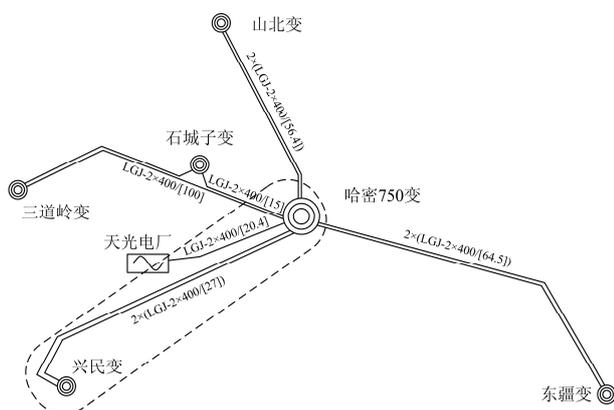


图 3 哈密-兴民 220 kV 输电线路地理示意图

Fig. 3 Location of Hami-Xingmin 220 kV transmission line

### 3.1 线路正常运行的高频信号特征

线路正常运行, 仿真结果如图 4 所示。各相的信号接收器均只能接收到较大幅度的本相信号发射器发出的高频信号, 由于线路耦合, 各相还能接收到小幅度的高频干扰信号。由图 4 可知, 此时对应的高频信号矩阵为单位矩阵  $I$ , 与式(1)相符。

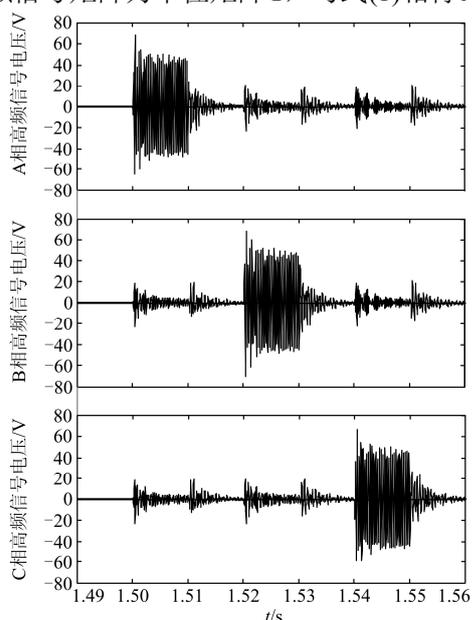


图 4 线路正常运行状态下接收到的高频信号

Fig. 4 High-frequency signal received in normal operation of transmission line

### 3.2 线路发生单相接地故障的高频信号特征

线路 A 相中点单相接地, 仿真结果如图 5 所示。只有 B, C 两相的信号接收器能接收到较大幅度的本相线路信号发射器发出的高频信号, 这里依然存在线路耦合产生的干扰信号。由图 5 知, 此时对应的高频信号矩阵为  $M_1$ , 与式(2)相符。

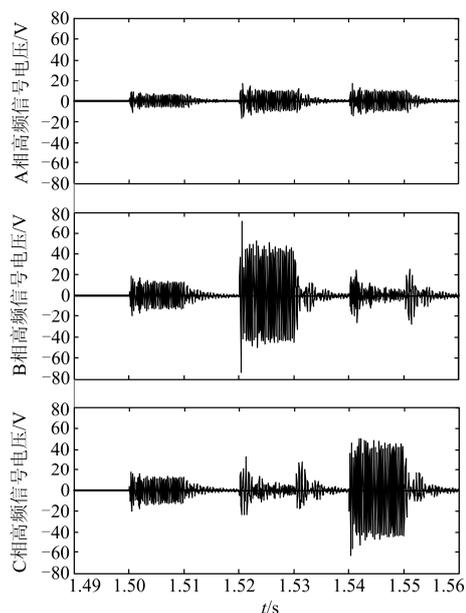


图 5 线路 A 相单相接地故障状态下的高频信号

Fig. 5 High-frequency signal received in phase A-to-ground faults of transmission line

### 3.3 线路两相接地故障的高频信号特征

线路中点 A, B 两相接地, 仿真结果如图 6 所示。仅有 C 相的信号接收器接收到较大幅度的本相线路信号发射器发出的高频信号, 这里也存在线路耦合产生的干扰信号。由图 6 知, 此时对应的高频信号矩阵为  $M_2$ , 与式(3)相符。

### 3.4 线路三相接地故障的高频信号特征

线路中点三相接地, 仿真结果如图 7 所示。由于线路三相均接地, 故障点和信号接收器之间的线路不存在耦合电流, 各相信号接收器接收不到任何的高频信号。由图 7 知, 此时对应的高频信号矩阵为  $M_3$ , 与式(4)相符。

### 3.5 线路两相短路故障的高频信号特征

线路中点 A, B 两相短路, 仿真结果如图 8 所示。A, B 两相的信号接收器可同时接收到 A, B 两相 M 端信号发射器发出的高频信号, C 相的信号接收器只能接收到较大幅度的本相线路信号发射器发出的高频信号, 这里也存在线路耦合产生的干扰信号。由图 8 知, 此时对应的高频信号矩阵为  $M_4$ , 与式(5)相符。

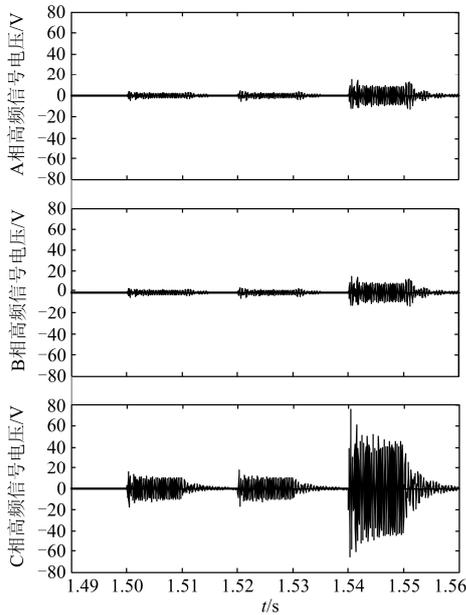


图 6 线路 A, B 两相接地故障状态下的高频信号  
Fig. 6 High-frequency signal received in phase A and phase B-to-ground faults of transmission line

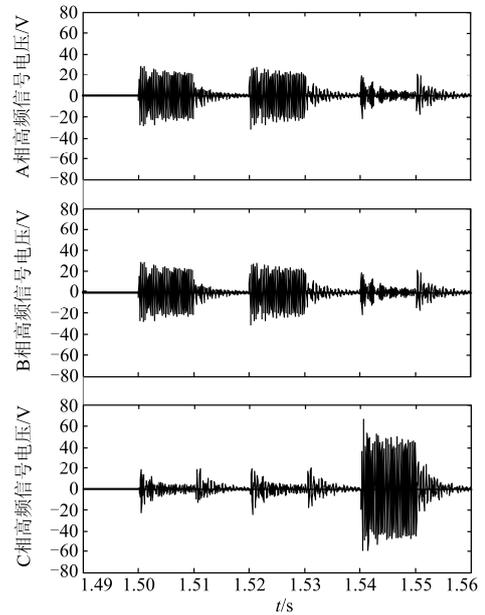


图 8 线路 A, B 两相短路故障状态下的高频信号  
Fig. 8 High-frequency signal received in phase A-to-phase B faults of transmission line

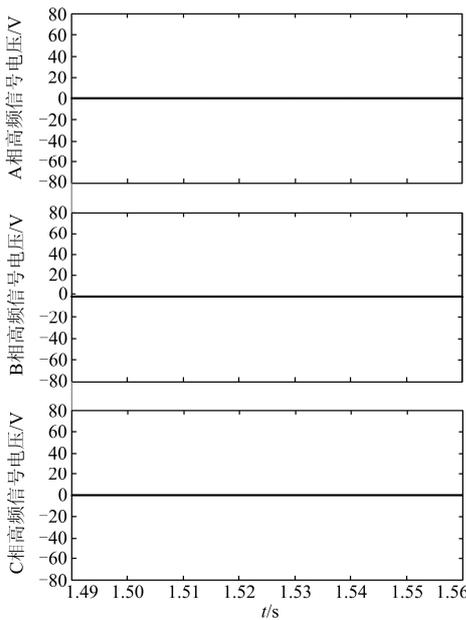


图 7 线路三相接地故障状态下的高频信号  
Fig. 7 High-frequency signal received in three-phase-to-ground faults of transmission line

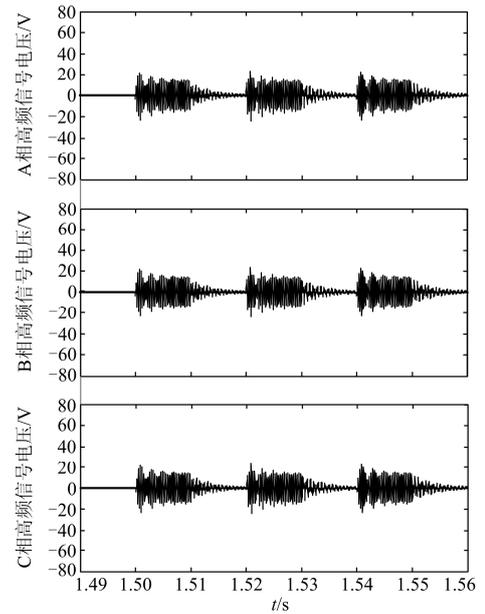


图 9 线路三相短路故障状态下的高频信号  
Fig. 9 High-frequency signal received in three-phase short-circuit faults of transmission line

### 3.6 线路三相短路故障的高频信号特征

线路中点三相短路，仿真结果如图 9 所示。A, B, C 三相信号接收器可以同时接收到 A, B, C 三相信号发射器发出大小相等的高频信号。由图 9 知，此时对应的高频信号矩阵为  $M_5$ ，与式(6)相符。

## 4 结论

本文基于输电线路的不同故障特性，分析了输电线路在正常运行下和各种故障状态下的高频信号特征，据此提出了一种基于高频信号的主动式保护。仿真验证表明，这种主动式保护可以准确判断出输

电线路中各种故障的存在,并在故障消失后及时将故障定性为瞬时性故障,解除重合闸装置的闭锁,使之重合成功;亦能可靠防止线路重合于永久性故障。这种主动式保护的实现只需要在各相传输线的两端安装高频信号发射器、高频信号接收器和滤波装置,投入不大,易于实现和推广。

### 参考文献

- [1] 梁振峰, 索南加乐, 宋国兵, 等. 输电线路自适应重合闸研究综述[J]. 电网技术, 2013, 41(6): 140-147.  
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 140-147.
- [2] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.  
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [3] 高超, 郑涛, 毕天姝, 等. 特高压多串补系统电流特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 193-198.  
GAO Chao, ZHENG Tao, BI Tianshu, et al. Analysis on current characteristics of ultra high transmission line with multi series compensation capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 193-198.
- [4] 张广斌, 束洪春, 于继来, 等. 不依赖双侧时钟同步的输电线双端行波测距[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 199-209.  
ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Double-ended travelling wave fault location independent of two side time synchronization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 199-209.
- [5] 张海玉, 刘闯, 晁勤, 等. 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 53-60.  
ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 53-60.
- [6] 陈志峰, 徐兴发, 王娴. 一种新型小水电安全自动解列装置的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 144-148.  
CHEN Zhifeng, XU Xingfa, WANG Xian. Research on a new type of auto-disconnection safety for small hydroelectric power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 144-148.
- [7] 刘欣, 郑涛, 黄少锋, 等. 自动重合闸引起风电场连锁脱网的解决策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 51-56.  
LIU Xin, ZHENG Tao, HUANG Shaofeng, et al. Analysis on solution of cascade failure caused by automatic reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 51-56.
- [8] 耿建昭, 王宾, 董新洲. 利用单相跳闸后信息的输电线路单相接地单端精确测距方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 184-193.  
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou. A novel one-terminal single-line-to-ground fault location algorithm in transmission line using post-single-phase-trip data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 184-193.
- [9] 王月林, 李凤婷, 辛超山, 等. 含风电弧网送出线重合策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 958-963.  
WANG Yuelin, LI Fengting, XIN Chaoshan, et al. Research on reclosing strategy for outgoing line of isolated system with wind farm[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 958-963.
- [10] 任志玲, 张媛媛. 基于改进的 HHT 变换和信心度的配电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 8-13.  
REN Zhiling, ZHANG Yuanyuan. Fault line selection of distribution network based on improved Hilbert-Huang Transform and identification confidence degree[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 8-13.
- [11] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.  
RUAN Qiantu. Present situation of short circuit current control in Shanghai power grid and countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 78-83.
- [12] 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.
- [13] 林圣, 何正友, 钱清泉. 基于人工免疫算法的输电线路故障类型识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 95-100, 137.  
LIN Sheng, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. A novel approach of fault type recognition of transmission lines based on artificial immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 95-100, 137.
- [14] 赵庆明, 李斌. 基于电压补偿原理的单相自适应重合

- 闸新型相位判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 50-54, 60.
- ZHAO Qingming, LI Bin. A new phase criterion for single-pole adaptive reclosure based on voltage compensation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 50-54, 60.
- [15] RADOJEVIC Z M, SHIN J R. New digital algorithm for adaptive reclosing based on the calculation of the faulted phase voltage total harmonic distortion factor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 37-41.
- [16] 刘毅, 张哲, 尹项根. 同杆并架双回线自适应重合闸组合判据[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 56-61.
- LIU Yi, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. A combination criterion on adaptive reclosure for double transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 56-61.
- [17] 李博通, 李永丽. 基于潜供电流计算的输电线路单相永久性故障判断方法[J]. 天津大学学报, 2010, 43(5): 424-428.
- LI Botong, LI Yongli. Identification method for single phase permanent fault based on calculation of secondary arc current on transmission line[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(5): 424-428.
- [18] 李永丽, 李博通. 带并联电抗器输电线路三相永久性和瞬时性故障判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 82-90.
- LI Yongli, LI Botong. Identification of three-phase permanent or temporary fault at transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 82-90.
- [19] 梁振峰, 索南加乐, 康小宁, 等. 利用自由振荡频率识别的三相重合闸永久性故障判别[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 124-130.
- LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, et al. Permanent faults identification using free oscillation frequency for three-phase reclosure on transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 124-130.
- [20] 邵文权, 章霄微, 宋江喜, 等. 特高压交流输电线路单相重合闸无故障识别电压电流组合判据[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 546-554.
- SHAO Wenquan, ZHANG Xiaowei, SONG Jiangxi, et al. Non-fault identification voltage and current based integrated criterion for single-phase reclosure on UHVAC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 546-554.
- [21] LIN Da, WANG Huifang, LIN Dongyang, et al. An adaptive reclosure scheme for parallel transmission lines with shunt reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2581-2589.
- [22] 林达, 王庆庆, 王慧芳, 等. 带并联电抗器同杆双回线自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 101-106.
- LIN Da, WANG Qingqing, WANG Huifang, et al. Adaptive reclosure scheme for parallel lines with shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 101-106.
- [23] LE BLOND S P, AGGARWAL R K. Design of adaptive autoreclosure schemes for 132 kV network with high penetration of wind-part 1: real-time modeling[J]. IEEE Transactions on Power delivery, 2012, 27(3): 1055-1062.
- [24] LE BLOND S P, AGGARWAL R K. Design of adaptive autoreclosure schemes for 132 kV network with high penetration of wind-part 2: real-time development and testing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1063-1070.
- [25] 梁振峰, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于电流差动的双端带并联电抗器输电线路三相重合闸永久性故障判别[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 183-187.
- LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Differential current-based identification of permanent faults for three-phase autoreclosure on transmission line with shunt reactors at both ends[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 183-187.
- [26] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2010: 166-169.
- [27] 刘培, 杨军, 陶丁涛. 一种输电线路瞬时故障最佳重合时刻实用计算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 635-640.
- LIU Pei, YANG Jun, TAO Dingtao. Practical online calculation of optimal reclosing time for transmission line under transient fault[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 635-640.

收稿日期: 2016-04-06; 修回日期: 2016-06-02

作者简介:

解超(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护; E-mail: cheesemonster@sina.com

李凤婷(1965-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护。E-mail: xjlf2009@sina.com

(编辑 姜新丽)