适用于带并联电抗器输电线路的电流模型识别纵联保护新原理

申全宇,宋国兵,索南加乐,马 超
(西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:针对两端带并联电抗器的输电线路,提出了一种基于电流模型识别的纵联保护新原理。首先采用线路分布参数模型,推导出发生区外故障时两侧电流和差比值的理论表达式,将其作为待识别的基准模型。接着构造区外故障模型误差函数用于描述实际故障数据与基准模型的符合程度。区外故障时,模型误差函数等于零;区内故障时,模型误差函数不为零,据此区分外部和内部故障。该原理考虑输电线路带并联电抗器的情况,不受分布电容影响,无需补偿电容电流;充分利用故障电流信息,不引入电压量;能够可靠、灵敏、快速地动作。ATP 仿真和动模仿真结果验证了新原理的有效性。

关键词:分布电容;并联电抗器;矩阵束算法;模型识别;电力系统保护;超高压输电;纵联保护
中图分类号:TM 771 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.019

0 引言

分布电容一直是制约超高压保护可靠性和灵敏性的主要因素[1-2],随着我国特高压电网的发展和远距离大容量输电线路的出现,该问题更加突出。针对这个问题,继电保护工作者提出了许多解决方案,主要分为电容电流补偿法和不受分布电容影响的保护新原理 2 类,它们在实际中都存在一定缺陷[3]。

目前由于电压信号易受干扰,而电流信号不太容易受到干扰,同时为了使超高压保护能够快速动作,需要准确地提取暂态故障信息。因此研究基于暂态故障电流的新型保护原理成为一种可行的方法。该原理的关键技术在于故障电流信号频谱的分析算法。

最小二乘矩阵束算法[4-9]是一种性能优越的现代信号处理方法,它以衰减指数和作为信号模型,可以精确快速地计算出故障电流的特征信息,包括频率分布、幅值、衰减因子和初相角等信息。矩阵束算法优良的频谱分析能力使得基于暂态信息保护新原理的实现成为可能。

文献[3]利用双端故障电流的暂态信息,很好地解决了超高压线路分布电容对保护的影响,但其没有考虑并联电抗器。并联电抗器可以有效地防止过电压,补偿分布电容电流,消除单相重合闸潜供电流的影响,在超高压及以上电压等级线路中广泛使用。因此,研究适用于带并联电抗器的电流模型识别保护新原理,对电流模型识别原理在实际中的应用具有重大意义。

收稿日期:2013-01-15;**修回日期**:2013-11-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51037005,51177127);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB219704)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51037005,51177127) and the National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB219704)

本文针对两端带并联电抗器的输电线路,提出了一种基于电流模型识别的纵联保护新原理。首先在复频域故障附加网络下分析两端带并联电抗器输电线路的故障特征,建立相应的故障特征模型,接着构造模型误差函数描述实际故障数据与特征模型的符合程度,提出基于模型识别的保护判据。该保护新原理考虑输电线路带并联电抗器的情况,无需补偿电容电流,从根本上消除了分布电容的影响;充分利用故障电流信息,不引入电压量;采用 10 ms 的短数据窗,动作灵敏快速。以 ATP 仿真和动模仿真验证新原理的有效性。

1 矩阵束算法简介

设故障电流可以表示成如下 M 个指数函数的线性组合,采样后的离散表达式为:

$$y_k=\sum_{j=1}^{M}R_j\mathrm{e}^{kT_s(-\alpha_j+\mathrm{j}\omega_j)}+S_\mathrm{N}(k)=\sum_{j=1}^{M}R_jz_j^k \tag{1}$$

其中,y_k 为实际观测到的电流信号第 k 个采样值;R_j 为第 j 个谐波信号的复幅值;α_j 和 ω_j 分别为第 j 个谐波信号的衰减因子和振荡角频率;$S_\mathrm{N}(k)$ 为噪声;$z_j=\mathrm{e}^{(-\alpha_j+\mathrm{j}\omega_j)T_s}$,$T_s$ 为采样时间间隔;$k=0,1,\cdots,N-1$,且 N 为最大采样点数。

$$\boldsymbol{Y}_1=\begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{L-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N-L-1} & y_{N-L} & \cdots & y_{N-2} \end{bmatrix}_{(N-L)\times L} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{Y}_2=\begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_L \\ y_2 & y_3 & \cdots & y_{L+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N-L} & y_{N-L+1} & \cdots & y_{N-1} \end{bmatrix}_{(N-L)\times L} \tag{3}$$

其中,L 为矩阵束参数,恰当地选择 L 可以抑制噪声的影响。通常,L 在 $N/3\sim N/2$ 之间取值。

由矩阵束原理可知，z_j 恰好就是 $\boldsymbol{Y}_2-\lambda\boldsymbol{Y}_1$ 的广义特征值，也即矩阵 $\boldsymbol{G}=\boldsymbol{Y}_1^{+}\boldsymbol{Y}_2$ 的特征值，其中，$\boldsymbol{Y}_1^{+}$ 为 $\boldsymbol{Y}_1$ 的 Moore-Penrose 伪逆矩阵。

求解出矩阵 $\boldsymbol{G}$ 的特征值 z_j，即可给出信号的特征频率和衰减因子：

$$-\alpha_j+\mathrm{j}\omega_j=\ln z_j/T_{\mathrm{s}}\quad j=1,2,\cdots,M \tag{4}$$

由式(5)所示的线性方程组，利用最小二乘法给出 $R_j(j=1,2,\cdots,M)$ 的值。

$$\begin{bmatrix} y(0)\\ y(1)\\ \vdots\\ y(N-1)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1\\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1}\end{bmatrix} \tag{5}$$

在已知 z_j 和 R_j 后，故障电流各频点角频率 ω_j、衰减因子 α_j、幅值 A_j、初相位 θ_j 可由式(6)给出。

$$\begin{cases}\omega_j=\mathrm{Im}\left(\dfrac{\ln\lambda_j}{T_{\mathrm{s}}}\right)\\ \alpha_j=-\mathrm{Re}\left(\dfrac{\ln\lambda_j}{T_{\mathrm{s}}}\right)\\ A_j=|R_j|\\ \theta_j=\arctan\dfrac{\mathrm{Im}(R_j)}{\mathrm{Re}(R_j)}\end{cases} \tag{6}$$

其中，$j=1,2,\cdots,M$。

2 两端带并联电抗器的线路故障特征分析

以单相电路为例，在故障附加网络下，由复频域分别推导出区外故障和区内故障时，线路两端母线侧故障电流和差比值的理论表达式。

2.1 n 侧区外故障特征模型

n 侧区外故障时，考虑过渡电阻的故障附加网络如图1所示。

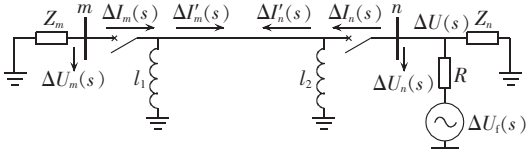

图1 n 侧区外故障附加网络图

Fig.1 Fault component network of out-zone fault at n side

超、特高压线路的电阻和电导均较小，可以近似忽略不计，线路两端母线电压以及线路上故障电流应满足线路分布参数方程[10]：

$$\begin{bmatrix}\Delta U_n(s)\\ \Delta I'_n(s)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cosh(s\gamma_0 d) & Z_{c0}\sinh(s\gamma_0 d)\\ \sinh(s\gamma_0 d)/Z_{c0} & \cosh(s\gamma_0 d)\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\Delta U_m(s)\\ -\Delta I'_m(s)\end{bmatrix} \tag{7}$$

其中，Z_{c0} 为线路波阻抗，$Z_{c0}=\sqrt{l_0/c_0}$，l_0、c_0 为线路单位长度的电感值和电容值；$\gamma_0=\sqrt{l_0c_0}$，为传播系数；d 为线路长度；s 为故障电流各个频点的复频率。

此外，m 侧故障电压、电流满足式(8)、(9)：

$$\Delta U_m(s)=-\Delta I_m Z_m \tag{8}$$

$$\Delta I'_m(s)=\Delta I_m(s)-\frac{\Delta U_m(s)}{sl_1} \tag{9}$$

n 侧故障电流满足等式：

$$\Delta I'_n(s)=\Delta I_n(s)-\frac{\Delta U_n(s)}{sl_2} \tag{10}$$

其中，Z_m 为 m 侧系统阻抗；l_1 为 m 侧并联电抗器的电感值；l_2 为 n 侧并联电抗器的电感值。联立式(7)—(10)，可以得到：

$$\begin{cases}\Delta I_m(s)=-\dfrac{\Delta U_n(s)}{Z_m\cosh(s\gamma_0 d)+Z_{c0}\left(1+\dfrac{Z_m}{sl_1}\right)\sinh(s\gamma_0 d)}\\ \Delta I_n(s)=\dfrac{\Delta U_n(s)}{sl_2}+\\ \dfrac{\dfrac{Z_m}{Z_{c0}}\sinh(s\gamma_0 d)+\left(1+\dfrac{Z_m}{sl_1}\right)\cosh(s\gamma_0 d)}{Z_m\cosh(s\gamma_0 d)+Z_{c0}\left(1+\dfrac{Z_m}{sl_1}\right)\sinh(s\gamma_0 d)}\Delta U_n(s)\end{cases} \tag{11}$$

进一步可以得到线路两端互感器电流故障分量和差比值表达式为：

$$\begin{aligned}H_n(s)=&\frac{\Delta I_m(s)+\Delta I_n(s)}{\Delta I_m(s)-\Delta I_n(s)}=\\ &\left\{-1+\left(1+\frac{Z_m}{sl_1}+\frac{Z_m}{sl_2}\right)\cosh(s\gamma_0 d)+\right.\\ &\left.\left[\frac{Z_{c0}}{sl_2}\left(1+\frac{Z_m}{sl_1}\right)+\frac{Z_m}{Z_{c0}}\right]\sinh(s\gamma_0 d)\right\}\div\\ &\left\{-1-\left(1+\frac{Z_m}{sl_1}+\frac{Z_m}{sl_2}\right)\cosh(s\gamma_0 d)-\right.\\ &\left.\left[\frac{Z_{c0}}{sl_2}\left(1+\frac{Z_m}{sl_1}\right)+\frac{Z_m}{Z_{c0}}\right]\sinh(s\gamma_0 d)\right\}\end{aligned} \tag{12}$$

当已知线路参数 l_0、c_0、d 和两端并联电抗器电感值 l_1、l_2 时，两端互感器故障电流和差比值 $H_n(s)$ 只与故障电流各个频点复频率以及 m 侧系统阻抗 Z_m 有关，而与过渡电阻等其他因素无关，该表达式反映了 n 侧区外故障特征，可以作为 n 侧区外故障的特征模型。

2.2 m 侧区外故障特征模型

m 侧区外故障时，线路两端母线侧故障电流和差比值理论表达式推导过程与 n 侧区外故障时相类似，推导结果为：

$$\begin{aligned}H_m(s)=&\frac{\Delta I_m(s)+\Delta I_n(s)}{\Delta I_m(s)-\Delta I_n(s)}=\\ &\left\{-1+\left(1+\frac{Z_n}{sl_2}+\frac{Z_n}{sl_1}\right)\cosh(s\gamma_0 d)+\right.\\ &\left.\left[\frac{Z_{c0}}{sl_1}\left(1+\frac{Z_n}{sl_2}\right)+\frac{Z_n}{Z_{c0}}\right]\sinh(s\gamma_0 d)\right\}\div\\ &\left\{-1-\left(1+\frac{Z_n}{sl_2}+\frac{Z_n}{sl_1}\right)\cosh(s\gamma_0 d)-\right.\\ &\left.\left[\frac{Z_{c0}}{sl_1}\left(1+\frac{Z_n}{sl_2}\right)+\frac{Z_n}{Z_{c0}}\right]\sinh(s\gamma_0 d)\right\}\end{aligned} \tag{13}$$

其中，Z_n 为 n 侧系统阻抗。

同样，当已知输电线路参数和两端并联电抗器参数时，两端母线侧故障电流和差比值只与故障电流各频点复频率以及 n 侧系统阻抗有关，与过渡电阻等其他因素无关。该表达式反映了 m 侧区外故障特征，可以作为 m 侧区外故障特征模型。

2.3　区内故障特征模型

发生区内故障时，考虑故障点过渡电阻的故障附加网络如图 2 所示。

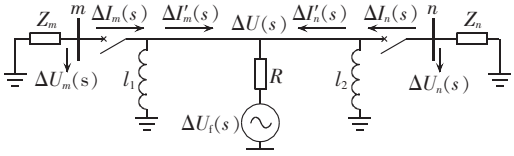

图 2　区内故障附加网络图

Fig.2 Fault component network of in-zone fault

对输电线路，采用与区外故障相似的推导方法，可以得到：

$$\begin{cases}\Delta I_m(s)=-\Delta U(s)/\{Z_m\cosh(s\gamma_0 pd)+\\ \qquad Z_{c0}[1+Z_m/(sl_1)]\sinh(s\gamma_0 pd)\}\\ \Delta I_n(s)=-\Delta U(s)/\{Z_n\cosh[s\gamma_0(1-p)d]+\\ \qquad Z_{c0}[1+Z_n/(sl_2)]\sinh[s\gamma_0(1-p)d]\}\end{cases}\tag{14}$$

其中，p 为故障点到 m 侧母线距离与输电线路全长的比值，$0<p<1$。

进一步可以得到两端母线侧故障电流和差比的理论表达式为：

$$\begin{aligned}H_p(s)=\frac{\Delta I_m(s)+\Delta I_n(s)}{\Delta I_m(s)-\Delta I_n(s)}=&-\{Z_m\cosh(s\gamma_0 pd)+\\ &Z_{c0}[1+Z_m/(sl_1)]\sinh(s\gamma_0 pd)+\\ &Z_n\cosh[s\gamma_0(1-p)d]+Z_{c0}[1+Z_n/(sl_2)]\times\\ &\sinh[s\gamma_0(1-p)d]\}/\{Z_m\cosh(s\gamma_0 pd)+\\ &Z_{c0}[1+Z_m/(sl_1)]\sinh(s\gamma_0 pd)-\\ &Z_n\cosh[s\gamma_0(1-p)d]-\\ &Z_{c0}[1+Z_n/(sl_2)]\sinh[s\gamma_0(1-p)d]\}\end{aligned}\tag{15}$$

可以看出，当已知线路参数和两端并联电抗器参数时，两端母线侧故障电流和差比值与电流各个频点复频率以及两侧系统阻抗和故障位置均有关系。

3　基于模型识别的保护原理研究

上文分别推导出了区外和区内故障时的故障特征模型，当线路不同位置发生故障时，均应符合相应的特征模型。模型识别的基本思想是：构造一个模型误差函数，用于量化故障数据与模型的符合程度，通过计算比较模型误差函数值来识别出故障符合的特征模型，进而判断故障发生的位置。

例如，已知 m 侧区外故障特征模型为 $H_m(s)$，假设由故障数据计算得到的电流和差比值为 $h(s)$，m 侧区外故障模型误差函数可以定义为：

$$E_m=\left|h(s)-H_m(s)\right|\tag{16}$$

当发生 m 侧区外故障时，故障数据符合 m 侧区外特征模型，此时 $E_m=0$；当发生 m 侧区内故障或者 n 侧区外故障时，故障数据不符合 m 侧区外特征模型，则 $E_m\neq 0$。据此，可以判断出是否发生 m 侧区外故障。同理，可以构造 m 侧区内以及 n 侧区外故障模型误差函数，来进行故障位置的判断。

本文区内故障特征模型待定参数较多，求解比较复杂，因此只采用两侧区外故障特征模型。区外故障特征模型与两侧系统阻抗有关，只有给定两侧系统阻抗，$H_m(s)$ 和 $H_n(s)$ 才能确定下来。而两侧系统阻抗受系统运行方式影响不断变化，不能离线给定，只能在线实时计算，本文给出一种利用故障电流工频量求解系统阻抗的方法，然后构造两侧区外故障模型误差函数，最后给出保护判据。

3.1　系统阻抗求解

对于 n 侧区外故障，将工频频点和差电流比值 $h(s_0)$ 代入式(12)，可反解出 m 侧系统阻抗的表达式：

$$\begin{aligned}Z_m=&\{1-h(s_0)-[1+h(s_0)]\{\cosh(s_0\gamma_0 d)+\\ &[Z_{c0}/(s_0 l_2)]\sinh(s_0\gamma_0 d)\}\}\div\\ &\{[1+h(s_0)][1/(s_0 l_1)+1/(s_0 l_2)]\cosh(s_0\gamma_0 d)+\\ &[Z_{c0}/(s_0^2 l_1 l_2)+1/Z_{c0}]\sinh(s_0\gamma_0 d)\}\end{aligned}\tag{17}$$

其中，γ_0、d、l_1、l_2 为已知；$s_0=\mathrm{j}\,\omega_0$，ω_0 为同步角频率；$h(s_0)=[\Delta I_m(s_0)+\Delta I_n(s_0)]/[\Delta I_m(s_0)-\Delta I_n(s_0)]$ 可由矩阵束计算得到。

同理，可以推导出 n 侧系统阻抗的计算表达式为：

$$\begin{aligned}Z_n=&\{1+h(s_0)+[h(s_0)-1]\{\cosh(s_0\gamma_0 d)+\\ &[Z_{c0}/(s_0 l_2)]\sinh(s_0\gamma_0 d)\}\}\div\\ &\{[1+h(s_0)][1/(s_0 l_1)+1/(s_0 l_2)]\cosh(s_0\gamma_0 d)+\\ &[Z_{c0}/(s_0^2 l_1 l_2)+1/Z_{c0}]\sinh(s_0\gamma_0 d)\}\end{aligned}\tag{18}$$

两侧系统阻抗求出后，可确定两侧区外故障特征模型的形式，即得电流模型识别保护的基准模型。

3.2　保护判据的形成

电流模型识别保护基准模型确定以后，需要进一步构造模型误差函数识别出基准模型，从而判断出故障发生的位置。式(16)给出了一种模型误差函数构造方法，本文在其基础上，给出一种利用不平衡电流描述故障数据与基准模型符合程度的模型误差函数构造方法。以 m 侧区外故障为例，特征模型误差函数具体求解步骤如下。

a. 求解模型在每个频点的不平衡电流 $\Delta I_N(s_i)$。

由式(16)可以得到：

$$\begin{aligned}\Delta E_m(s_i)=&\left|h(s_i)-H_m(s_i)\right|=\\ &\left|\frac{\Delta I_m(s_i)+\Delta I_n(s_i)}{\Delta I_m(s_i)-\Delta I_n(s_i)}-H_m(s_i)\right|\end{aligned}\tag{19}$$

其中，$h(s_i)$ 为由矩阵束计算得到的 m 侧区外故障实际模型值；$H_m(s_i)$ 为 m 侧区外故障模型在第 i 个频点处的理论值。令 $\Delta I_+(s_i)=\Delta I_m(s_i)+\Delta I_n(s_i)$，$\Delta I_-(s_i)=\Delta I_m(s_i)-\Delta I_n(s_i)$，则有：

$$\Delta E_m(s_i)=\left|\frac{\Delta I_+(s_i)}{\Delta I_-(s_i)}-H_m(s_i)\right|=\left|\frac{\Delta I_+(s_i)-H_m(s_i)\Delta I_-(s_i)}{\Delta I_-(s_i)}\right| \tag{20}$$

定义 m 侧区外模型在第 i 个频点处不平衡电流：

$$\Delta I_M(s_i)=\Delta I_+(s_i)-H_m(s_i)\Delta I_-(s_i) \tag{21}$$

b. 求解各个频点模型总不平衡电流。

$$\Delta I_M=\sqrt{\sum_{s_i\in\Omega}|\Delta I_M(s_i)|^2} \tag{22}$$

其中，Ω 为各次谐波的集合。

c. 构造模型误差函数 E_m。将 m 侧故障模型总不平衡电流与暂态总电流之比作为 m 侧区外故障的模型误差函数。故障暂态总电流为：

$$I_{\mathrm{mag}}=\sqrt{\sum_{s_i\in\Omega}(|\Delta I_m(s_i)|^2+|\Delta I_n(s_i)|^2)} \tag{23}$$

所以得到 m 侧区外故障模型误差函数为：

$$E_m=\frac{\Delta I_M}{I_{\mathrm{mag}}}=\frac{\sqrt{\sum_{s_i\in\Omega}|\Delta I_+(s_i)-H_m(s_i)\Delta I_-(s_i)|^2}}{\sqrt{\sum_{s_i\in\Omega}(|\Delta I_m(s_i)|^2+|\Delta I_n(s_i)|^2)}} \tag{24}$$

同理，可以得到 n 侧区外故障模型误差函数为：

$$E_n=\frac{\Delta I_N}{I_{\mathrm{mag}}}=\frac{\sqrt{\sum_{s_i\in\Omega}|\Delta I_+(s_i)-H_n(s_i)\Delta I_-(s_i)|^2}}{\sqrt{\sum_{s_i\in\Omega}(|\Delta I_m(s_i)|^2+|\Delta I_n(s_i)|^2)}} \tag{25}$$

理论上，当发生区外故障时，故障电流应该满足该侧区外故障特征模型，与其对应的模型误差函数应该为0，其不满足另一侧区外故障特征模型，所以另一侧故障模型误差函数不为0。当发生区内故障时，两侧区外故障模型均不满足，所以两侧区外故障模型误差函数均不为0。据此，给出适用于带并联电抗器输电线路的模型识别保护的判据如下。

区内故障：$E_n>\xi$，且 $E_m>\xi$。

区外故障：$E_n<\xi$，或 $E_m<\xi$。

ξ 为判据动作门槛，按照躲过区外故障时，模型误差最大不平衡量整定。

4 仿真验证

分别采用 ATP 仿真软件和动模数据验证保护新原理的性能。

4.1 ATP 仿真验证

利用 ATP 软件搭建 400 km、750 kV 单相输电线路模型见图3，两端并联电抗器补偿度均为0.7，线路采用分布参数模型，具体参数为：$E_m=750\angle 0°$ kV，$Z_m=102.94\ \Omega$；$r=0.01958\ \Omega/\mathrm{km}$，$l=0.8192$ mH/km，$c=0.0135$ μF/km；$r_0=0.1828\ \Omega/\mathrm{km}$，$l_0=2.74$ mH/km，$c_0=0.0092$ μF/km；$E_n=750\angle -30°$ kV，$Z_n=72.06\ \Omega$；系统运行功角为30°，故障电流采样频率为10 kHz，数据窗长为10 ms，采用最小二乘矩阵束算法提取故障电流暂态分量特征量，保护判据门槛值 $\xi=0.3$。模型设置了5个故障点，分别为 m 侧区外故障点 F_1、n 侧区外故障点 F_2、线路始端故障点 F_3、线路中点故障点 F_4、线路末端故障点 F_5。具体仿真结果如图4—8所示。

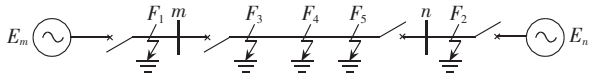

图3 ATP 仿真系统模型图

Fig.3 Model of ATP simulation system

图4为 m 侧区外故障时模型误差计算波形，m 侧区外特征模型误差函数值 E_m 均在动作门槛值 ξ 以下，而 n 侧区外模型误差函数值 E_n 均在动作门槛值以上，说明故障数据符合 m 侧区外故障模型，不符

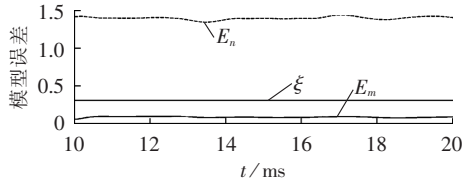

图4 m 侧区外 F_1 处故障时模型误差计算波形

Fig.4 Calculation error of model when out-zone fault occurs at F_1, m side

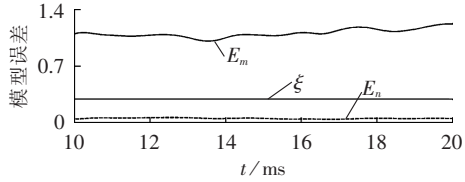

图5 n 侧区外 F_2 处故障时模型误差计算波形

Fig.5 Calculation error of model when out-zone fault occurs at F_2, n side

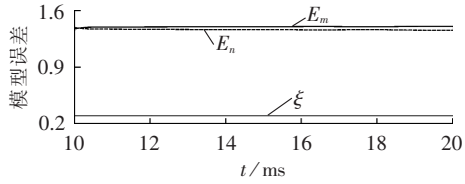

图6 线路始端 F_3 处故障时模型误差计算波形

Fig.6 Calculation error of model when fault occurs at F_3, start point of line

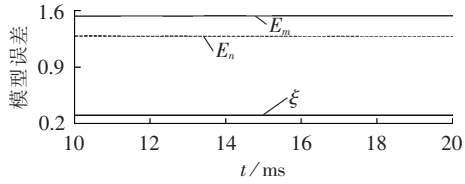

图7 线路中点 F_4 处故障时模型误差计算波形

Fig.7 Calculation error of model when fault occurs at F_4, middle point of line

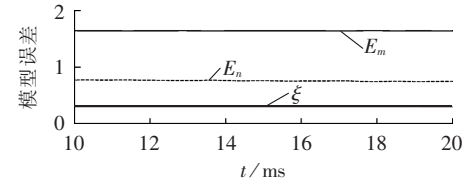

图8 线路末端 F_5 处故障时模型误差计算波形

Fig.8 Calculation error of model when fault occurs at F_5, end point of line

合 n 侧区外故障模型,可以准确地判断出故障发生在 m 侧区外,保护不会动作。图 5 为 n 侧区外故障时模型误差计算波形,同理可以准确判断出故障发生在 n 侧区外,保护仍然不会误动。

图 6 为线路始端故障时模型误差计算波形,两侧区外故障模型误差函数值 E_m 和 E_n 均大于动作门槛值 ξ,说明故障均不符合两侧区外故障模型,可以准确判断出故障发生在区内,保护可靠动作。图 7 和图 8 分别为线路中间和末端故障时模型误差计算波形,与始端故障类似,E_m 和 E_n 均大于动作门槛 ξ,可以准确判断出故障发生在区内。

4.2　动模仿真验证

采用中国电科院兰州东至咸阳 750 kV 线路动模实验数据,系统接线图与图 3 类似,m 侧对应兰州东变电站,n 侧对应咸阳变电站。线路长度为 497 km,电流互感器变比为 2 000 A/1A。具体测试结果如图 9—13 所示。

对于 m 侧区外发生 BC 两相金属性接地故障,利用 BC 线模量计算出的模型误差波形如图 9 所示,m 侧区外模型误差 E_m 均小于动作门槛 ξ,n 侧区外模型误差 E_n 均大于动作门槛 ξ,可以判定出故障发生在 m 侧区外。

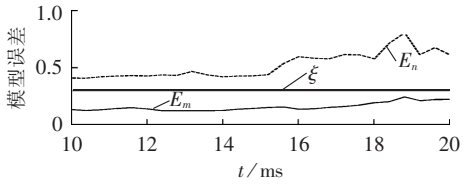

图 9　m 侧区外 BC 两相金属性接地故障模型误差计算波形

Fig.9 Calculation error of model when out-zone grounding fault of both phase B and phase C occurs at m side

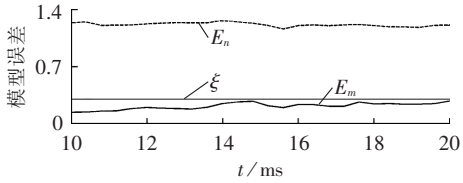

图 10　m 侧区外 BC 两相相间故障模型误差计算波形

Fig.10 Calculation error of model when out-zone interphase fault of phase B and C occurs at m side

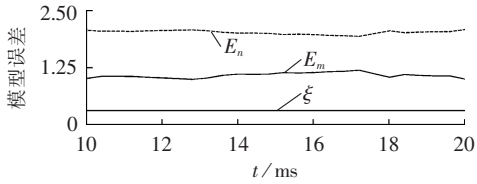

图 11　线路始端 A 相接地故障模型误差计算波形

Fig.11 Calculation error of model when phase-A grounding fault occurs at start point of line

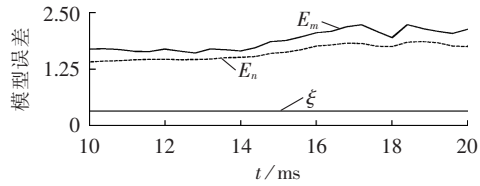

图 12　线路 1/4 处三相故障模型误差计算波形

Fig.12 Calculation error of model when three-phase fault occurs at 1/4 point of line

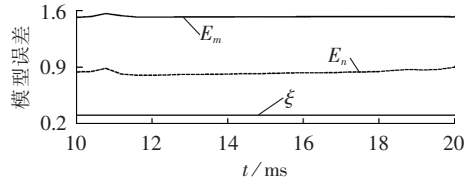

图 13　线路 3/4 处 B 相经 400 Ω 过渡电阻接地时模型误差计算波形

Fig.13 Calculation error of model when phase-B grounding fault via 400 Ω transition resistance occurs at 3/4 point of line

对于 m 侧区外 BC 相间金属性故障,利用 BC 线模量计算得到的模型误差波形如图 10 所示,与图 9 类似,可以判定故障发生在 m 侧区外。

对于线路始端 A 相金属性接地故障,利用 AB 线模量计算得到的模型误差波形如图 11 所示,两侧区外模型误差 E_m 和 E_n 均在动作门槛值以上,说明故障均不符合两侧区外特征模型,判定出故障发生在区内,保护可靠动作。同理,对于图 12 线路 1/4 处三相故障以及图 13 线路 3/4 处经高阻接地故障,均可以准确判定故障发生在区内。

以上 ATP 软件和动模仿真结果表明,考虑并联电抗器的电流模型识别保护具有优良的性能,能够准确判断出故障发生在区内还是区外。

5　结论

本文针对两端带并联电抗器的输电线路提出了一种基于电流模型识别的保护新原理,通过理论分析和仿真验证可以得到以下结论:

a. 电流模型识别保护新原理适用于带并联电抗器的输电线路,能够准确地判断出故障发生在区内还是区外,动作可靠;

b. 该新原理不受线路分布电容的影响,无需补偿电容电流,具有一定的抗过渡电阻能力。

c. 只采用双端电流量,不引入电压量,可靠性高;

d. 采用 10 ms 的短数据窗,动作迅速。

参考文献:

[1] 李岩,陈德树,张哲,等. 超高压长线电容电流对差动保护的影响及补偿对策仿真分析[J]. 继电器,2001,29(6):6-9.
LI Yan,CHEN Deshu,ZHANG Zhe,et al. The emulation analysis for the influence of capacitance current of UHV transmission line on differential current protection and compensating counter measure[J]. Relay,2001,29(6):6-9.

[2] 刘凯,索南加乐. 基于故障支路电流序分量相位关系的选相元件[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):77-83.
LIU Kai,SUONAN Jiale. Phase selection element based on phase relationship between sequence components of faulty branch current[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):77-83.
[3] 索南加乐,马超,康小宁. 利用电流模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2012,32(19):109-116.
SUONAN Jiale,MA Chao,KANG Xiaoning. A novel transmission line pilot protection principle based on current model recognition[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(19):109-116.
[4] HUA Y,SARKAR T. Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise[J]. IEEE Trans on Signal Processing,1990,38(5):814-824.
[5] HUA Y,SARKAR T. On SVD for estimating generalized eigenvalues of singular matrix pencil in noise[J]. IEEE Trans on Signal Processing,1991,39(4):892-900.
[6] SARKAR T,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.
[7] 王宇静,于继来. 电力系统振荡模态的矩阵束辨识法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):12-17.
WANG Yujing,YU Jilai. Matrix pencil method of oscillation modes identification in power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(19):12-17.
[8] 黄瀛,何奔腾. 基于高频噪声主频估计的自适应最小二乘算法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):68-73.
HUANG Ying,HE Benteng. High frequency noise main frequency evaluation based adaptive least error square algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(7):68-73.
[9] 及洪泉,杨以涵,李岩松,等. 基于光学电流互感器的非周期分量线路纵差保护[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):45-49.
JI Hongquan,YANG Yihan,LI Yansong,et al. Study on line aperiodic component current comparison pilot protection based on optical current transducers[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(19):45-49.
[10] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
[11] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2009:12.
[12] 索南加乐,张怿宁,齐军,等. Π模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):12-18.
SUONAN Jiale,ZHANG Yining,QI Jun,et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on Π-model[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(5):12-18.
[13] 郑玉平,吴通华,丁琰,等. 基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据[J]. 电力系统自动化,2004,28(23):50-55.
ZHENG Yuping,WU Tonghua,DING Yan,et al. Applied criterion of current differential protection based on Bergeron model[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(23):50-55.
[14] 索南加乐,杨铖,宋国兵. 模型识别用于继电保护的理论初探[J]. 电力系统保护及控制,2010,38(24):23-29.
SUONAN Jiale,YANG Cheng,SONG Guobing. Survey on relay protection based on model recognition[J]. Power System Protection and Control,2010,38(24):23-29.
[15] 索南加乐,杨铖,杨忠礼,等. 基于模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化,2008,32(24):30-34.
SUONAN Jiale,YANG Cheng,YANG Zhongli,et al. New type of transmission line pilot protection based on model recognition[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(24):30-34.
[16] 夏经德,索南加乐,张怿宁,等. 基于解耦后输电线路纵向阻抗的改进型纵联保护[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):58-65.
XIA Jingde,SUONAN Jiale,ZHANG Yining,et al. Improved pilot protection based on longitudinal impedance of decoupled transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):58-65.
[17] 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.

作者简介:

申全宇

申全宇(1989-),男,河南鹤壁人,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护方面的研究(**E-mail**:quanyu.shen@stu.xjtu.edu.cn);

宋国兵(1972-),男,河南信阳人,副教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统继电保护方面的研究(**E-mail**:song.gb@mail.xjtu.edu.cn);

索南加乐(1960-2013),男,新疆乌鲁木齐人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统继电保护方面的研究;

马 超(1988-),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护方面的研究(**E-mail**:machao.ee@stu.xjtu.edu.cn)。

Pilot protection principle based on current model recognition applicable to transmission line with shunt reactors

SHEN Quanyu,SONG Guobing,SUONAN Jiale,MA Chao
(School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract: A novel pilot protection principle based on current model recognition is proposed for the transmission line with shunt reactors on both sides. The theoretical expression is derived based on the distributed parameter model of transmission line and taken as the benchmark model of out-zone fault,which describes the ratio of the sum of to the difference between the fault currents at both line sides. The model error function of out-zone fault is then constructed to gauge the coincidence degree of the fault data with the benchmark model. The value of model error function is zero for out-zone faults while non-zero for in-zone faults,which can be used to distinguish out-zone fault from in-zone faults. As the shunt reactors are considered,the proposed principle is immune to the distributed capacitance and no capacitive current should be compensated. Since the protection uses fully the fault current information,without the voltage measurement,it functions reliably,quickly and sensitively. Both ATP simulation and dynamic simulation results show the effectiveness of the proposed principle.

Key words: distributed capacitance; shunt reactor; matrix pencil algorithm; model recognition; electric power system protection; EHV power transmission; pilot protection