

基于消弧线圈补偿特征的故障选线新方法

司瑞琦¹, 黄翰², 罗建¹, 吴罗生³, 吉畅¹, 钟璐⁴

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 国网重庆市电力公司璧山供电分公司, 重庆 402760; 3. 国网随州供电公司, 湖北 随州 441300;
4. 国网重庆市电力公司江北供电分公司, 重庆 400000)

摘要: 为解决零序电流互感器极性不明确导致选线错误的问题, 提出一种根据消弧线圈补偿特征的选线新方法。对于每条线路建立健全线路数学模型, 利用零序电压电流暂态分量与基频分量求取相应的导纳参数。针对分量“湮没”问题, 提出一种矩阵束的改进方法实现小幅值高频分量的精确提取。分析得到消弧线圈补偿作用规律: 在确定频段内故障线路两参数符号相反或数值明显减小, 健全线路两参数计算结果相近, 可实现故障判断。仿真实验结果验证了该方法摆脱了零序互感器极性不同导致选线错误的限制, 无需线路参数信息即可实现故障自判, 适应性强。

关键词: 消弧线圈接地系统; 单相接地故障; 电流互感器极性; 矩阵束; 故障选线

Fault line selection approach based on compensation characteristics of extinction coil

SI Rui-qi¹, HUANG Han², LUO Jian¹, WU Luo-sheng³, JI Chang¹, ZHONG Lu⁴

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Bishan Branch of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 402760, China; 3. Suizhou Branch of Hubei Electric Power Company, Suizhou 441300, China; 4. Jiangbei Branch of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400000, China)

Abstract: Anti-polarity of zero sequence CT leads to failure of fault line selection in extinction coil grounding system. In order to overcome the drawback, a new approach using compensation characteristics of extinction coil is proposed. The healthy line mathematical model for each line is built and the transient component and steady component of zero sequence voltage and current are used to get corresponding admittance parameters. To solve the component annihilation, this paper presents an improved matrix pencil algorithm for the extraction of high frequency component of small amplitude. The rule of the compensation effect of extinction coil is obtained that in set frequency band two component parameters of fault line are opposite in sign or decrease significantly in numerical values and the calculation results for two parameters of healthy line are similar, the fault line selection is realized. Simulation results verify the correctness of the algorithm without the impact of anti-polarity of zero sequence CT, which has highly adaptive capacity for practical engineering.

Key words: extinction coil grounding system; single-line to ground fault; CT polarity; matrix pencil; fault line selection

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0016-07

0 引言

目前, 中性点经消弧线圈接地的配网系统已广泛应用。在实际应用中发现零序电流互感器的接线极性错误情况时常发生^[1], 特别是老站这种情况更多, 而停电校验又往往不能即时进行。在此情况下, 基于零序电流互感器极性的单相接地故障选线方法^[2-5]不能达到满意的故障选线正确率。

针对以上的零序电流互感器极性错误问题, 有

必要就中性点经消弧线圈接地的单相接地故障选线方法开展进一步的研究。文献[6]提出一种利用消弧线圈补偿特性的单相接地故障选线方法, 即在消弧线圈过补偿状态下, 故障线路的零序电流相位存在倒相过程, 非故障线路的不存在倒相过程; 在消弧线圈补偿过程中, 故障线路的零序电流幅值存在衰减特性, 非故障线路的幅值不存在衰减特性。该方法采用求取零序电流瞬时相位和瞬时幅值的手段, 获得消弧线圈的补偿特性, 以判断故障线路; 但该方法

求取零序电流瞬时相位和瞬时幅值的误差较大, 影响单相接地故障选线的正确率。文献[7]提出一种零序补偿导纳的选线方法, 认为在消弧线圈补偿作用下, 故障线路的零序导纳变化大, 而非故障线路的零序导纳变化小。由于接地瞬间的零序导纳不易求取, 该方法计算每回线路正常运行时的零序导纳, 将补偿作用后的测量零序导纳与计算零序导纳比较, 相差大的为故障线路。由于配网运行方式影响线路零序导纳的计算值, 且流经故障线路的并不是自身电容电流, 而是全网健全线路电容电流之和, 整定难度较大, 此方法还不理想。

若能求取接地瞬间的零序导纳或零序参数, 就可将接地瞬间的零序参数与补偿作用后的零序参数进行比较, 符号改变或者差距超过阈值的判为故障线路。这一方法的关键是接地瞬间零序参数的求取。

在接地瞬间, 配网线路的零序电流和零序电压包含基频分量和多个衰减自由频率分量, 每个分量的电流电压都约束于相应的线路参数。由于配网线路的参数在一定的频带内可认为不变^[8], 因此在一定频带内, 每个频率分量的电流电压都约束于相同的线路参数。

基于此, 本文提出利用接地瞬间的主衰减自由频率分量计算接地瞬间零序参数。由于现有的矩阵束方法在小幅值衰减自由分量提取过程中, 容易出现被大幅值低频分量“湮没”的情况^[9]。本文给出一种矩阵束的改进方法来提取接地瞬间的主衰减自由频率分量。仿真实验结果表明本文方法选线特征明确, 可不受零序电流互感器极性的影响。

1 单相接地故障特征分析

谐振接地系统单相接地故障暂态零序电流信号的频率范围大约为 0~3 kHz, 其简单线路可用 π 型模型等效^[10], 故当谐振接地系统第 n 条出线发生单相接地时, 其简化的零序网络如图 1 所示, 设故障点电压表达式为 $U(t)=U_m \sin(\omega_0 t + \alpha)$, 可得到母线处零序电压的拉普拉斯表达式为

$$U_0(s) = U_m \frac{sL(s \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha)}{(s^2 RLC + sL + R)(s^2 + \omega_0^2)} \quad (1)$$

故障线路导纳 $Y_{\text{eqf}}(s)=[s(C-C_d)+1/sL]/s$, 健全线路导纳 $Y_{\text{eqn}}(s)=C_n$ 。式中: C 为系统总对地等效电容, C_d 为接地故障线路对地等效电容; C_n 为第 n 条线路对地等效电容 (线路的零序电抗和消弧线圈电阻远小于其对地的电容与消弧线圈电抗, 可忽略不计); L 为消弧线圈电感值; R 为系统等效电阻。

同理可得故障线路和健全线路零序电流的拉氏

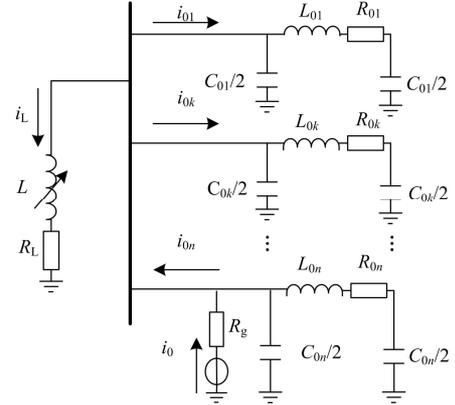


图 1 消弧线圈接地系统单相接地故障零序线路等效网络图

Fig. 1 Zero sequence circuit of NES

变换表达式如式(2)、式(3)。

$$I_f(s) = -U_0(s) \cdot sY_{\text{eqf}}(s) = -U_m \frac{sL[s(C-C_d)+1/sL](s \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha)}{(s^2 RLC + sL + R)(s^2 + \omega_0^2)} \quad (2)$$

$$I_n(s) = U_0(s) \cdot sY_{\text{eqn}}(s) = U_m \frac{s^2 LC_n (s \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha)}{(s^2 RLC + sL + R)(s^2 + \omega_0^2)} \quad (3)$$

拉氏变换得到的复频域极点 $s=\sigma \pm j\omega$, $\omega=2\pi f$, σ 为 ω 对应的衰减系数, 设补偿系数 $\lambda=1+1/[s^2 L \cdot (C-C_d)]$, 可得 $Y_{\text{eqf}}(s)=\lambda(C-C_d)$ 。由于高频极点频率较高、衰减系数较大, 该复频域参数 s 下消弧线圈电流分量较小 ($1/[s^2 L(C-C_d)] \approx 0$), $Y_{\text{eqf}}(s) \approx C-C_d$, 电流可近似等效为电路中的电容电流^[1]。零序电流波形如图 2 所示。

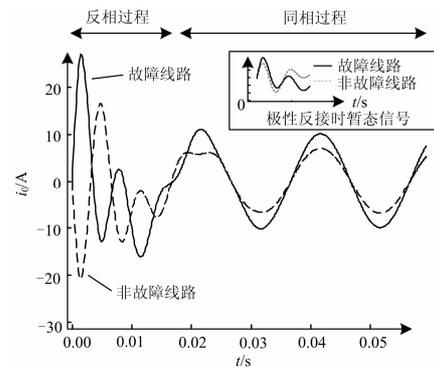


图 2 零序电流波形

Fig. 2 Zero sequence current wave

随着振荡分量衰减, 基频分量电流成为主要成分, 此时消弧线圈的补偿作用逐渐体现, $s_0=j\omega_0(\omega_0=100\pi)$, $1/[s^2 L(C-C_d)]$ 分量所占比重大幅度增加, $Y_{\text{eqf}}(s_0)$ 产生明显变化。

如图 3 所示, 当 $\lambda < 0$ (欠补偿) 时, $Y_{\text{eqf}}(s_0)$ 幅值减

小；当 $\lambda=0$ (完全补偿)时， $Y_{eqf}(s_0)$ 为零；当 $\lambda>0$ (过补偿)时， $Y_{eqf}(s_0)$ 符号改变。

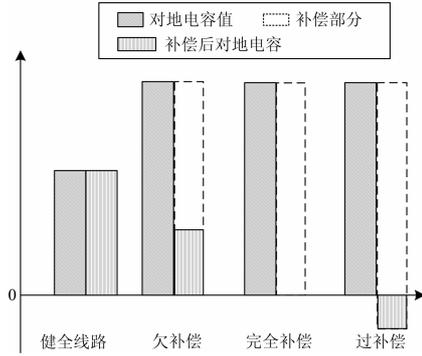


图3 线路对地电容补偿特征示意图

Fig. 3 Diagram of the capacitance compensation characteristics

消弧线圈一般采用过补偿方式，为限制接地电流，欠补偿度或过补偿度都不应超过10%^[1]，可得 $\lambda \in [-0.1, 0.1]$ 。由于消弧线圈的补偿作用使得故障线路 Y_{eqf} 发生明显变化，而健全线路 Y_{eqn} 幅值变化不大，该特征可明显判断线路是否故障。而如何准确获得出线侧零序电压和零序电流信号参数成为了提高选线成功率的关键。

2 差分矩阵束算法

2.1 差分矩阵束基本原理

矩阵束算法^[11](MatrixPencil, MP)将暂态信号表示为一组幅值按指数规律变化的指数(一对共轭指数可表示为一个余弦信号)的线性组合，即

$$y(kT_s) = \sum_{i=1}^M R_i e^{S_i k T_s} = \sum_{i=1}^M R_i e^{(-\sigma_i + j\omega_i) k T_s} \quad (4)$$

式中： $k=0, 1, \dots, N$ ，其中 N 为最大采样点数； R_i ， σ_i ， ω_i 分别为第 i 个信号的复幅值、衰减系数和角频率； T_s 为采样间隔； M 为信号的阶数。构造Hankel矩阵为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(L) \\ y(1) & y(2) & \dots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \dots & y(N) \end{bmatrix}_{(N-L+1) \times (L+1)} \quad (5)$$

式中， L 为束参数，恰当地选取 L 可以有效地抑制噪声干扰，通常取值为 $N/3$ 到 $N/2$ 之间。

通过大量仿真计算发现，高频极点有时受到较大基频分量、衰减分量的影响，如母线零序电压、小角度故障时的零序电流等信号中衰减高频分量的幅值较为微弱，有时甚至被其他分量湮没，求取幅

值和初相角之前各级计算都有舍入误差积累，从而导致计算结果失效^[9]，矩阵束算法在高频极点分量提取过程当中会出现较大误差(后文将作详细分析)。针对这一问题，本文提出了利用差分矩阵束用来提取高频极点参数。

去掉 \mathbf{Y} 最后一行得到 \mathbf{Y}_1 ，去掉第一行得到 \mathbf{Y}_2 ，利用 \mathbf{Y}_1 、 \mathbf{Y}_2 生成矩阵 $\mathbf{Y}_x = (\mathbf{Y}_2 - \mathbf{Y}_1)/T_s$ ，当采样频率较高时， $T_s \rightarrow dt$ ， $\mathbf{Y}_x \rightarrow d\mathbf{Y}/dt$ ，可得

$$y_x(kT_s) = \sum_{i=1}^M (-\sigma_i + j\omega_i) \cdot R_i e^{(-\sigma_i + j\omega_i) k T_s} \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}_x = \begin{bmatrix} \dot{y}(0) & \dot{y}(1) & \dots & \dot{y}(L) \\ \dot{y}(1) & \dot{y}(2) & \dots & \dot{y}(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{y}(N-L-1) & \dot{y}(N-L) & \dots & \dot{y}(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)} \quad (7)$$

对 \mathbf{Y}_x 进行奇异值分解得到信号阶数 M 以及极点 S_i 求取与原矩阵束方法相同，不再赘述。信号复幅值 R_i 可以从式(8)按照最小二乘法求得。

$$\begin{bmatrix} y_x(0) \\ y_x(1) \\ \vdots \\ y_x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ S_1 & S_2 & \dots & S_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_1^{N-1} & S_2^{N-1} & \dots & S_M^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \ln S_1 \\ R_2 \ln S_2 \\ \vdots \\ R_M \ln S_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

经过DMP处理后的信号由式(6)、式(8)可以得出结论：矩阵 \mathbf{Y}_x 利用差分通过指数系数放大高频极点复幅值，更利于提取极点分量；特定频率信号的幅值和相位，解得 S_i 和 R_i 后即可通过式(9)求得 R_i 、 σ_i 、 ω_i 。

$$\begin{cases} \varphi_i = \arctan \frac{\text{Im}(R_i)}{\text{Re}(R_i)} \\ \sigma_i = \frac{-\text{Re}(\ln R_i)}{T_s} \\ \omega_i = \frac{\text{Im}(\ln S_i)}{T_s} \\ A_i = |R_i| \end{cases} \quad (9)$$

2.2 理想信号算例

为体现差分矩阵束方法的有效性，设信号为

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + x_4(t) \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} x_1(t) = 0.3e^{-100t} \cos(431 \times 2\pi t + 60^\circ) \\ x_2(t) = 5 \times \cos(50 \times 2\pi t + 90^\circ) \\ x_3(t) = 0.9e^{-300t} \cos(250 \times 2\pi t + 20^\circ) \\ x_4(t) = 2e^{-30t} \end{cases}$$

应用矩阵束算法对信号 $x(t)$ 进行分析, 结果如表 1 所示。其中, 数据窗为 40 ms, 采样频率为 10 kHz。矩阵束(MP)和差分矩阵束(DMP)两种算法的分析结果如表 1 所示。信号 x 处理波形及拟合方差如图 4 所示。

 表 1 信号 x 的分析结果

 Table 1 Estimation results of signal x

信号成分	频率/Hz		幅值		相位/(°)		衰减系数/s ⁻¹	
	MP	DMP	MP	DMP	MP	DMP	MP	DMP
X1	370.3	430.1	0.23	0.3	10.4	59.8	35.4	98.3
X2	49.9	49.9	5.01	4.97	91.2	92.1	0.01	0.001
X3	240.1	250.2	0.42	0.91	-6.1	19.9	190.3	302.5
X4	0.001	0.001	3	1.5	0	0	56.3	27.5

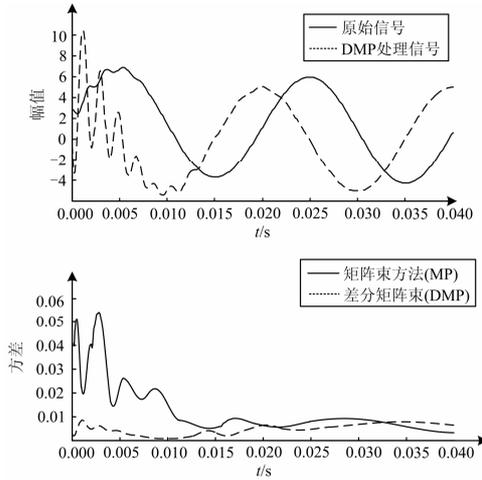

 图 4 信号 x 处理波形及拟合方差

 Fig. 4 Waveforms and curve variance of signals x and DMP signal

结果分析表明, 矩阵束算法对幅值较大的基频信号参数求取较为准确, 而幅值较小的谐波湮没于低频信号时, 参数估计出现较大误差。差分矩阵束算法在不破坏信号原始信息的前提下, 利用极点系数将高频信号幅值增大, 能够准确估计各分量参数信息, 提高了线路参数计算精度。

3 “补偿特征”选线方法基本原理

3.1 复频域参数方程组

根据图 1 可以得到各线路出线处复频域下电流电压关系方程为

$$U(s) = I(s)[(R_0 + sL_0 + 2/sC_0)/(2/sC_0)] \quad (11)$$

整理可得

$$U(s) = \left(\frac{R_0}{2} + \frac{sL_0}{2} + \frac{1}{sC_0}\right)I(s) - \left(\frac{sR_0C_0}{4} + \frac{s^2L_0C_0}{4}\right)U(s) \quad (12)$$

将 $s = \sigma + j\omega$ 代入上式, 设复频域极点下电压电流实部虚部分别为 U_R, U_I, I_R, I_I , 可得复频域方程组为

$$U_R = -\frac{\sigma R_0 C_0}{4} U_R + \frac{\omega R_0 C_0}{4} U_I + \frac{\sigma L_0}{2} I_R - \frac{\omega L_0}{2} I_I - \frac{L_0 C_0}{4} (\sigma^2 - \omega^2) U_R + \frac{\omega \sigma L_0 C_0}{2} U_I + \frac{\sigma}{(\sigma^2 + \omega^2) C_0} I_R + \frac{\omega}{(\sigma^2 + \omega^2) C_0} I_I + \frac{R_0}{2} I_R \quad (13)$$

$$U_I = -\frac{\sigma R_0 C_0}{4} U_I - \frac{\omega R_0 C_0}{4} U_R + \frac{\sigma L_0}{2} I_I + \frac{\omega L_0}{2} I_R - \frac{L_0 C_0}{4} (\sigma^2 - \omega^2) U_I - \frac{\omega \sigma L_0 C_0}{2} U_R + \frac{\sigma}{(\sigma^2 + \omega^2) C_0} I_I - \frac{\omega}{(\sigma^2 + \omega^2) C_0} I_R + \frac{R_0}{2} I_I \quad (14)$$

通过差分矩阵束得到的 n 组高频极点信息分别代入式(13)、式(14), 形成计算矩阵 $A = By$, 其中

$$A = [U_{1R}, U_{1I}, \dots, U_{nR}, U_{nI}]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\sigma U_{1R}}{4} + \frac{\omega U_{1I}}{4} & \frac{\sigma I_{1R}}{2} + \frac{\omega I_{1I}}{2} & \frac{(\sigma^2 - \omega^2) U_{1R}}{4} + \frac{\omega \sigma U_{1I}}{2} & \frac{\sigma I_{1R}}{\sigma^2 + \omega^2} + \frac{\omega I_{1I}}{\sigma^2 + \omega^2} & \frac{I_{1R}}{2} \\ \frac{\sigma U_{1R}}{4} - \frac{\omega U_{1I}}{4} & \frac{\sigma I_{1R}}{2} - \frac{\omega I_{1I}}{2} & \frac{(\sigma^2 - \omega^2) U_{1R}}{4} - \frac{\omega \sigma U_{1I}}{2} & \frac{\sigma I_{1R}}{\sigma^2 + \omega^2} - \frac{\omega I_{1I}}{\sigma^2 + \omega^2} & \frac{I_{1R}}{2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\sigma U_{nR}}{4} + \frac{\omega U_{nI}}{4} & \frac{\sigma I_{nR}}{2} + \frac{\omega I_{nI}}{2} & \frac{(\sigma^2 - \omega^2) U_{nR}}{4} + \frac{\omega \sigma U_{nI}}{2} & \frac{\sigma I_{nR}}{\sigma_n^2 + \omega_n^2} + \frac{\omega I_{nI}}{\sigma_n^2 + \omega_n^2} & \frac{I_{nR}}{2} \\ \frac{\sigma U_{nR}}{4} - \frac{\omega U_{nI}}{4} & \frac{\sigma I_{nR}}{2} - \frac{\omega I_{nI}}{2} & \frac{(\sigma^2 - \omega^2) U_{nR}}{4} - \frac{\omega \sigma U_{nI}}{2} & \frac{\sigma I_{nR}}{\sigma_n^2 + \omega_n^2} - \frac{\omega I_{nI}}{\sigma_n^2 + \omega_n^2} & \frac{I_{nR}}{2} \end{bmatrix}$$

$$y = \left[R_0 C_0, L_0, L_0 C_0, \frac{1}{C_0}, R_0 \right]^T$$

通过矩阵运算可以得到线路参数 R_0, L_0, C_0 。利用式(15)可求得基频极点 $s_0(j\omega_0)$ 下等效电容 C_{eq} 。

$$\begin{bmatrix} U_R - \frac{R_0 I_R}{2} - \frac{\omega_0 L_0 I_I}{2} \\ U_I - \frac{R_0 I_I}{2} - \frac{\omega_0 L_0 I_R}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_0 R_0 U_{0I} + \omega_0^2 L_0 U_{0R}}{4} & \frac{I_{0I}}{\omega_0} \\ \frac{-\omega_0 R_0 U_{0R} + \omega_0^2 L_0 U_{0I}}{4} & -\frac{I_{0R}}{\omega_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{eq} \\ \frac{1}{C_{eq}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.2 计算结果分析

复频域参数计算过程中发现, 高频极点的选取对计算结果具有明显的影响。以某 20 km 线路为例, 对 C_0 辨识结果进行分析。

电力系统中线路末端负荷零模阻抗为无穷大, 线路末端为开路状态^[12], 可以绘制出线路阻抗相频特性曲线, 为消除消弧线圈的影响, 可用高频分量频率下限可定为 4 倍工频, 计算结果如图 5 所示, 当极点频率小于线路首次串联谐振频率 ω_s 时, 电容计算结果与真值非常接近, 当极点频率进一步增大时, 电容计算结果不断下降, 导致算法失效。幅值最大的高频极点分量定义为自由振荡分量 s_d , 其频率 ω_d 可以表示为

$$\omega_d = \sqrt{1/(L_0 C_0) - (R_0/2L_0)^2} < \omega_s = \pi/(2\sqrt{L_0 C_0}) \quad (16)$$

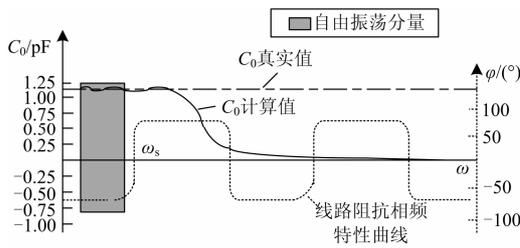


图 5 信号 x 处理波形及拟合方差

Fig. 5 Waveforms and curve variance of signals x and DMP signal

由于线路分布电容与电感谐振作用, 结果表明所选分量极点频率大于 ω_s 时, 对地电容辨识结果出现较大误差, 而选取高频分量频率小于 ω_d 参数可以较为准确辨识, 结果可以得到以下特点。

(1) 故障线路: 过补偿补偿后对地电容为负($\lambda < 0$), 完全补偿补偿后对地电容为零($\lambda = 0$), 欠补偿条件下补偿后电容幅值明显减小($0 < \lambda < 1$);

(2) 健全线路: 补偿后对地电容与实际对地电容值近似相等 ($\lambda \approx 1$);

(3) 故障线路与健全线路电容自判, 不需要综合群比信息, 不涉及极性判断。

3.3 “补偿特征”方法选线流程

本方法利用母线处零序电压与各条线路零序电流进行选线, 步骤如下:

(1) 利用差分矩阵束算法对各条线路零序电流进行复频域分析, 得到各成分特征分量复幅值(实部、虚部)、衰减系数、频率;

(2) 利用高频分量计算线路参数, 得到对地电容值 C_0 ;

(3) 利用基频分量计算补偿后对地电容值 C_{eq} , 自比判断“补偿特征”, 线路 i 是否处于过补偿状态($\lambda < 0$), 如成立判断为故障线路, 如不成立进入流程(4);

(4) 判断线路 i 是否处于欠补偿状态或完全补偿状态, 其中 ε_{set} 据实际补偿度设定, 理论计算设定为0.5, 流程图如图6所示。

4 仿真分析

利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 仿真软件搭建 10 kV 配网仿真模型, 进行单相接地故障的仿真实验, 采样频率 $f_s=10$ kHz, 数据窗为 40 ms。如图 7 所示, 变压器变比为 110/10.5 kV, 容量为 50 MVA。线路单位长度参数如表 2 所示, 线路 1 和 3 为架空线路, 线路 2 和线路 4 为电缆线路。线路参数如表 2 所示。

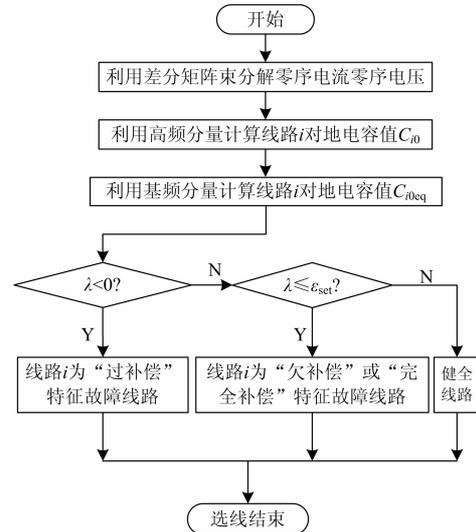


图 6 故障选线流程

Fig. 6 Flow chart of fault line selection

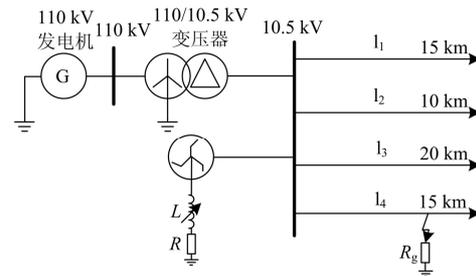


图 7 单相接地仿真电路

Fig. 7 Simulation circuit of single-phase ground fault

表 2 线路参数

Table 2 Line parameters

线路类型	正序参数			零序参数		
	$R_1/(\Omega/\text{km})$	$L_1/(\text{mH}/\text{km})$	$C_1/(\text{nF}/\text{km})$	$R_0/(\Omega/\text{km})$	$L_0/(\text{mH}/\text{km})$	$C_0/(\text{nF}/\text{km})$
架空线路	0.125	0.52	11.5	0.83	2.54	7.1
电缆线路	0.150	1.21	260	0.37	5.43	210

负荷经过负荷变压器设为 100 kVA, 功率因数为 0.6 (滞后)。为模拟工程实际将线路 2 与线路 3 零序 CT 反接以验证算法可靠性。

由于篇幅所限, 下面仅以线路 3 和线路 4 发生单相接地故障为例, 针对包括补偿状态、故障距离 l_f 、接地电阻 R_f 、故障初相角 θ 在不同情况下的选线结果。

(1) 在故障初相角为 90° , 过渡电阻 $R_f=10 \Omega$, 4 号线路 3 km 处故障时, 消弧线圈处于不同补偿状态下, 本方法选线结果正确。如表 3 所示。

表 3 不同补偿状态下的选线结果

Table 3 Simulation results with different compensation states

补偿状态	线路名称	高频极点参数 $C_0/\mu\text{F}$	基频极点参数 $C_{eq}/\mu\text{F}$	补偿系数 $\lambda(C_{eq}/C_0)$	是否故障
欠补偿 (10%)	线路 1	0.103 1	0.114 1	1.106 7	否
	线路 2	-2.106 2	-1.961 2	0.931 2	否
	线路 3	-0.131 6	-0.142 3	1.081 3	否
	线路 4	-2.531 2	-0.351 3	0.138 8	是
完全补偿 (0%)	线路 1	0.114 5	0.103 2	0.901 3	否
	线路 2	-2.298 1	-2.013 1	0.876 0	否
	线路 3	-0.136 2	-0.149 5	1.097 7	否
	线路 4	-2.272 8	-0.014 1	0.062 0	是
过补偿 (10%)	线路 1	0.103 6	0.092 3	0.890 9	否
	线路 2	-2.251 7	-1.993 1	0.885 2	否
	线路 3	-0.111 6	-0.122 3	1.095 9	否
	线路 4	-2.216 9	0.279 1	-0.125 9	是

(2) 在消弧线圈处于过补偿状态下, 故障初相角为 90° , 过渡电阻 $R_f=50 \Omega$, 3 号线路在不同距离故障时, 本方法选线结果正确。如表 4 所示。

表 4 不同故障距离下的选线结果

Table 4 Simulation results with different fault location

故障距离 l_f	线路名称	高频极点参数 $C_0/\mu\text{F}$	基频极点参数 $C_{eq}/\mu\text{F}$	补偿系数 $\lambda(C_{eq}/C_0)$	是否故障
2 km	线路 1	0.113 1	0.105 4	0.931 9	否
	线路 2	-2.072 2	-2.174 1	1.049 2	否
	线路 3	5.353 1	-0.231 3	-0.043 2	是
	线路 4	3.359 3	3.183 2	0.947 6	否
10 km	线路 1	0.099 8	0.112 7	1.129 2	否
	线路 2	-2.151 9	-2.168 2	1.007 6	否
	线路 3	5.183 0	-0.392 7	-0.075 8	是
	线路 4	3.025 3	2.819 9	0.932 1	否
18 km	线路 1	0.089 1	0.115 9	1.300 8	否
	线路 2	-2.376 2	-2.896 4	1.218 9	否
	线路 3	4.765 6	-0.412 3	-0.086 5	是
	线路 4	3.571 9	2.985 5	0.835 8	否

(3) 在消弧线圈处于过补偿状态下, 过渡电阻 $R_f=100 \Omega$, 4 号线路位于 10 km 处故障时, 对于不同故障相角, 本方法选线结果正确。如表

5 所示。

表 5 不同故障时刻相角下的选线结果

Table 5 Simulation results with different initial angles

故障初相角 θ	线路名称	高频极点参数 $C_0/\mu\text{F}$	基频极点参数 $C_{eq}/\mu\text{F}$	补偿系数 $\lambda(C_{eq}/C_0)$	是否故障
0°	线路 1	0.157 6	0.089 3	0.566 6	否
	线路 2	-2.874 1	-1.672 2	0.581 8	否
	线路 3	-0.103 1	-0.171 3	1.661 5	否
	线路 4	-1.877 1	0.462 8	-0.246 6	是
45°	线路 1	0.124 8	0.105 5	0.845 4	否
	线路 2	-2.421 9	-2.233 7	0.922 3	否
	线路 3	-0.151 1	-0.152 3	1.007 9	否
	线路 4	-2.753 2	0.307 9	-0.111 8	是
90°	线路 1	0.119 5	0.115 9	0.969 9	否
	线路 2	-0.1362	-0.149 5	1.099 7	否
	线路 3	-0.169 3	-0.162 3	0.958 7	否
	线路 4	-2.400 2	0.105 6	0.044 0	是

5 结语

本文针对消弧线圈接地系统, 利用差分矩阵束精确提取极点分量参数, 提出一种利用线路补偿特征的选线方法, 可以得到以下结论:

(1) 该方法无需已知线路参数, 不受故障条件的限制, 自适应计算表征线路中消弧线圈补偿特征。

(2) 仿真结果表明, 利用高频信号方向的选线方法与利用仿真数据中 C_0 符号选线类似, 在 CT 极性不一致的情况下方法失效。本方法摆脱了零序 CT 极性的限制, 安装前无需极性校验, 提高选线方法的可靠性, 在正确选线的同时也可间接实现互感器极性校验的功能。

(3) 补偿特征无需群比, 利于线路故障“自判”, 当出现多条线路同时故障时, 也可正确判断。若利用沿线的 FTU 可实现线路区段保护, 为故障定位提供了新思路。

参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 孙波, 孙同景, 薛永端, 等. 零模复合导纳法配电网单相接地故障选线与定位[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 57-62.

SUN Bo, SUN Tong-jing, XUE Yong-duan, et al. Fault line identification and fault section location based on transient zero-module combination admittance in non-solidly earthed network[J]. Power System Protection

- and Control, 2010, 38(22): 57-62.
- [3] 徐兵, 卢继平, 潘雪, 等. 基于对地电容与过渡电阻识别的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 101-105.
XU Bing, LU Ji-ping, PAN Xue, et al. Method to detect fault feeder based on identifying grounding capacitance and transition resistance[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 101-105.
- [4] 束洪春, 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 Hong-chun, 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.
- [5] 张钧, 何正友, 贾勇, 等. 基于 S 变换的故障选线新方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 109-115.
ZHANG Jun, HE Zheng-you, JIA Yong, et al. Fault line identification approach based on S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 109-115.
- [6] 罗建, 何建军, 王官洁, 等. 消弧线圈接地系统的单相接地选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 1-4.
LUO Jian, HE Jian-jun, WANG Guan-jie, et al. Research on fault line selection in network grounded with arc extinguishing coil[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 1-4.
- [7] 林湘宁, 高艳, 刘沛, 等. 基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 45-49.
LIN Xiang-ning, GAO Yan, LIU Pei, et al. A novel method to identify the single phase-to-earth fault in the neutral un-effectual grounded system using the zero-sequence compensated admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 45-49.
- [8] 索南加乐, 李宗朋, 王莉, 等. 基于频域参数识别方法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 93-97, 125.
SUONAN Jia-le, LI Zong-peng, WANG Li, et al. Fault line selection in distribution networks based on parameter identification method in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 93-97, 125.
- [9] 石一辉, 张承学, 易攀, 等. 差分算法在电力系统高频信号分析过程中的研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(3): 115-119, 136.
SHI Yi-hui, ZHANG Cheng-xue, YI Pan, et al. Research on analysis of high frequency signals by differential algorithm in electric power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(3): 115-119, 136.
- [10] 束洪春, 彭仕欣, 李斌, 等. 基于零序电流激励的谐振接地系统故障选线测后模拟方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 106-113.
SHU Hong-chun, PENG Shi-xin, LI Bin, et al. Simulation after detecting fault line in resonant earthed system through zero sequence current motivation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(10): 106-113.
- [11] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.
XUE Yong-duan, XU Bing-yin, FENG Zu-ren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
- [12] SARKAR T K, PEREIRA O. Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37(1): 48-55.

收稿日期: 2014-02-11; 修回日期: 2014-03-19

作者简介:

司瑞琦(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: srq409@foxmail.com

黄翰(1984-), 男, 工程硕士, 研究方向为电力系统继电保护;

罗建(1960-), 男, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制等。