

文章编号:1005-2992(2018)03-0001-07

基于五次谐波法与改进型锁相环结合的配电网故障选线研究

王建元¹, 张 峥¹, 杨 爽²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 云南电网有限责任公司 曲靖供电局, 云南 曲靖 655000)

摘 要: 随着用户侧非线性负荷的增加, 系统正常运行时线路中的谐波分量增加, 故障时难以精确识别故障线路的零序电流谐波分量, 使得以往利用滤波器进行五次谐波分析法的精度降低. 为了解决这个问题, 将应用于风电并网发电的锁相环经改进后用于小电流接地系统故障选线, 对故障信号进行处理, 通过比较各条线路波形相位与幅值的不同来确定故障线路, 获得了很好的效果. 以 10 kV 架空线-电缆混合线路为例, 建立锁相环的小信号模型, 利用改进型锁相环将波形中的五次谐波进行锁定, 并用名为 Simulink 的软件进行仿真验证, 仿真结果证明了理论分析的正确性.

关 键 词: 小电流接地系统; 架空线-电缆混合线路; 五次谐波; 改进锁相环; 故障选线

中图分类号: TM862

文献标识码: A

在我国 3 kV ~ 66 kV 中低压配电网中, 一般中性点采用不接地或经谐振接地的小电流接地方式. 当发生最常见的单相接地故障(约占所有故障 80%)时, 系统线电压依然保持对称, 而且故障电流甚小, 可带故障运行 1 h ~ 2 h. 但为了避免故障进一步扩大, 造成更为严重的两相或者多点接地短路, 必须尽快选出故障线路, 排除故障. 由于系统故障信号微弱, 实际线路结构复杂, 故障情况多变, 目前选线效果并不理想, 因此如何精准快速的识别故障信号便成为小电流接地故障选线研究的重点.

国内外学者做了大量的研究, 文献[1~2]中利用了故障信号中的稳态分量特征进行选线, 将故障线路与健全线路零序电流幅值、相位的大小、方向不同作为选线判据, 但这些特征量较小, 并存在一个致命缺点, 不适用于经消弧线圈接地系统. 相比之下, 文献[3~4]利用暂态分量进行选线的方法可以克服稳态算法灵敏度低, 受消弧线圈影响等问题, 但暂态特征分量存在时间较短并且对其提取以及暂态保护的判据至今仍然是选线的难题. 文献[5]提出故障后通过母线电压互感器(PT)向系统中注入特殊频率(220 Hz)的信号, 将能够被信号探测器捕捉到的线路选为故障线路, 但由于 PT 容量受限, 注入信号能量较小, 而且在高阻接地情况下, 健全线路也存在注入信号的分流, 故实际应用并不理想.

鉴于上述原因, 本文利用改进后的锁相环对系统故障后产生的五次谐波进行锁定, 文献[6]中分析当发生单相接地故障时线路中会产生比健全线路幅值大且方向相反的五次谐波, 从而进行故障选线. 由于在非线性负荷较多的线路, 五次谐波法易受影响, 而且在五次谐波含量较少情况下, 不易识别. 在小电流接地系统中加入改进后的锁相环不仅成功选线, 并具有较高的抗过渡电阻的能力, 有望能够从本质上解决在高阻接地情况下故障选线准确率较低的问题.

收稿日期: 2018-03-05

第一作者: 王建元(1971-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 计算机在电力系统中的应用, 电力电子技术电力系统中的应用和电能质量控制技术

通讯作者: 张 峥(1993-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 配电网单相接地故障选线测距

电子邮箱: 598831691@qq.com(王建元); zzdyx931130@163.com(张峥); 1172162872@qq.com(杨爽)

1 五次谐波法选线原理

当电力系统发生不对称故障时,线路电流波形中会产生谐波. 其中奇数次谐波含量较大,谐波含量会随谐波频率的增大而减小,由于三次谐波会在变压器角形连接中构成环流,不会流入电力系统中,所以电力系统中含量最大的是五次谐波.

在中性点经消弧线圈接地系统中,消弧线圈对五次谐波零序电流补偿作用很小可以忽略,所以中性点接地系统发生单相接地故障时采用五次谐波法进行选线最为直接. 如图 1 所示,假设第 j 条线路的 A 相接地,系统中各条线路的五次谐波成分情况如下:

非故障线路 i :

$$\begin{cases} \dot{I}_{Ai} = 0, \\ \dot{I}_{Bi} = 5j\omega C_i \dot{U}_{BA(5)}, \\ \dot{I}_{Ci} = 5j\omega C_i \dot{U}_{CA(5)}, \\ \dot{I}_{0i} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{Ai} + \dot{I}_{Bi} + \dot{I}_{Ci}) = \frac{1}{3}(5j\omega C_i \dot{U}_{BA(5)} + 5j\omega C_i \dot{U}_{CA(5)}), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $i = 1, \dots, n; i \neq j$, \dot{I}_{Ai} 、 \dot{I}_{Bi} 、 \dot{I}_{Ci} , 分别是第 i 条健全馈线的 A 、 B 、 C 相电流五次谐波分量; \dot{I}_{0i} 为第 i 条健全馈线的五次零相序谐波零相序电流. 非故障线路各相 5 次谐波电流, 如图 2 所示.

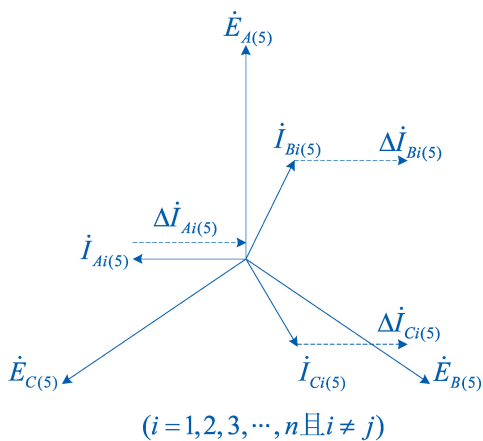


图 2 非故障线路各相 5 次谐波电流

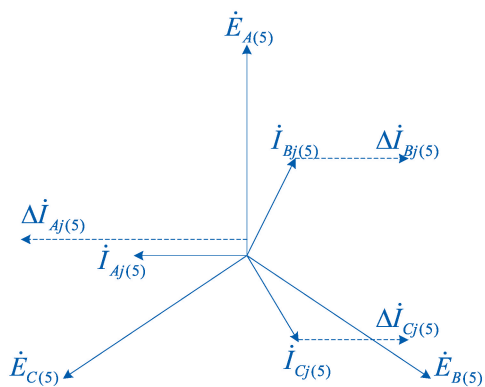


图 3 故障线路各相 5 次谐波电流

故障线路 j :

$$\begin{cases} \dot{I}_{Aj} = -5j\omega(C_1 + C_2 + \dots + C_k) \dot{U}_0 + \dot{I}_L, \\ \dot{I}_{Bj} = 5j\omega C_j \dot{U}_{BA(5)}, \\ \dot{I}_{Cj} = 5j\omega C_j \dot{U}_{CA(5)}, \\ \dot{I}_{0j} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{Aj} + \dot{I}_{Bj} + \dot{I}_{Cj}), \\ \dot{I}_{0j} = \frac{1}{3}[-5j\omega(C_1 + C_2 + \dots + C_k) \dot{U}_0 + \dot{I}_L + 5j\omega C_j \dot{U}_{BA(5)} + 5j\omega C_j \dot{U}_{CA(5)}], \end{cases} \quad (2)$$

其中: $k = 1, \dots, n; k \neq j$, I_{Aj} 、 I_{Bj} 、 I_{Cj} 分别是第 j 条健全馈线的 A、B、C 相电流五次谐波分量; I_L 为消弧线圈所产生的感性补偿电流; I_{0j} 为第 j 条健全馈线的五次零相序谐波零相序电流. 故障线路各相 5 次谐波电流, 如图 3 所示.

由上述对故障线路和非故障线路中的五次谐波分析, 得到如下的选线判据:

(1) 从各条馈线五次谐波零序电流幅值上看, 故障线路中的五次谐波零序电流大于非故障线路.

(2) 从相位上来看, 故障线路的零序电流滞后零序电压 90° , 非故障线路的零序电流超前零序电压 90° .

从理论上讲, 通过比较各条线路中五次谐波的零序电流幅值和相位, 可以进行故障选线.

2 改进型锁相环的结构

锁相环是由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器三部分构成^[7]. 当故障电流信号加在锁相环时, 锁相环会自动调整振荡器的振荡频率直至与线路五次谐波的信号频率相同并且相位保持同步, 对五次谐波进行锁定. 经典锁相环的结构, 如图 4 所示.



图4 锁相环结构示意图

虽然锁相环在电网中的应用已非常普遍, 但它们在在工作时需要提前对将要输入锁相环的信号进行处理. 这样, 锁相环无法立即接触到要处理的信号. 如果直接应用到事故选线系统中, 必定会给选线的实时性带来不利.

为解决这个问题, 本文提出了一种改进型的锁相环, 这种锁相环能直接提取采集来的信号幅值和相位等有用信息, 从而完成对电力系统中信号的跟踪、提取.

为了清晰地了解本研究所提出的改进型锁相环的结构和工作原理, 图 5 对其进行了展示. 总体来说, 可以将这种改进型锁相环的结构划分为三部分, 即输入、相位调整和幅值调整部分. 改进型锁相环的结构, 如图 5 所示.

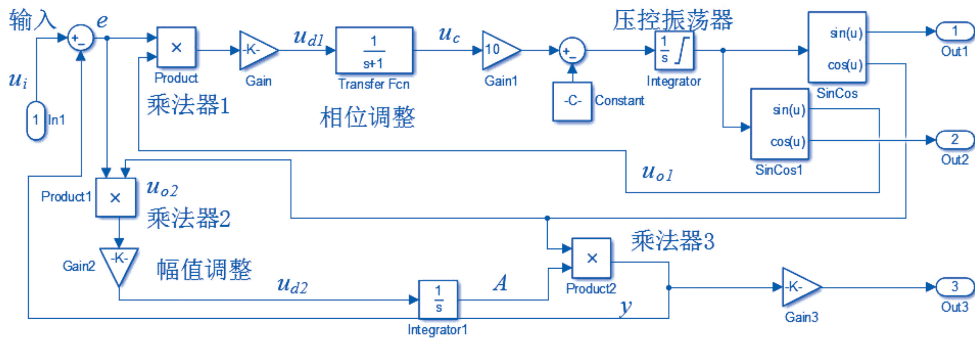


图5 改进型锁相环结构图

(1) 输入部分

图 5 中的输入是通过一个减法器来实现. 这个减法器实现了对环路系统输入信号与输出信号的对比, 即 u_i 和 y 作差. 所得差值结果为 e , 并将 e 作为后面模块的输入信号.

(2) 相位调整部分

图 5 中的相位调整电路由三部分组成, 他们分别为乘法器、环路滤波器和压控振荡器. 压控振荡器电路又是有三部分构成的, 包括比例控制器、加法器和积分电路.

根据图中展示的信号流动方向可知, e 信号连同压控振荡器的出口信号 u_{o1} 一起被送入锁相环. 通过锁相环的处理, 得到的信号 u_{d1} 进入到环路滤波器中进行滤波. 经过环路滤波器后, 输出信号 u_{o1} 直接输

送进入压控振荡器,经过 90° 的相位变化,最终得到与 u_{o1} 相位相差 90° 的 u_{o2} 信号.

(3) 幅值调整部分

从图 5 可以看出,乘法器 2、乘法器 3 和积分控制器构成了改进型锁相环的幅值调整电路. 从图中可得,乘法器 2 的输入就是压控振荡器的出口电压 u_{o2} ,而其输出又作为下一个电路元件,即积分电路模块的输入信号. 积分电路的输出为放入系统的信号幅值 A ,而后 A 与压控振荡器的出口信号 u_{o2} 一起作为乘法器 4 的输入信号,与压控振荡器的输出 V 作为输入信号输入到乘法器 3 当中,其可以表示为 y .

(4) 输出信号

通过模块出口得到的是压控振荡器输出的含有相位信息的信号. 对这种含相位的信号进行有关处理后再使它的相位改变 90° ,即可得到信号 u_{o2} . 积分模块的出口量定义为 A 和 y , A 是系统提取的信号的最大值, y 是提取出来的信号. 显然, y 是输入系统的信号中与压控振荡器的参考频率基本一致的信号.

3 改进型锁相环的数学模型

普通正弦信号不但可以实现功能测试,而且方便研究,所以采用普通正弦波进行改进型锁相环的性能分析. 输入信号可以表示为

$$u_i(t) = U_i \sin[\omega_i t + \theta_i(t)] . \quad (3)$$

压控振荡器的输出也应该是正弦信号:

$$u_{o1}(t) = U_o \cos\varphi = U_o \cos[\omega_o t + \theta_2(t)] , \quad (4)$$

$$u_{o2}(t) = U_o \sin\varphi = U_o \sin[\omega_o t + \theta_2(t)] . \quad (5)$$

乘法器 3 的输出:

$$y = U_y \sin[\omega_y t + \theta_y(t)] . \quad (6)$$

积分模块出口量 A 与锁相环的输出信号 u_{o2} 相乘得到乘法器 3 的输入. 积分模块出口量 A 只对 u_{o2} 幅值起作用,对其相位没有影响. 此时乘法器 3 的输出 y 的相位与输入 u_{o2} 相同,输出信号 y 如下式所示:

$$y = U_y \sin[\omega_o t + \theta_2(t)] . \quad (7)$$

为方便分析,设输入信号为 $u_1(t) = U_i \sin[\omega_o t + \theta_1(t)]$,其中 $\theta_1(t) = \omega_i - \omega_o + \theta_i(t)$. 令 θ_e 为瞬时时差,可以由式 $\theta_e = \theta_1(t) - \theta_2(t)$ 获得. 所设信号总结如下:

$$u_i(t) = U_i \sin[\omega_o t + \theta_1(t)] , \quad (8)$$

$$u_{o1}(t) = U_o \cos[\omega_o t + \theta_2(t)] , \quad (9)$$

$$u_{o2}(t) = U_o \sin[\omega_o t + \theta_2(t)] , \quad (10)$$

$$y = U_y \sin[\omega_o t + \theta_2(t)] , \quad (11)$$

$$\theta_e = \theta_1(t) - \theta_2(t) . \quad (12)$$

输入信号的表达式为

$$e = u_i - y = U_i \sin[\omega_o t + \theta_i(t)] - U_y \sin[\omega_o t + \theta_2(t)] .$$

(13)

4 算例仿真

为了验证利用改进后锁相环处理五次谐波进行小
电流接地系统故障选线的可行性,利用 MATLAB/
Simulink 对图 6 所示简化电路模型进行仿真. 其中线
路 L_1 为架空线路, L_2 为电缆线路, L_3 为架空线-电
缆混合线路. 线路参数,如表 1 所示.

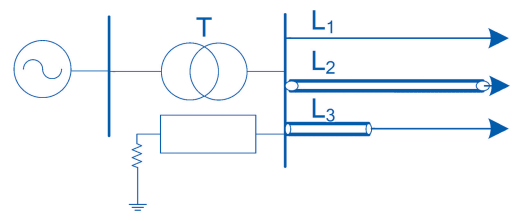


图 6 小电流接地系统结构简化图

表 1 仿真线路参数

线路	L_1	L_2	L_3 (缆-线混合线路)	
长度/(km)	16	10	电缆 4	架空线 6
$[R_1 \ R_0]/(\Omega/\text{km})$	$[0.414 \ 1$ $0.564 \ 1]$	$[0.305$ $0.453 \ 23]$	$[0.305$ $0.453 \ 23]$	$[0.414 \ 1$ $0.564 \ 1]$
$[L_1 \ L_0]/(\text{H}/\text{m})$	$[1.079 \ 2 \times 10^{-3}$ $7.392 \ 4 \times 10^{-3}]$	$[0.305 \ 3 \times 10^{-3}$ $6.672 \ 7 \times 10^{-3}]$	$[0.305 \ 3 \times 10^{-3}$ $6.672 \ 7 \times 10^{-3}]$	$[1.079 \ 2 \times 10^{-3}$ $7.392 \ 4 \times 10^{-3}]$
$[C_1 \ C_0]/(\text{F}/\text{m})$	$[10.740 \ 2 \times 10^{-9}$ $4.209 \times 10^{-9}]$	$[0.196 \ 2 \times 10^{-6}$ $0.196 \ 2 \times 10^{-6}]$	$[0.196 \ 2 \times 10^{-6}$ $0.196 \ 2 \times 10^{-6}]$	$[10.740 \ 2 \times 10^{-9}$ $4.209 \times 10^{-9}]$

根据上述简化模型,加入改进后的锁相环搭建的系统仿真模型,如图 7 所示.

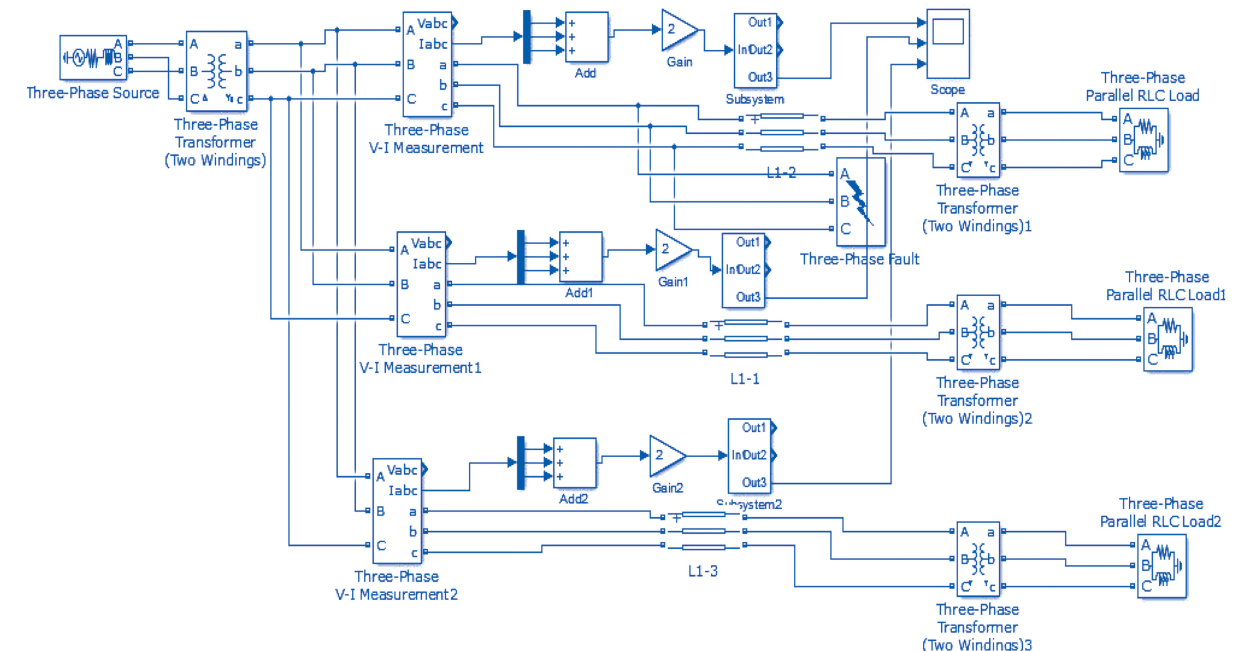


图 7 提取 5 次谐波的小电流接地系统仿真结构图

线路 L_1 在 0.02 s 时发生 A 相接地故障,并设置三组不同大小的过渡电阻分别为 1 Ω 、100 Ω 、500 Ω ,提取出各条馈线的零序电流后送入改进型锁相环中,得到各条线路零序电流五次谐波分量,如图 8 ~ 图 10 所示.

当过渡电阻为 1 Ω 时,从图 8 中观察 0.02 s 起始时刻,线路 L_1 所提取出的五次谐波零序电流幅值较 L_2 、 L_3 大,并且波形的相位也与后两条线路相反,可以判断出线路 L_1 为故障线路. 下面将设置不同大小的过渡电阻,并观察其对故障选线的结果影响.

分析图 9、图 10, 线路 L_1 五次谐波幅值最大, 其值大于后两条线路幅值之和, 而且相位与后两条线路相反, 因此依然可以判定线路 L_1 为故障线路. 在仿真过程中, 设置了三组不同的接地电阻, 但都没能影响选线结果的正确性, 因此加入改进后的锁相环提取 5 次谐波进行选线具有较高的抗过渡电阻能力.

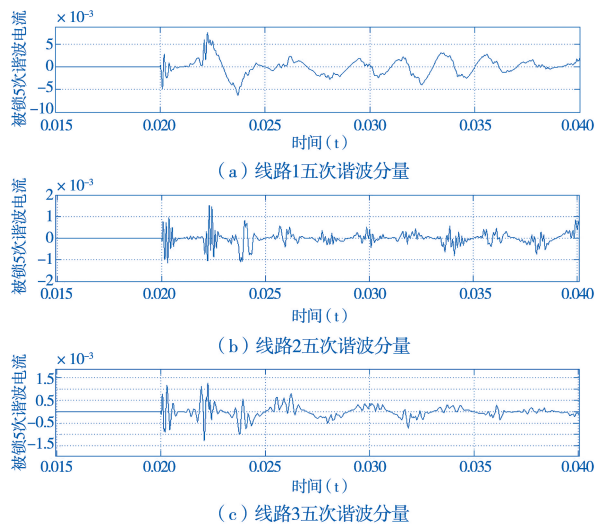


图 8 系统发生单相接地故障过渡电阻为 $1\ \Omega$ 时各条线路五次谐波分量

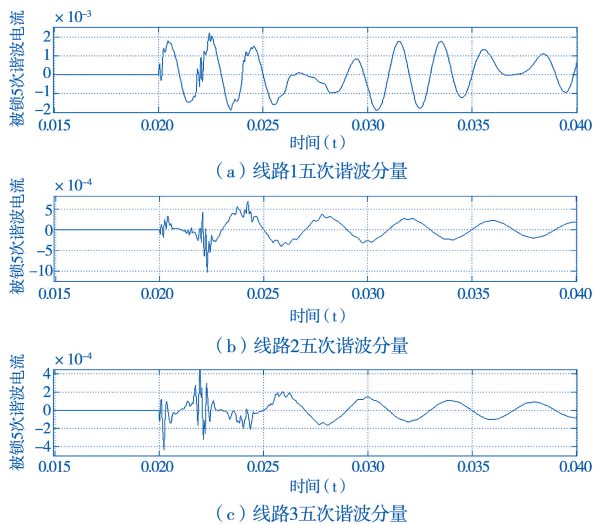


图 9 系统发生单相接地故障过渡电阻为 $100\ \Omega$ 时各条线路五次谐波分量

5 结 论

本文在利用滤波器五次谐波分量法进行故障选线的基础上, 将改进后的锁相环应用于小电流接地系统故障选线. 首先建立锁相环进行设定, 使其对五次谐波进行锁定. 利用 Simulink 建立架空线-电缆混合线路, 在每条线路上都装设一个五次谐波锁相环. 在中性点经消弧线圈接地系统中, 假设线路 L_1 发生单相接地故障, 在过渡电阻为 $1\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 不同情况下进行仿真, 仿真结果可以看出线路 L_1 五次谐波波形幅值最大, 并且与其他线路五次谐波相位相反, 可以确认线路 L_1 为故障线路, 验证了理论可行性, 并具有较高的抗过渡电阻能力. 因为系统中五次谐波含量较小, 在实际选线中依然存在问题, 该方法有待进一步完善.

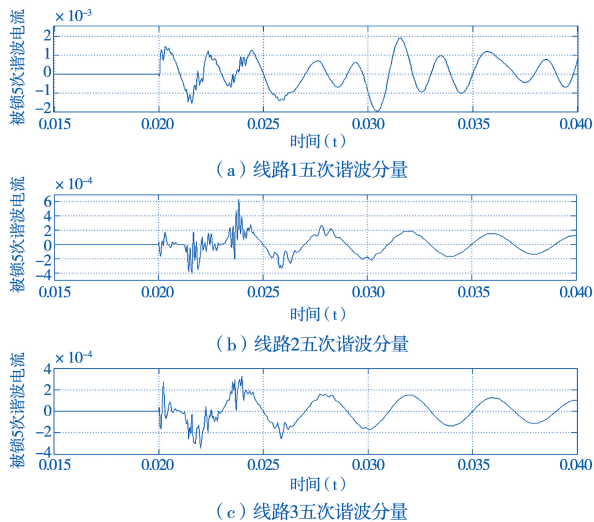


图 10 系统发生单相接地故障过渡电阻为 $500\ \Omega$ 时各条线路五次谐波分量

参 考 文 献

- [1] 苏宏升, 张耕川. 小电流接地系统故障定位方法综述[J]. 电源技术, 2015, 39(4): 867-871.
- [2] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2001, 29(4): 16-20.
- [3] 王建元, 鞠默欣, 徐志璇, 等. 基于 HHT 小电流接地故障选线与在线故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2014, 51(15): 48-54.
- [4] 王建元, 许宁, 杨慧霏, 等. 基于希尔伯特-黄变换与分形维数的配电网选线研究[J]. 广东电力, 2015, 28(11): 37-43.
- [5] 郭威. 基于 SIFT 算法与 Duffing 振子的小电流接地选线[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(4): 26-31.
- [6] 刘兴艳, 董洋洋. 基于五次谐波电流变化特征的单相接地故障选线方法[J]. 电子质量, 2010, 27(3): 35-37.

- [7] 张志霞,朴在林,郭丹,等.一种应用于电力系统的锁相环[J].电工技术学报,2012,27(2):250-254.
- [8] 吴恒,阮新波,杨东升,等.弱电网条件下锁相环对LCL型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5259-5268.
- [9] 张婷娟,王涛,黄鹰,等.智能变电站小电流接地选线装置测试仪的研究与设计[J].东北电力大学学报,2016,36(1):13-17.
- [10] 孙亮,袁文强,吴长鹏,等.两级式光伏并网系统建模及关键环节的设计[J].东北电力大学学报,2016,36(2):26-32.

Research on Fault Line Selection for Distribution Networks Based on Five Times Harmonic Method and Improved Phase Locked Loop

Wang Janyuan¹, Zhang Zheng¹, Yang Shuang²

(1. Electrical Engineering College, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012; 2. Yunnan Electric Power Company Limited, Qujing Electric Power Bureau, Qujing Yunnan 655000)

Abstract: With the increase of non-linear loads in the user side, the harmonic component of current when the system is in normal operation has increased, it is difficult to identify the fault line by the harmonic components accurately, so the precision of fifth harmonic analysis method using filters is decreased. In order to solve this problem, the phase-locked loop used in wind power integration was applied for fault line selection in small current grounding system, it obtained a very good effect in selecting the fault line by processing fault signal and comparing different lines wave phase and amplitude. Take the 10kV power cable with transmission mixed lines for instance, the small signal model of phase locked loop was established to lock the fifth harmonic waveform. And we use Simulink to verify that the results prove the correctness of the analysis.

Key words: Small current neutral grounding system; Power cable with transmission; Fifth harmonic; Improved phase locked loop; Fault line selection