

小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究

赖平, 周想凌, 邱丹

(国网湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 小电流接地系统选线过程中常常用到暂态高频电流分量,但在高频分量提取过程中其频率范围的设定通常只能依靠经验方法进行。针对这一现状,解析分析了小电流接地系统暂态电流的频率特性,提出了暂态电流频率变化范围的估算方法,有针对性地给出故障线路与非故障线路差异性较大的特征分量,为高频分量频率范围的选定提供了理论基础。在此基础上,利用现有的滤波工具提取选定频带范围的高频分量,并结合相对熵理论计算相对熵系数矩阵,进而辨识出故障线路。仿真结果表明,所提出的选线方法具有广泛的适用性和正确性。

关键词: 特征分量; 暂态电流分量; 频率特性; 相对熵系数; 故障选线方法

Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method in indirectly grounding power system

LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan

(State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: High-frequency transient current component is used to select fault line in indirectly grounding power system, but the frequency range is usually chosen by experience method. In the view of this situation, this paper analytically analyses the frequency characteristics, proposes a method to estimate the frequency range, provides the feature components between fault line and non-fault line and lays the theoretical foundations for high-frequency component selecting. On the basis of frequency analysis, this paper extracts high-frequency components in the selected frequency range by using the existing filtering tool, calculates the relative entropy coefficient matrix combined with the relative entropy theory and then identifies the fault line. Simulation results show that the proposed route selection method has wide applicability and accuracy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207113).

Key words: characteristic component; transient frequency component; frequency characteristics; relative entropy coefficient; fault line selection method

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0051-07

0 引言

我国配电网一般采用小电流接地系统,这种接地系统出现单相故障后,故障点电流较小以至于不影响系统短时间内正常运行,因此配电网允许带单相故障继续运行 1~2 h,但发生单相接地故障后,另外两相对地相电压升高为线电压,长时间运行会造成线路绝缘损坏并扩大故障范围^[1-3]。为了减少单相故障对小电流接地系统的绝缘损害,调控运行人员必须及时尽快切除故障线路。目前,小电流接地

系统的故障选线机理和判据已有不少研究成果,其中基于故障暂态信号的选线方法由于不受消弧线圈影响且具有灵敏度高的优点而成为研究热点。文献[4-5]基于 S 变换后的幅值矩阵和相角矩阵构造了故障瞬间的暂态能量函数,并利用相对熵衡量波形的差异性,进而实现选线;文献[6-8]分别应用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)、小波包法和形态滤波器对原始信号进行逐层筛分,滤除噪声,得到高频谐波分量,并将此分量输入到判据系统中,通过观察系统的幅值或相图变化来选出故障线路;文献[9-10]分别研究了暂态持续时间内零序电荷与零序电压的特征关系以及瞬时实功率和瞬

时虚功率的变化特点, 并依据暂态变化过程中的特征分量进行故障选线; 文献[11-14]采用不同智能算法综合分析暂态信息, 并结合复合判据进行故障选线。

小电流接地系统无论是基于频率差异性还是基于相位差异性构造选线方法, 在暂态分量分析过程中, 频带范围的选取对选线结果的准确性有着重要影响, 然而有关暂态信号频段选择的研究成果却较少, 文献[15-16]虽然分析了线路零序电流的频率特性, 但侧重论证不同频段内小电流接地系统非故障线路与故障线路零序电流极性的相互关系; 文献[17]从频域角度分析故障暂态特征及电气量的分布规律, 得出了系统发生单相接地故障时不同频带上的暂态零序电流特性, 但主谐振频率的大小仍然靠经验选取; 文献[18]分析了中性点非直接接地系统零序网络的频率特性, 但研究重点是系统参数、过渡电阻、故障位置等因素对零序网络相频特性的影响。

综合现有的研究现状来看, 小电流接地系统的暂态分量具有丰富的特征信息, 是故障选线常用的特征分量, 但暂态分量频率大小及其影响因素却鲜有定量的研究成果, 在选取分析频带时也缺乏相应的选择标准。本文针对这一问题开展研究, 以故障时刻特征分量分析为依据, 推导了小电流接地系统故障线路和非故障线路的零序电流表达式, 解析分析了小电流接地系统的频率变化特性及其影响因素, 并给出了定量计算暂态电流频率大小的方法, 为高频特征分量的频带选取提供了理论基础。在此基础上, 利用现有的滤波分析工具提取估算频带内的暂态电流, 并结合相对熵系数矩阵辨识出故障线路。仿真结果表明, 论文提出的计算方法能有效选取故障线路, 并具有广泛的适用性, 为快速隔离配网单相接地故障提供了选择依据。

1 特征分量分析

1.1 稳态电流分析

一般情况下, 小电流接地系统按中性点接地方式分为不接地和经消弧线圈接地两种型式。当中性点不接地时, 接地点容性电流为全系统非故障线路容性电流之和, 如图 1 所示。

从图 1 中可以看到, 故障线路零序电流方向与非故障线路正好相反, 同时又在数值上等于非故障线路零序电流之和^[3]。因此, 利用各出线稳态零序电流分量即可辨识出发生故障的线路。

当配网系统的中性点经消弧线圈发生接地时, 接地点容性电流为全系统非故障线路容性电流与零序电感电流之和, 如图 2 所示。

为了避免系统出现谐振现象, 要求系统处于过补偿状态。消弧线圈的这种配置方式补偿了故障线

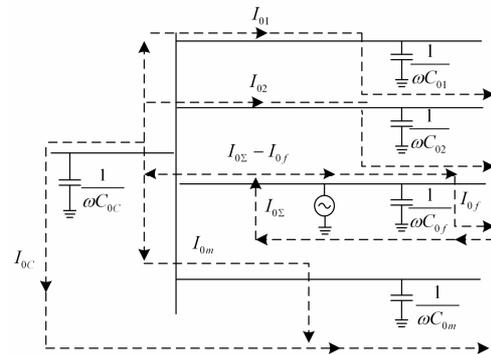


图 1 不接地系统零序电流分布

Fig. 1 Zero sequence current distribution in ungrounded power system

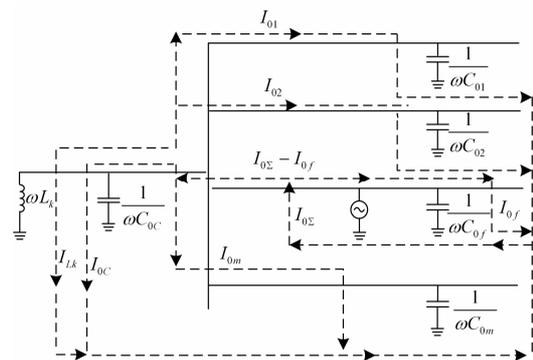


图 2 消弧线圈接地系统零序电流分布

Fig. 2 Zero sequence current distribution in Petersen coil grounding system

路的零序容性电流并导致故障线路零序电流与非故障线路零序电流的实际方向相同。此时, 利用故障后的零序电流稳态分量无法将故障线路与非故障线路区别开来^[3]。

1.2 暂态电流分析

中性点采用消弧线圈过补偿运行方式后, 故障线路与非故障线路两者在零序稳态电流分量之间没有明显区别。但对高频分量而言, 由于消弧线圈的感抗随着频率的增大而增大, 而线路对地容抗随着频率的增大而减小, 因此, 消弧线圈补偿的高频电流较小, 而线路对地容性高频电流较大, 小电流接地系统的高频分量电流处于欠补偿或不补偿状态, 如图 3 所示。

图 3 中, n 为高频分量频率与工频分量频率的系数比。根据基尔霍夫电流定律可知: 故障线路高频零序电流分量与对应的非故障线路相同频率零序电流分量之和相等。又由于非故障线路相同频率零序暂态电流分量的方向相同, 因此, 故障线路与非

故障线路零序暂态电流方向相异, 故而可以采用高频电流分量的方向来区分故障线路和非故障线路。

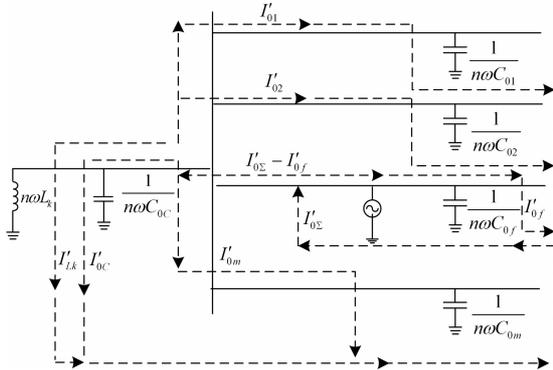


图3 消弧线圈接地系统高频电流分布

Fig. 3 High frequency current distribution in Petersen coil grounding system

2 暂态电流频率特性分析

2.1 暂态电流频率计算

根据图3建立故障时刻的零序网络等效电路, 如图4、图5所示。

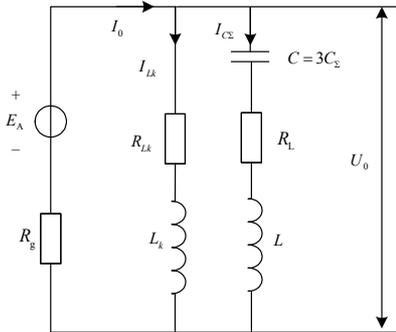


图4 故障线路零序网络等效电路

Fig. 4 Fault line equivalent circuit in zero sequence network

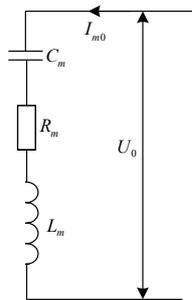


图5 非故障线路零序网络等效电路

Fig. 5 Normal line equivalent circuit in zero sequence network

图4中, E_A 为系统A相等效电势, R_g 为过渡电阻, L_k 为消弧线圈, R_{lk} 为消弧线圈等值电阻, I_{lk}

为流经 L_k 的电流, C_Σ 为电网电容, R_L 、 L 分别为线路的等效电阻和等效电感, U_0 为相应的零序电压, I_0 为出现故障点处的零序电流, $I_{C\Sigma}$ 为流经电网的电容电流。图5中, C_m 为线路 m 的对地电容, R_m 、 L_m 为线路 m 的等效电阻和电感, I_{m0} 为流经线路 m 的电流。

时域法分析图4、图5所示的动态电路涉及到高阶微分方程的求解, 故这里在频域内进行分析。由于消弧线圈的电阻 R_{lk} 相对较小, 故可以忽略不计, 令 $z_c(s) = \frac{1}{sC}$, $z_l(s) = sL_k$ 分别为电流

$I_{C\Sigma}$ 、 I_{lk} 支路的复域阻抗, 则系统总阻抗为

$$z_0(s) = R_g + z_c(s) // z_l(s) = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} B(s) = L_k LCs^3 + (R_l L_k C + R_g L_k C + R_g LC)s^2 + (L_k + R_g LC)s + R_g \\ A(s) = (L_k + L)s^2 + R_l Cs + 1 \end{cases}$$

此时, 故障点的零序电流为

$$I_0(s) = \frac{-E_A(s)}{z_0(s)} = \frac{-E_A(s)A(s)}{B(s)} \quad (2)$$

零序电压为

$$U_0(s) = -E_A(s) \cdot \frac{z_c(s) // z_l(s)}{z_0(s)} = \frac{-E_A(s) \cdot (L_k LCs^3 + R_l L_k Cs^2 + L_k s)}{B(s)} \quad (3)$$

故而可得

$$I_{m0}(s) = \frac{U_0(s)}{z_m(s)} = \frac{U_0(s) \cdot C_m s}{L_m C_m s^2 + R_m C_m s + 1} \quad (4)$$

令

$$\begin{cases} C(s) = L_k LCs^3 + R_l L_k Cs^2 + L_k s \\ D(s) = L_m C_m s^2 + R_m C_m s + 1 \end{cases}$$

则

$$I_{m0}(s) = \frac{U_0(s)}{z_m(s)} = \frac{U_0(s) \cdot C_m s}{L_m C_m s^2 + R_m C_m s + 1} = \frac{-E_A(s) \cdot C(s) \cdot C_m s}{B(s) \cdot D(s)} \quad (5)$$

不失一般性, 设

$$-E_A(t) = U \sin(\omega t + \theta) = U \sin(\omega t) \cos \theta + U \cos(\omega t) \sin \theta = \quad (6)$$

$$U_\alpha \sin(\omega t) + U_\beta \cos(\omega t)$$

式(6)中, θ 为任意角度, 此时

$$-E_A(s) = \frac{U_\alpha \omega}{s^2 + \omega^2} + \frac{U_\beta s}{s^2 + \omega^2} \quad (7)$$

故可得

$$I_{m0}(s) = \frac{U_\alpha \omega}{s^2 + \omega^2} \cdot \frac{C(s) \cdot C_m s}{B(s) \cdot D(s)} + \frac{U_\beta s}{s^2 + \omega^2} \cdot \frac{C(s) \cdot C_m s}{B(s) \cdot D(s)} = \frac{U_\alpha \omega \cdot C(s) \cdot C_m s + U_\beta s \cdot C(s) \cdot C_m s}{(s^2 + \omega^2) \cdot B(s) \cdot D(s)} \quad (8)$$

将 $I_{m0}(s)$ 进行反拉氏变换得

$$\begin{cases} i_{m0}(t) = \sum_{i=1}^n k_i e^{p_i t} \\ k_i = (s - p_i) \cdot I_{m0}(s) |_{s=p_i} \end{cases} \quad (9)$$

式中: p_i 为特征方程的根; n 为特征根的个数。此时, 故障线路馈线端的零序电流为

$$i_f(t) = \sum_{m=1, m \neq f}^T i_{m0}(t) + i_{Lk0}(t) + i_{F0}(t) = i_0(t) - i_{f0} \quad (10)$$

式中, T 为馈线总数。

2.2 暂态电流频率分析

在复数域中, 暂态分量的成分由复函数的特征根决定, 即由 $s^2 + \omega^2$ 、 $D(s)$ 、 $B(s)$ 的根决定。其中: $s^2 + \omega^2$ 决定的频率为 $s = \omega$, 即 $f = 50 \text{ Hz}$; $D(s)$ 决定的频率与该线路本身的元件参数有关, 只包含有一个高频分量; $B(s)$ 的特征根由系统参数决定, 且 $B(s)$ 中包含两个频率随参数变化的分量。由此可知小电流接地系统发生故障后的频率分量由 $D(s)$ 和 $B(s)$ 共同决定, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} B(s) = L_k LCs^3 + (R_L L_k C + R_g L_k C + R_g LC)s^2 + (L_k + R_g LC)s + R_g \\ D(s) = L_m C_m s^2 + R_m C_m s + 1 \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, 频率大小只与电气元件参数和过渡电阻 R_g 有关。但在实际小电流接地系统中, 单相接地故障后的暂态过程常常伴随着电弧放电现象, 并且故障点位置未知导致图 4 中的等效参数存在不确定性, 因此, 发生单相接地后暂态电流分量的频率大小只能是一个估算值, 但相对于经验性选取高频带的方法已经精确不少, 并且随着馈线数量的增多, 故障点位置对频率特性的影响逐渐较小。

3 暂态分量相对熵分析

3.1 相对熵系数选线原理

相对熵是两个随机分布之间距离的度量, 描述了每个变量所提供平均信息量的不确定性, 其定义

如式(12)所示。

$$D(P \parallel Q) = \sum P(i) \log \left(\frac{P(i)}{Q(i)} \right) \quad (12)$$

式中: P 表示数据的真实分布; Q 表示数据的理论分布。在信息论中, 相对熵可用于度量波形的差异性, 相对熵系数越大, 意味着波形的差异性越大, 相对熵系数越小意味着波形的差异越小^[19]。

中性点不接地系统中, 故障线路零序电流方向与非故障线路相反, 可以直接利用各条馈线零序电流的相对熵系数辨识故障线路; 而经消弧线圈接地的系统中, 只有暂态高频分量之间具有较大的差异, 因此, 在计算相对熵系数前需要先对馈线零序电流进行滤波处理, 在提取故障时刻的暂态电流分量后再利用相对熵系数辨识故障线路。由于暂态电流的频率随着过渡电阻的变化而变化, 因此, 在对馈线零序电流滤波前还要通过电气元件参数和过渡电阻变化范围计算确定合适的滤波频带, 有针对性地提取差异性较大的暂态分量, 进而提高选线方法的准确性。

3.2 暂态分量相对熵选线步骤

不接地系统和经消弧线圈接地系统的故障选线步骤有一定的差别, 但都可以统一为一个选线流程, 如图 6 所示。

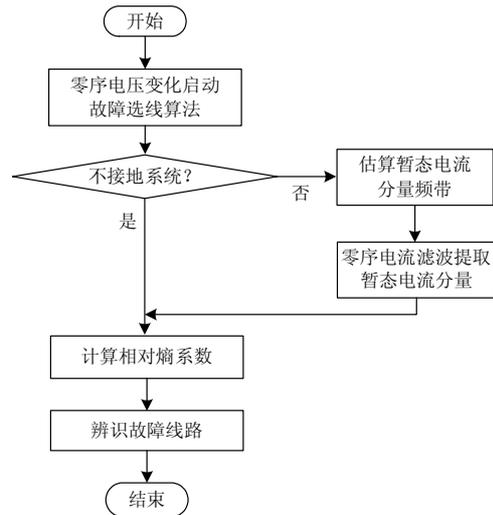


图 6 故障选线流程图

Fig. 6 Flow diagram of detecting faulty line

本文提出的故障选线方法的详细步骤如下:

步骤一: 小电流接地系统发生单相接地故障后, 零序电压升高为相电压启动故障选线程序;

步骤二: 对于不接地系统, 直接进入相对熵系数计算环节, 而经消弧线圈接地系统则需要先根据电气元件参数和过渡电阻范围估算滤波频带, 再利用滤波工具提取频带暂态电流高频分量, 然后进入相对熵计算环节;

步骤三: 计算相对熵系数;

步骤四: 根据相对熵系数形成相对熵矩阵, 通过各条馈线之间的相对熵系数关系辨识故障线路。

4 算例分析

4.1 仿真建模

本文利用 PSCAD 仿真工具建立了小电流接地系统仿真平台, 如图 7 所示。

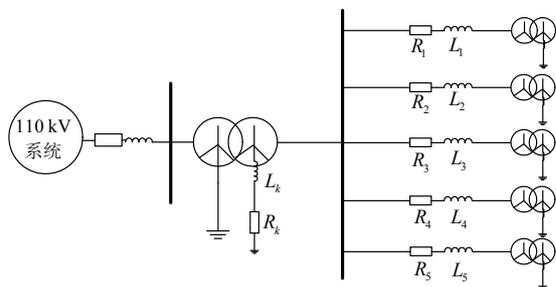


图 7 时域仿真模型

Fig. 7 Time-domain simulation models

图 7 中, 小电流接地系统共有 5 回出线, 且中性点经消弧线圈接地。仿真平台高压侧连接至 110 kV 系统, 低压侧连接至 35 kV 系统。

4.2 暂态频率特性分析

小电流接地系统的等值参数如表 1 所示。

表 1 线路等值参数

Table1 Equivalent circuit parameters

参数名	等值参数大小
C	5.25 μF
R_i	2.54 Ω
L	6 mH
L_k (过补偿)	0.965 H
C_m	1.72 μF
R_m	12.7 Ω
L_m	30 mH

此时, $D(s)$ 表征的频率大小为 700 Hz, 令 $R_g = 1 \sim 1000 \Omega$, 得 $B(s)$ 中频率与过渡电阻 R_g 的关系如图 8 所示。

由图 8 可知, 在给定系统网络参数后, 频率是过渡电阻的单变量函数。在 $0 \sim 100 \Omega$ 范围内, 频率随过渡电阻的增大而迅速衰减; 在 $100 \sim 280 \Omega$ 范围内, 频率为零; 在 $280 \sim 1000 \Omega$ 范围内, 频率稳定在 90 Hz 左右。由于故障时刻过渡电阻的非线性, 过渡电阻通常在 $50 \sim 500 \Omega$ 范围内变化。此时, 故障时刻高频分量频率区间为 $80 \sim 550 \text{ Hz}$, 考虑故障位置的变化后频率区间为 $75 \sim 600 \text{ Hz}$ 。综合 $D(s)$ 、 $B(s)$ 的频率特性, 暂态电流频率的估算范围约在 $75 \sim 700 \text{ Hz}$ 之间。

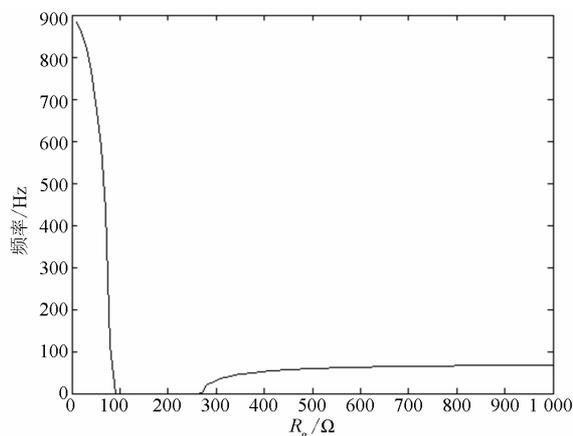


图 8 频率-过渡电阻关系

Fig. 8 Relationship between frequency and transition resistance

4.3 暂态分量相对熵选线

线路 4 距离母线 10% 发生接地故障后, 各条馈线的电流如图 9 所示。

暂态电流分量估算的频率范围在 $80 \sim 700 \text{ Hz}$ 之间, 利用小波包的分解和重构工具提取故障时刻该频率区间的暂态电流分量, 如图 10 所示。

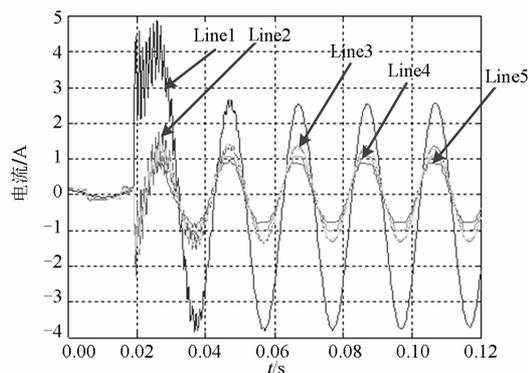


图 9 故障后各条馈线零序电流

Fig. 9 Zero sequence fault current

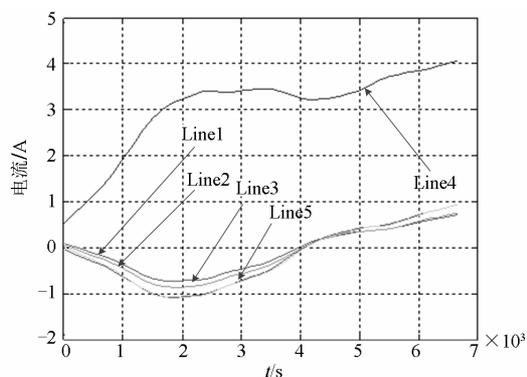


图 10 滤波后电流分量

Fig. 10 Filtering current component

依据提取的暂态电流分量计算各馈线之间的相对熵矩阵,并以计算结果中的最大熵值为参照对计算结果进行归一化处理,如表2所示。

表2 相对熵归一化系数矩阵

Table 2 Normalization coefficient matrix of relative entropy value

相对熵 ($i=1-5$)	D1	D2	D3	D4	D5
$L(i,1)$	—	0.023	0.002	0.331	0.042
$L(i,2)$	0.031	—	0.027	0.397	0.076
$L(i,3)$	0.067	0.060	—	0.352	0.087
$L(i,4)$	0.897	0.990	0.976	—	1.0
$L(i,5)$	0.067	0.035	0.091	0.357	—

表2中第4列和第4行的相对熵系数最大,这意味着线路4与其他线路的暂态电流分量的差异性较大,据此可以判定线路4为故障线路。

4.4 选线方法适用性分析

为了进一步验证选线方法的适用性,本文充分考虑故障位置、故障时刻初始相角对选线结果的影响,选线结果如表3所示。

表3 故障选线结果

Table 3 Results of detecting fault line

故障 线路	故障位置/ %	初始相角 ($^{\circ}$)	选线 结果
1	10	60	1
1	90	90	1
2	10	0	2
2	10	90	2
4	90	30	4
4	90	90	4
5	10	30	5
5	60	9	5

从选线结果可以看出,在故障位置、接地电阻、初始相位多变的条件下,本文提出的故障选线方法具有广泛的适用性和准确性。

5 结论

本文推导了小电流接地系统单相故障后零序电流的解析表达式,分析了暂态分量的频率特性,并据此选取零序电流的特征分量。特征分量确定后,结合相对熵理论计算故障后各条馈线之间的相对熵系数矩阵,通过比较分析暂态分量的相对熵系数辨识出故障线路。本文的主要结论如下:

(1) 在电网参数已知的条件下,小电流接地系统暂态高频分量的频率大小主要由网络等效参数和过渡电阻决定,通过估算过渡电阻的范围和等效参数可以预先估计暂态分量的频率变化范围,并根据频

率特性的分析结果有针对性地选取故障线路与非故障线路之间差异性较大的频率分量作为特征分量;

(2) 基于频带分析选取频率特征分量的方法相对于经验法具有更强的目标性。在充分考虑故障位置、故障时刻初始相角等影响因素后,这种结合暂态分量频率预估的相对熵小电流故障选线算法均能准确选线,具有广泛的有效性。

参考文献

- [1] 张志竟, 黄玉铮. 电力系统继电保护原理与运行分析[J]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [4] 张钧, 刘洪星, 何正友, 等. 基于瞬时能量函数的故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 1-5.
ZHANG Jun, LIU Hongxing, HE Zhengyou, et al. A novel fault line identification approach based on instantaneous energy function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 1-5.
- [5] 王晓卫, 田书, 李玉东, 等. 基于S变换特征频率序列的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 109-115.
WANG Xiaowei, TIAN Shu, LI Yudong, et al. A novel fault section location method for small current neutral grounding system based on characteristic frequency sequence of S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 109-115.
- [6] 张淑清, 翟欣沛, 董璇, 等. EMD及Duffing振子在小电流系统故障选线方法中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 161-167.
ZHANG Shuqing, ZHAI Xinpei, DONG Xuan, et al. Application of EMD and duffing oscillator to fault line detection in un-effectively grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 161-167.
- [7] 李也白, 唐克义, 张霄霄, 等. 小波包原理小电流接地选线装置的研发与应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 159-162.
LI Yebai, TANG Keyi, ZHANG Xiaoxiao, et al. Research and application of small current grounding line selection device based on wavelet packet principle[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(2): 159-162.
- [8] 曲铁龙, 谭伟璞, 杨以涵. 基于形态滤波的谐振接地系统故障选线新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 73-77.

- QU Yilong, TAN Weipu, YANG Yihan. A new transient method for earth fault line selection in resonant grounded power system based on morphological filtering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 73-77.
- [9] 王圯, 何正友, 张姝. 基于零序电荷-零序电压关系的谐振接地系统单相接地故障特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 18-24.
- WANG Qi, HE Zhengyou, ZHANG Shu. Characteristics analysis of single-phase ground fault in resonant grounding system based on zero-sequence charge-voltage relationship[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 18-24.
- [10] 李斌, 束洪春. 基于瞬时实功率和瞬时虚功率的谐振接地系统单相接地选线新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 183-190.
- LI Bin, SHU Hongchun. A new integration method of fault line detection in resonant earthed system based on instantaneous real power and instantaneous virtual power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 183-190.
- [11] 梁睿, 王洋洋. 基于直觉模糊集的单相接地故障综合选线方法[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 228-234.
- LIANG Rui, WANG Yangyang. An intuitionistic fuzzy set based synthetical approach of faulty line selection for single-phase ground fault[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 228-234.
- [12] 张海平, 何正友, 张钧, 等. 基于量子神经网络和证据融合的小电流接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 171-178.
- ZHANG Haiping, HE Zhengyou, ZHANG Jun, et al. A fault line detection method for indirectly grounding power system based on quantum neural network and evidence fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 171-178.
- [13] 庞清乐, 孙同景, 钟麦英, 等. 基于粗集理论的小电流接地系统故障选线[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 60-64.
- PANG Qingle, SUN Tongjing, ZHONG Maiying, et al. Fault line detection based on rough set theory in indirectly grounding power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 60-64.
- [14] 张庆超, 姚斌, 杨金飞, 等. 基于RS维数的小电流接地系统故障选线和定位[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 164-169.
- ZHANG Qingchao, YAO Bin, YANG Jinfei, et al. Fault line identification and fault location of non-direct ground neutral system based on R/S dimension[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 164-169.
- [15] 邢亚辉, 王海军, 吕艳萍. 基于线路零序频率特性的小电流接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 59-62.
- XING Yahui, WANG Haijun, LÜ Yanping. Faulty line selection in non-solid earthed network based on zero sequence frequency characteristic of transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 59-62.
- [16] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 28(19): 65-70.
- XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin. Analysis of transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 28(19): 65-70.
- [17] 揭林玲, 唐昆明, 张太勤, 等. 基于暂态信号相频特性的小电流接地选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 50-54.
- JIE Linling, TANG Kunming, ZHANG Taiqin, et al. Research on ground fault line detection based on phase-frequency characteristics of transient signals[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 50-54.
- [18] 张伟刚, 张保会. 中性点非直接接地系统零序网络的相频特性[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 71-75.
- ZHANG Weigang, ZHANG Baohui. Phase-frequency characteristics of zero sequence network in neutral indirectly grounding power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 71-75.
- [19] 王晓卫, 吴继维, 李然月, 等. 基于Prony相对熵的故障投票选线新方法[J]. 中国电力, 2013, 46(1): 59-64.
- WANG Xiaowei, WU Jiwei, LI Ranyue, et al. A novel method of fault line selection based on voting mechanism of Prony relative entropy theory[J]. Electric Power, 2013, 46(1): 59-64.

收稿日期: 2014-05-16; 修回日期: 2014-06-16

作者简介:

赖平(1959-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析、运营管理等相关工作;

周想凌(1965-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统运营管理工作;

邱丹(1982-), 女, 博士, 工程师, 主要从事电网运行相关工作. E-mail: 93965809@qq.com

(编辑 周金梅)