

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.12.016

基于矩阵束算法的经消弧线圈接地系统故障选线新方法

康小宁, 刘 鑫, 索南加乐, 马 超, 王晨清, 杨黎明

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

摘要:从线性电路的动态响应入手,定性分析了经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时暂态零模网络外加激励源信号的构成,并研究了在此外加激励源下各条线路暂态零模电流的全响应,提出了一种利用暂态零模电流全响应中的强制分量进行群比的暂态选线方法。该方法利用矩阵束算法对故障后各条线路暂态零模电流进行频率分析,提取出各条线路暂态零模电流强制分量中暂态特征最明显的频率分量进行选线。该方法无需滤波,可真实反映出故障暂态信号的组成,具有抗噪能力强、计算速度快等优点。此外,该方法仅用到电流量,可靠性高。ATP 仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词:故障选线; 矩阵束算法; 暂态零模电流; 强制分量; 消弧线圈接地系统

0 引言

经消弧线圈接地系统的故障选线问题一直是配电网领域研究的热点和难点,采用稳态电气量的选线方法在消弧线圈过补偿时失效^[1]。由于配电网发生单相接地故障时,暂态电气量的幅值较稳态值大几倍至几十倍,且暂态电气量中含有丰富的故障特征,因此暂态选线方法的研究成为热点。

目前,暂态选线方法主要有 2 种。第 1 种为基于暂态特征频段^[2-3]的选线方法。该方法定义了线路选定频段(selected frequency band, SFB),保证了各条线路暂态电气量在同一种电路性质下的比较,物理意义明确。第 2 种方法为基于小波分析的方法^[4-5]。该类方法利用了小波分析在时域、频域同时具有良好局部化性质的优点,提取出暂态故障特征进行选线。文献[6]提出了一种利用暂态零序电流中衰减直流分量进行选线的方法,该方法可以作为暂态高频分量不足时的辅助选线判据。

上述研究表明,准确提取暂态故障信号中的故障特征是暂态电气量选线方法的关键,但现有暂态选线方法存在一些不足。首先,暂态故障信号提取不够准确。传统的选线方法采用傅里叶算法提取工频及谐波信号。该算法建立在采样信号为周期性的基础上,与真实暂态故障信号的非周期性特点不符,因此计算结果会产生较大的误差,难以真实反映暂态故障信号的组成^[7]。其次,现有暂态选线方法缺

乏对各条线路暂态信号中各次谐波分量特点的分析,只是笼统地利用暂态全量进行选线,物理意义不明确。随着电子式互感器的应用^[8],为实际系统真实信号的分析提供了可能。针对上述暂态选线方法的不足,本文提出了一种基于矩阵束算法的暂态选线方法。ATP 仿真结果验证了该方法的有效性。

1 最小二乘矩阵束算法简介

矩阵束算法是由 Hua 和 Sarker 提出的一种参数识别估计方法^[9]。该方法主要用于电磁场的参数识别、雷达信号以及阵列信号的参数识别。该方法假设信号可以表示为 M 个具有任意幅值、相位、频率和衰减因子的指数函数的线性组合形式,即

$$y(kT_s) = x(kT_s) + n(kT_s) = \sum_{i=1}^M R_i e^{(-\alpha_i + j\omega_i)kT_s} + n(kT_s) \quad (1)$$

式中: $k=0, 1, \dots, N-1$, 其中 N 为最大采样点数; $n(kT_s)$ 为系统噪声; $x(kT_s)$ 为真实信号组成; R_i, α_i, ω_i 分别为第 i 个信号的复幅值、衰减因子和角频率; T_s 为采样时间间隔; M 为信号的阶数。

令 $z_i = e^{(-\alpha_i + j\omega_i)T_s}$, 则式(1)可改写为:

$$y(kT_s) = \sum_{i=1}^M R_i z_i^k + n(kT_s) \quad (2)$$

令

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(L-1) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(L) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \cdots & y(N-2) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(L) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L} \quad (4)$$

式中: L 为束参数,恰当地选取 L 值可有效滤除噪声,通常情况下, L 取值为 $N/3$ 到 $N/2$ 之间。

利用 $\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2$ 构成矩阵束 $\mathbf{Y}_2 - \lambda \mathbf{Y}_1$,由矩阵束原理可知,信号极点 z_i 即为矩阵 $\mathbf{Y}_2 - \lambda \mathbf{Y}_1$ 的广义特征值。因此,求解 z_i 问题就转化为求解 $\mathbf{Y}_2 - \lambda \mathbf{Y}_1$ 的广义特征值问题,亦即求解矩阵 $\mathbf{Y}_1^+ \mathbf{Y}_2$ 的特征值。其中, $\mathbf{Y}_1^+$ 为 $\mathbf{Y}_1$ 的伪逆矩阵,求出矩阵 $\mathbf{Y}_1^+ \mathbf{Y}_2$ 的特征值后,就可给出信号的特征频率,有:

$$-\alpha_i + j\omega_i = \ln \frac{z_i}{T_s} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式中: M 为非零特征值的个数。

z_i 和 M 已知后,信号复幅值 R_i 可以从下式按照最小二乘法求得:

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_M \end{bmatrix} \quad (6)$$

解得 z_i 和 R_i 后,就可以求出信号电流幅值 A_i 、相位 θ_i 、衰减因子 α_i 和角频率 ω_i :

$$\begin{cases} A_i = |R_i| \\ \theta_i = \arctan \frac{\text{Im}(R_i)}{\text{Re}(R_i)} \\ \alpha_i = \frac{-\text{Re}(\ln z_i)}{T_s} \\ \omega_i = \frac{\text{Im}(\ln z_i)}{T_s} \end{cases} \quad (7)$$

2 最小二乘矩阵束算法算例分析

为了直观地展示矩阵束算法的特性,定义理想信号为:

$$x(n) = x_1(n) + x_2(n) + x_3(n) + x_4(n) + \varepsilon(n) \quad (8)$$

$$x_1(n) = 5.6 \cos(2\pi \times 50t + 60^\circ) \quad (9)$$

$$x_2(n) = 40e^{-56t} \cos(2\pi \times 250t + 30^\circ) \quad (10)$$

$$x_3(n) = 72e^{-102t} \cos(2\pi \times 315t) \quad (11)$$

$$x_4(n) = 10e^{-5.5t} \quad (12)$$

式中: $x_1(n)$ 为幅值较小的工频信号; $x_2(n)$ 为幅值较大的 5 次谐波信号; $x_3(n)$ 为幅值较大的非整数次谐波信号; $x_4(n)$ 为衰减直流分量; $\varepsilon(n)$ 为白噪声信号。

值得指出的是,该理想信号是按照中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时暂态零模电流信号的特点生成的。

可见,信号 $x(n)$ 为 5 个信号的叠加,为一非周期信号。应用矩阵束算法对信号 $x(n)$ 进行分析,结果如表 1 所示。其中,采样频率为 10 kHz,计算数据窗长度为一个工频周期 20 ms。

表 1 矩阵束算法理想信号分析结果
Table 1 Result of ideal signal analysis using the matrix pencil algorithm

信号组成	频率/Hz		I_0/A		$\alpha/(\text{s}^{-1})$		$\theta/(\text{^\circ})$	
	理论值	计算值	理论值	计算值	理论值	计算值	理论值	计算值
工频	50.0	49.9	5.6	5.6	0	0.3	60.0	59.7
谐波	315.0	315.0	72.0	71.9	-102	-101.7	0	0
	250.0	249.9	40.0	40.0	-56	-55.9	30.0	30.1
衰减直流	0	0	10.0	10.1	-5.5	-5.6	0	0

由表 1 可以看出,利用矩阵束算法可以准确计算信号中各个频率分量及其特征分量,真实反映出信号的组成。

表 2 是对同一信号采用全周期傅里叶算法进行分析的结果。

表 2 傅里叶算法理想信号分析结果
Table 2 Result of ideal signal analysis using the Fourier algorithm

频率/Hz	I_0/A		$\theta/(\text{^\circ})$	
	理论值	计算值	理论值	计算值
50	5.60	6.27	60.00	58.25
100	0	5.15	—	168.88
150	0	3.64	—	79.35
200	0	7.29	—	80.15
250	40.00	30.92	30.00	28.73

由表 2 可以看出,首先,利用全周期傅里叶算法计算出的工频以及 5 次谐波信号误差较大。这是由于该理想信号为一非周期信号,衰减直流分量以及非整数次谐波分量对算法的性能有一定的影响;其次,利用全周期傅里叶算法计算出的其余整数次谐波分量是“虚假”分量,真实信号中并不含有该频率分量的信号。相反,傅里叶算法对于信号中实际存在的非整数次谐波信号 $x_3(n)$ 并不能准确提取,而该信号幅值最大,暂态特征最明显,恰恰是有利于选线的故障暂态信号。

可见,矩阵束算法以“衰减指数和”为信号模型,而该模型较好地反映了中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时暂态零模电流信号的特点,故利用矩阵束算法可以在一个工频周期内真实地反映出暂态零模电流信号中的各个组成成分,准确提取出暂态故障特征。

3 基于矩阵束算法的选线原理

3.1 单相接地故障模量分析

经过坐标变换,可将相域系统变换为解耦的模域系统。本文采用 Karrenbauer 变换,将三相系统变换为零模、 α 模、 β 模 3 个模网。Karrenbauer 变换下模域与相域电气量的关系为:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_a \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: x_A, x_B, x_C 表示三相电压或电流; x_a, x_β, x_0 表示 α 模、 β 模、零模分量。

由故障分析理论可得,当系统发生单相(设为 A 相)接地故障时,由故障点的边界条件可以得到单相接地故障时的零模、 α 模和 β 模 3 个分量网络为串联的关系。设系统为线性系统,故障后故障分量网络如图 1 所示。

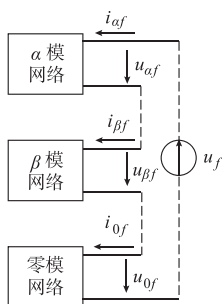


图 1 单相接地故障的故障分量网络

Fig. 1 Fault component network of single-phase-to-earth fault

图 1 中, u_f 为故障点附加电源,等于故障点故障前的反向电压; $u_{\alpha f}, u_{\beta f}, u_{0f}$ 和 $i_{\alpha f}, i_{\beta f}, i_{0f}$ 分别为 3 个电压模分量和 3 个电流模分量的故障分量。

3.2 暂态零模网络外加激励源分析

首先定性分析暂态零模网络外加激励源的组成形式。如图 1 所示,整个故障分量网络外加激励源 u_f 为故障点故障前的反向电压,频率为 50 Hz。值得注意的是,对于暂态零模网络而言,故障后其外加激励源应为故障点处零模电压 u_{0f} ,而不是整个故障分量网络激励源 u_f 。设由故障点看入的 α 模、 β 模网络的入端阻抗分别为 Z_α, Z_β ,则暂态零模网络等效图如图 2 所示。

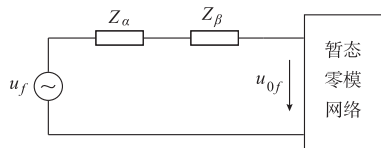


图 2 暂态零模网络等效图

Fig. 2 Equivalent diagram of transient zero-mode network

由图 2 可知,故障分量网络理想 50 Hz 外加激励源 u_f 通过 α 模、 β 模接入零模网络,此时暂态零模网络端口电压为 u_{0f} ,该 u_{0f} 不仅含有 50 Hz 稳态频率分量,还应包括各个暂态频率分量。一般, u_{0f} 的表达式具有以下形式:

$$u_{0f} = U_0 \cos(314t + \theta_0) + \sum_{i=1}^M e^{-\delta_i t} U_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (14)$$

式中: U_0, θ_0 分别为工频电压的幅值和初相位; $U_i, f_i, \theta_i, \delta_i$ 分别为各个暂态分量的幅值、频率、初相位和衰减因子; M 为暂态分量的个数。

3.3 暂态零模网络响应分析

用集中参数模型表示的经消弧线圈接地系统单相接地故障暂态零模网络结构如图 3 所示。

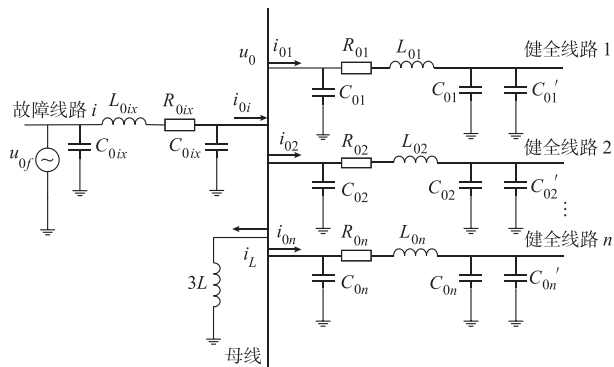


图 3 暂态零模网络结构

Fig. 3 Structure of transient zero-mode network

图 3 中: R_{0k}, L_{0k}, C_{0k} 分别为各条出线的 π 模型参数; $3L$ 表示消弧线圈的电感; C_{0k}' 为等效电容,表示分支线路电容和负荷侧变压器对地电容等因素的影响; u_{0f} 表示暂态零模网络外加激励源,与式(14)具有相同的形式。

由线性电路的动态响应理论可知,图 3 中各条线路暂态零模电流应为暂态零模网络在形如式(14)外加激励源 u_{0f} 下的响应,该响应由强制分量和自由分量 2 部分构成。

各条线路暂态零模电流中的自由分量与暂态零模网络外加激励源无关,其频率分量为各条线路独有且仅由线路自身参数决定。

各条线路暂态零模电流中的强制分量与暂态零模网络外加激励源有关,其频率分量为各条线路共有且与暂态零模网络外加激励源中的频率分量相同,其表达式与式(14)相似:

$$i_j = \sum_{k=1}^M e^{-\delta_k t} I_k \cos(2\pi f_k t + \theta_k) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

值得指出的是,由于稳态工频已不满足经消弧

线圈接地系统故障选线要求,因此式(15)强制分量中不考虑稳态 50 Hz 频率分量。

如图 3 所示,规定电流正方向为由母线流向线路,则故障线路和非故障线路暂态零模电流中的强制分量具有以下特点。

1)故障线路暂态零模电流中的强制分量,其数值为各条非故障线路暂态零模电流强制分量之和,其方向为由线路指向母线。

2)非故障线路暂态零模电流中的强制分量,其数值小于故障线路暂态零模电流强制分量,其方向为由母线指向线路,与故障线路相反。

因此,通过上述故障线路与非故障线路暂态零模电流强制分量的特点可以选出故障线路。

3.4 选线流程

本方法利用各条线路暂态零模电流的强制分量进行选线,步骤如下。

1)利用矩阵束算法对各条线路暂态零模电流进行频率分析,提取出各条线路暂态零模电流中的共有频率分量部分及其特征分量(幅值、衰减因子和初相位)。由 3.3 节分析可知,该共有频率分量部分即为暂态零模电流中的强制分量。

2)找出各条线路暂态零模电流强制分量中暂态特征最明显(幅值最大)的电流分量,并定义其为暂态主频零模电流。通过各条线路暂态主频零模电流间幅值和相位的群比选出故障线。

3)当故障角度接近于 0° 时,暂态零模电流高频分量幅值较小,暂态特征不明显,但此时由于消弧线圈电感所引起的故障线路衰减直流分量幅值较大,非故障线路衰减直流分量幅值较小,基本为 0(无流通回路)^[6]。因此,可利用衰减直流分量间的幅值比较作为高频分量不足时的辅助选线判据。

具体选线流程如图 4 所示。图 4 中: ε 为裕度角,取为 30° ; I_{set1} 为判别是否利用暂态主频零模电流进行选线的门槛。若不满足此门槛,说明故障角度接近于 0° ,暂态高频分量不足,则进入利用衰减直流分量进行选线的辅助流程,该门槛整定时需考虑暂态主频零模电流比相时不发生指针效应等因素; I_{set2} 为辅助流程中区分母线故障和线路故障的门槛,由于母线故障时衰减直流分量通过消弧线圈与故障点形成回路,理论上各条线路中均没有衰减直流分量(或幅值很小,近似为 0),故只要满足 $I_{h1} > I_{set2}$ 即为线路故障。 I_{set2} 可整定为一较小值。

需要说明的是,暂态主频零模电流的群比需建立在线路 SFB 的基础上,这样才能保证各条线路在同一种电路性质下的群比,保证相位群比的正确性。本方法中, SFB 下限取 150 Hz,上限取各条线路 SFB 的最小值。

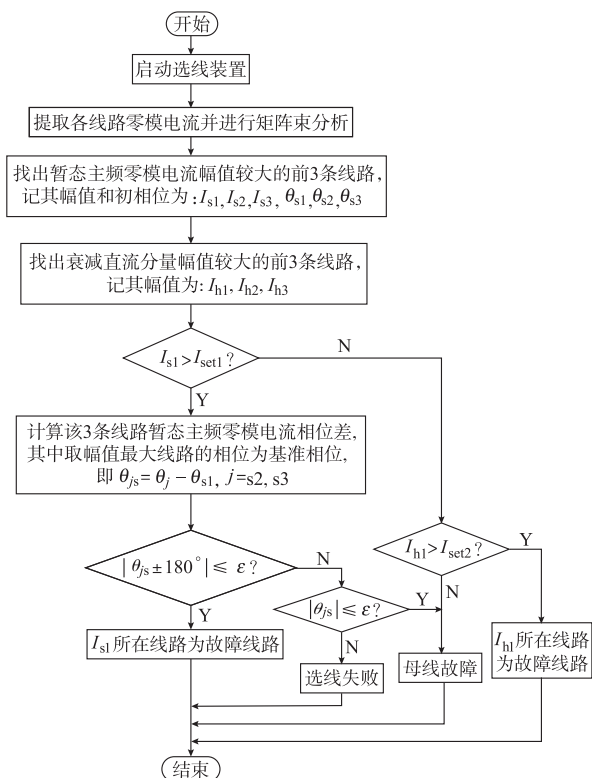


图 4 故障选线流程

Fig. 4 Flow chart of fault line selection

4 ATP 仿真分析

4.1 仿真模型

利用电磁暂态仿真软件 ATP 建立系统仿真模型,如图 5 所示。该模型是一个 10 kV 的配电网馈线系统,由架空线和电缆构成,出线共有 6 条,其中线路 2 为架空线-电缆混联线路,由 10 km 架空线和 10 km 电缆组成;线路 4、线路 5、线路 6 为电缆线路,其余出线为架空线路。输电侧变压器中性点通过消弧线圈接地。

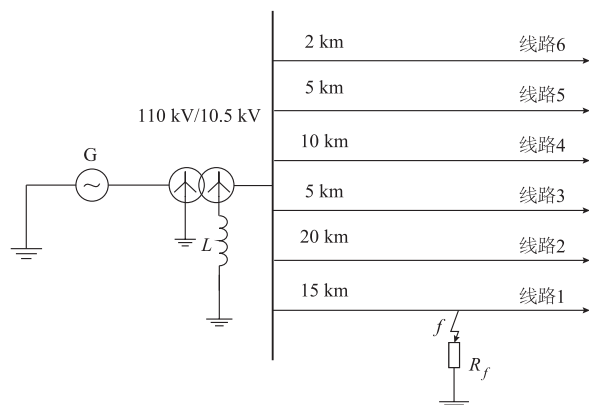


图 5 小电流接地系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of non-solidly grounded system

1)架空线路参数: $r_0 = 0.23 \text{ } \Omega/\text{km}$, $r_1 = 0.096 \text{ } \Omega/\text{km}$; $l_0 = 3.66 \text{ mH}/\text{km}$, $l_1 = 1.22 \text{ mH}/\text{km}$; $c_0 = 0.007 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$, $c_1 = 0.011 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$ 。

2)电缆线路参数: $r_0 = 0.34 \text{ } \Omega/\text{km}$, $r_1 = 0.11 \text{ } \Omega/\text{km}$; $l_0 = 1.54 \text{ mH}/\text{km}$, $l_1 = 0.52 \text{ mH}/\text{km}$; $c_0 = 0.19 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$, $c_1 = 0.29 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$ 。

3)变压器参数: 额定电压比 $U_{N1}/U_{N2} = 110 \text{ kV}/10.5 \text{ kV}$; 额定容量 $S_N = 50 \text{ MVA}$; 空载损耗 $P_0 = 35 \text{ kW}$; 短路损耗 $P_k = 205 \text{ kW}$; 短路电压比为 10%。

4)负荷参数: 实际系统负荷千差万别, 同一条线路各相间负荷也不尽相同, 要精确模拟比较困难, 本文仿真中利用一个等效阻抗 $((400 + j20) \text{ } \Omega)$ 代替; 负荷变压器、负荷开关后线路、分支线路等元件的对地电容用一个等效电容 $(0.035 \text{ } \mu\text{F})$ 代替。

经计算, 全网电容电流为 29 A, 仿真模型采用过补偿方式运行, 过补偿度为 10%, 消弧线圈电感值为 0.575 H。

4.2 仿真结果

本文在上述模型下分别对各条线路及母线发生单相接地故障情况进行仿真分析。其中, 采样频率为 10 kHz, 数据窗长为 20 ms, SFB 为 150 ~ 600 Hz。

下面仅以线路 1 发生单相接地故障为例给出不同情况下的仿真结果。表 3 至表 7 给出了不同情况下的选线结果。表中: D_f 为故障点距离母线距离; I 为电流幅值; θ 为相位差; δ 为衰减因子; γ 为故障角度; R_f 为过渡电阻; 线路编号已经按照暂态主频零模电流以及衰减直流分量幅值由大到小排列, 相位差中暂态主频零模电流幅值最大线路的初相位取为标准相位, 记为 0°。

表 3 不同故障点下暂态主频零模电流群比选线结果 ($\Phi = 90^\circ, R_f = 0 \text{ } \Omega$)
Table 3 Fault line selection result by group comparing with transient zero-mode current in different fault locations ($\Phi = 90^\circ, R_f = 0 \text{ } \Omega$)

D_f/km	I/A			$\theta/(\text{ }^\circ)$			暂态主频/Hz	选线结果
	线路 1	线路 2	线路 4	线路 1	线路 2	线路 4		
1.5	96.7	64.4	19.3	0	180.4	179.1	473.0	线路 1
7.5	79.9	36.4	26.2	0	-179.7	-180.5	297.9	线路 1
13.5	61.8	26.6	21.8	0	-180.7	-180.8	233.3	线路 1

表 4 不同故障角度下暂态主频零模电流群比选线结果 ($D_f = 7.5 \text{ km}, R_f = 0 \text{ } \Omega$)
Table 4 Fault line selection result by group comparing with transient zero-mode current in different fault angles ($D_f = 7.5 \text{ km}, R_f = 0 \text{ } \Omega$)

$\gamma/(\text{ }^\circ)$	I/A			$\theta/(\text{ }^\circ)$			暂态主频/Hz	选线结果
	线路 1	线路 2	线路 4	线路 1	线路 2	线路 4		
0	17.7	8.1	5.8	0	-179.6	-180.5	297.9	线路 1
45	49.3	22.4	16.2	0	-179.7	-180.0	297.9	线路 1
90	79.9	36.4	26.2	0	-179.7	-180.5	297.9	线路 1

表 5 不同故障角度下衰减直流分量群比选线结果 ($D_f = 7.5 \text{ km}, R_f = 0 \text{ } \Omega$)
Table 5 Fault line selection result by group comparing with decaying DC component in different fault angles ($D_f = 7.5 \text{ km}, R_f = 0 \text{ } \Omega$)

$\gamma/(\text{ }^\circ)$	I/A			$\delta/(\text{s}^{-1})$			选线结果
	线路 1	线路 2	线路 4	线路 1	线路 2	线路 4	
0	15.16	0	0	1.79	0	0	线路 1
45	12.11	0	0	1.78	0	0	线路 1
90	2.03	0	0	1.79	0	0	线路 1

表 6 不同过渡电阻下暂态主频零模电流群比选线结果 ($D_f = 13.5 \text{ km}, \Phi = 90^\circ$)
Table 6 Fault line selection result by group comparing with transient zero-mode current in different fault resistances ($D_f = 13.5 \text{ km}, \Phi = 90^\circ$)

$R_f/\text{ } \Omega$	I/A			$\theta/(\text{ }^\circ)$			暂态主频/Hz	选线结果
	线路 1	线路 2	线路 4	线路 1	线路 2	线路 4		
20	53.1	22.3	18.8	0	-178.7	-183.5	220.1	线路 1
30	50.8	20.8	18.2	0	-178.6	-184.6	208.3	线路 1
40	49.8	19.8	17.9	0	-178.7	-185.3	192.1	线路 1
50	46.5	17.8	16.7	0	-179.1	-186.2	170.7	线路 1

表 7 不同故障角度下母线故障情况的群比选线结果 ($R_f = 0 \text{ } \Omega$)
Table 7 Fault line selection result in different fault angles in the case of bus fault ($R_f = 0 \text{ } \Omega$)

$\gamma/(\text{ }^\circ)$	I/A			$\theta/(\text{ }^\circ)$			暂态主频/Hz	选线结果
	线路 2	线路 4	线路 5	线路 2	线路 4	线路 5		
0	9.1	0.4	0.2	0	-4.4	-4.2	545.3	母线
45	37.2	1.5	0.7	0	-4.4	-4.2	545.3	母线
90	59.5	2.4	1.1	0	-4.4	-4.2	545.3	母线

表 7 中, 当故障角度分别为 0°, 45° 和 90° 时, 各条出线的衰减直流分量幅值均为 0, 辅助选线结果也为母线故障。

由上述仿真结果可以得到以下结论。

1) 暂态主频基本位于 SFB 内, 可以保证相位群比的正确性, 并且暂态主频值随着故障点远离母线而减小。其中母线故障时暂态主频值最大, 最接近于 SFB 的上限。

2) 在相同过渡电阻、相同故障角度情况下, 故障点越接近母线, 暂态过程越明显, 暂态主频零模电流幅值越大。

3)在相同故障点、相同过渡电阻情况下,故障角度为 90° 时,暂态特征最明显,能量主要集中在高频分量处,即暂态主频零模电流幅值最大,衰减直流分量幅值最小;故障角度为 0° 时,能量主要集中在衰减直流分量处,即衰减直流分量幅值最大,暂态主频零模电流幅值最小。

4)在相同故障点、相同故障角度情况下,暂态主频值随着过渡电阻的增大而减小,逐渐接近 SFB 下限,失去相位群比选线条件。

5)本方法可以正确区分母线故障和线路故障。

5 结语

本文提出了一种基于矩阵束算法的经消弧线圈接地系统故障选线新方法。该方法从线性电路的动态响应分析入手,将各条线路暂态零模电流分为强制分量和自由分量 2 部分,并利用其中的强制分量进行选线,物理意义明确。然而,该方法仍属于暂态选线方法,当过渡电阻较大时,存在灵敏度不足的问题,需进一步研究。

参考文献

- [1] 徐丙垠,薛永端,李天友,等.小电流接地故障选线技术综述[J]. 电力设备,2005,6(4):1-7.
XU Bingyin, XUE Yongduan, LI Tianyou, et al. Review of line selection of grounding fault in non-effectively grounding network techniques[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(4): 1-7.
- [2] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠,等.基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(9):48-53.
XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin, et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [3] 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 Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transient in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
- [4] 戴剑锋,张艳霞.基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):44-47.
DAI Jianfeng, ZHANG Yanxia. Study on adaptively choosing fault line under single-phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.
- [5] 齐郑,陈炯聪,杨奇逊.基于小波变换和 LMS 自适应滤波器的单相接地选线方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(9):58-61.
QI Zheng, CHEN Jiongcong, YANG Qixun. Selection of single-phase to ground fault line based on wavelet transform and LMS adaptive filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 58-61.
- [6] 束洪春,刘娟,司大军,等.自适应消弧线圈接地系统故障选线实用新方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(13):64-68.
SHU Hongchun, LIU Juan, SI Dajun, et al. New adaptive method for fault line selection in non-solidly grounded system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 64-68.
- [7] 索南加乐,王莉,夏经德,等.特高压交流线路故障谐波分析[J]. 高电压技术,2010,36(1):37-43.
SUONAN Jiale, WANG Li, XIA Jingde, et al. Harmonic analysis of fault signal in UHV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 37-43.
- [8] 齐郑,郭锐,杨以涵.基于数字化变电站的小电流接地故障选线实现方案[J]. 电力系统自动化,2009,33(24):54-57.
QI Zheng, GUO Rui, YANG Yihan. Scheme for earth fault line selection in neutral point non-effectively grounded system based on digital substation technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 54-57.
- [9] 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.

康小宁(1968—),男,副教授,主要研究方向:电力系统继电保护。

刘鑫(1987—),男,通信作者,硕士,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: liuxin3507@stu.xjtu.edu.cn

索南加乐(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护。

New Method for Fault Line Selection in Non-solidly Grounded System Based on Matrix Pencil Method

KANG Xiaoning, LIU Xin, SUONAN Jiale, MA Chao, WANG Chenqing, YANG Liming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on linear circuit dynamic response, the analysis of the components of transient zero-mode network excitation source is presented. The full transient response of zero-mode current under that source is also analyzed. Based on the group comparison of the zero-mode transient current mandatory components a transient fault line selection method is proposed. The method conducts frequency analysis using the matrix pencil algorithm and then obtains the frequency components which have the most obvious transient characteristics to select the fault line. This method doesn't need digital filter and can reflect the real composition of the fault transient signals. This method has also high noise immunity and fast computing speed. Moreover, this method only uses the current to select fault line, so it has high reliability. ATP simulation results show that the proposed method is effective and reliable.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 51037005, No. 51177127).

Key words: fault line selection; matrix pencil algorithm; zero-mode transient current; mandatory component; non-solidly grounded system