

有串补电容输电线分相电流差动保护的新原理

贺家李, 郭征

(天津大学自动化学院, 天津 300072)

摘要: 提出了在有串联补偿电容的长距离输电线路上应用贝瑞隆模型实现分相电流差动保护的新原理, 这是作者应用贝瑞隆模型实现线路纵联差动保护研究工作的继续。该文推导出了所提新原理的各相动作量表达式, 理论分析和仿真都证明了所提新原理在长距离输电线路中仍然不受分布电容电流的影响, 具有更高的灵敏度和可靠性。

关键词: 差动保护; 串补电容; 贝瑞隆模型

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)01-0001-09

0 引言

在各种保护原理中, 分相电流差动原理具有明显的优越性, 应用范围也越来越广。但是在超高压、特高压长线路上, 分布电容电流较大, 尤其在故障的暂态过程中电容电流更大, 并且随着故障电压中谐波的频率增大而增大, 难以进行有效的补偿^[1]。这极大地影响了电流差动保护在外部故障时的安全性和内部故障时的可靠性。长期以来广大继电保护工作者希望解决这个问题, 但是大多考虑的是电容电流补偿的方法, 故障分量方法^[2, 3]。作者曾提出过在没有串补电容的线路上用贝瑞隆模型实现纵联电流差动保护的新原理^[4]。本文提出在有串补电容的线路上应用这种方法的新原理。这个方法同样可以消除线路分布电容电流的影响。

1 原理介绍

1.1 无串补电容的线路

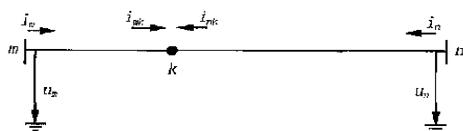


图1 线路内部无故障时的情况

Fig. 1 Transmission line without any inner fault

在输电线上选择一个参考点 k (一般可选为线路中点), 应用贝瑞隆模型算出该点两侧电流后, 对这个点判断其是否满足基尔霍夫电流定律。当被保护线路无内部故障时 (包括稳态运行和区外故障) 如图 1, m 点到 k 点之间及 n 点到 k 点之间的线路都

满足贝瑞隆模型, i_{mk} 和 i_{nk} 都可以被正确计算, 因此理论上 $i_{mk} + i_{nk} = 0$ 。当线路发生内部故障时, 以参考点右侧 f 点发生故障为例 (如图 2 所示), n 点到 k 点之间的线路不再满足贝瑞隆模型, 必然产生很大的动作量 (具体见本文第 3 部分)。因此这种方法可以区分保护区内、外部故障。

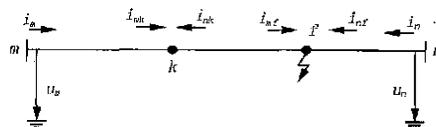


图2 线路内部有故障时的情况

Fig. 2 Transmission line with inner fault

在被保护线路无内部故障时, 传统的差动保护把整个一条输电线看作满足基尔霍夫电流定律的一个节点, 直接用 i_m 和 i_n 进行差动运算, 就必然受电容电流的影响。本文提出的保护原理, 使用选定的一点左右两侧的电流 i_{mk} 和 i_{nk} 进行比较, 真正满足了基尔霍夫电流定律, 所以不受线路分布电容电流的影响。

1.2 含有串补电容的线路

如果线路中间含有串补电容, 只要将 k 点选择在串补电容安装处即可。若串补电容安装在线路一侧, 则在该侧直接可以得出 $i_{mk} = i_m$ 或者 $i_{nk} = i_n$, 而不必经过贝瑞隆模型的计算。

2 动作量的计算方法



图3 三相线路对于一种模分量的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of one kind of mode component of three phase transmission line

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50477037)

如图3,三相线路对于一种模分量的等效电路中,设 u_1, i_1 和 u_2, i_2 分别是两侧的电电压电流模量,正方向如图所示。根据贝瑞隆模型有^[5]:

$$[u_1(t) \quad i_1(t)]^T = T [u_2(t) \quad i_2(t)]^T \quad (1)$$

式中 $T = \begin{bmatrix} A(l) & B(l) \\ C(l) & D(l) \end{bmatrix}$, 为传输矩阵,其中

$$A = -D = De(-) [1/2 + R^2/(32Z_c^2) + R/(4Z_c)] + De(-) [1/2 + R^2/(32Z_c^2) - R/(4Z_c)] - R^2/(16Z_c^2) \quad (2)$$

$$B = -De(-) [3R/8 + 3R^2/(32Z_c) + Z_c/2 + R^3/(128Z_c^2)] - De(-) [3R/8 - 3R^2/(32Z_c) - Z_c/2 + R^3/(128Z_c^2)] - R/4 + R^3/(64Z_c^2) \quad (3)$$

$$C = De(-) [1/(2Z_c) + R/(8Z_c^2)] + De(-) [-1/(2Z_c) + R/(8Z_c^2)] - R/(4Z_c^2) \quad (4)$$

式中: τ 为波从一端传播到另一端所需的时间, $De(-)$ 定义为延迟因子,即 $f(t + \tau) = De(-) f(t)$; Z_c 为线路的波阻抗。

如上所述,贝瑞隆模型是在模量上成立的,所以在实际应用中,需首先将相量转换为模量。以 m 侧保护为例,计算过程为:首先将保护安装处的电压电流 $u_{m\phi}$ 和 $i_{m\phi}$ ($\phi = a, b, c$) 转化为模量 u_{mi} 和 i_{mi} (下标 $i = 0, 1, 2$ 代表各模分量的名称), 转换矩阵为 Karen-

bauer 变换矩阵 $S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}$, 然后代入公式

(1) 可以求出图1中流入 k 点的 m 侧电流模量 i_{mki} , 再转换为相量 $i_{mk\phi}$, 同理 n 侧保护可以求出流入 k 点电流相量 $i_{nk\phi}$ 并通过通信通道传送到 m 侧保护。然后 m 侧保护可以对电流 $i_{mk\phi}$ 和 $i_{nk\phi}$ 分别用半波傅氏算法进行滤波得 $I_{mk\phi}$ 和 $I_{nk\phi}$, 最后仿照传统的电流差动保护得出保护的动作用量 $dI_a = |I_{mka} + I_{nka}|$, $dI_b = |I_{mkb} + I_{nkb}|$, $dI_c = |I_{mkc} + I_{nkc}|$ 。

3 各相动作量的表达式

为简单起见,先从不损线进行推导。如图4,当故障发生在 f 点时, m 点到 k 点间线路的贝瑞隆模型没有被破坏,由 m 点电压和电流按照贝瑞隆模型求得的 k 点电流 i_{mk} 是正确的。而 n 点到 k 点之间线路的贝瑞隆模型已经被破坏,由 n 侧电压、电流并不能求得真实的电流 i_{nk} , 因此用 i_{Jnk} 表示仍然按照贝瑞隆模型计算 i_{nk} 时所得到的值。这时模量上动作用量瞬时值 $di(t) = i_{mk}(t) + i_{Jnk}(t)$ 。

下面首先推导 i_{mk}, i_{Jnk} 与故障点电流 i_f 的关系,

由文献[6]可知:

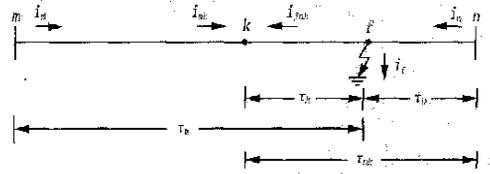


图4 内部故障时在一模线路上波从故障点传到各点的时间

Fig. 4 Time of mode wave propagation from fault point to other points of transmission line with inner fault

$$i_{mk}(t) + i_n(t - \tau_{nk}) - \frac{u_k(t)}{Z_0} + \frac{u_n(t - \tau_{nk})}{Z_0} = i_f(t - \tau_k) \quad (5)$$

上式中 Z_0 为无损线波阻抗,同理有:

$$i_n(t) + i_{mk}(t - \tau_{nk}) - \frac{u_n(t)}{Z_0} + \frac{u_k(t - \tau_{nk})}{Z_0} = i_f(t - \tau_n) \quad (6)$$

将式(6)中的 t 以 $t + \tau_{nk}$ 代替,并注意到有 $k + \tau_{nk} = n$ 得:

$$i_n(t + \tau_{nk}) + i_{mk}(t) - \frac{u_n(t + \tau_{nk})}{Z_0} + \frac{u_k(t)}{Z_0} = i_f(t + \tau_k) \quad (7)$$

将式(7)与式(5)相加消去 $u_k(t)$ 得:

$$i_{mk}(t) + \frac{i_n(t + \tau_{nk}) + i_n(t - \tau_{nk})}{2} - \frac{1}{2Z_0} [u_n(t + \tau_{nk}) - u_n(t - \tau_{nk})] = \frac{i_f(t - \tau_k) + i_f(t + \tau_k)}{2} \quad (8)$$

$$\text{上式中 } \frac{i_n(t + \tau_{nk}) + i_n(t - \tau_{nk})}{2} - \frac{1}{2Z_0} [u_n(t + \tau_{nk}) - u_n(t - \tau_{nk})] = -\frac{1}{2Z_0} [De(-\tau_{nk}) - De(-\tau_{nk})] u_n(t) + \frac{1}{2} [De(-\tau_{nk}) + De(-\tau_{nk})] i_n(t) = -[Cu_n(t) + Di_n(t)] = i_{Jnk}(t) \quad (9)$$

可见式(9)中 C, D 正是贝瑞隆计算公式(4)和(2)中忽略电阻后的表达式,因此上式右侧最后等于 $i_{Jnk}(t)$ 。将式(9)代入到式(8)中可得:

$$i_{mk}(t) + i_{Jnk}(t) = \frac{i_f(t - \tau_k) + i_f(t + \tau_k)}{2} \quad (10)$$

即在某一模量上保护动作用量

$$di(t) = i_{mk}(t) + i_{Jnk}(t) = \frac{i_f(t - \tau_k) + i_f(t + \tau_k)}{2} \quad (11)$$

公式(11)反映了在某一模线路上保护动作用量与故障点短路电流的关系。三相线路经过相模变换后

的三个模分量都满足式(11)的关系,因此可以写成矩阵形式有:

$$\begin{bmatrix} di_0(t) \\ di(t) \\ di(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{bmatrix} i_{f0}(t-k_0) \\ i_f(t-k) \\ i_f(t-k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{f0}(t+k_0) \\ i_f(t+k) \\ i_f(t+k) \end{bmatrix} \right] \quad (12)$$

上式中下标 0、 $$ 、 $$ 分别对应于相模变换后的 3 个 Karenbauer 模分量,下同。利用各相动作量的相模变换关系和式(12)有:

$$\begin{bmatrix} di_a(t) \\ di_b(t) \\ di_c(t) \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} di_0(t) \\ di(t) \\ di(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{bmatrix} i_{f0}(t-k_0) \\ i_f(t-k) \\ i_f(t-k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{f0}(t+k_0) \\ i_f(t+k) \\ i_f(t+k) \end{bmatrix} \right] \quad (13)$$

公式(13)反映了保护各相动作量与短路点电流各模分量之间的关系。

A 相接地故障时故障点短路电流的相模变换关系为:

$$\begin{bmatrix} i_{f0}(t) \\ i_f(t) \\ i_f(t) \end{bmatrix} = [S^{-1}] \begin{bmatrix} i_{fa}(t) \\ i_{fb}(t) \\ i_{fc}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_{fa}(t) \\ i_{fa}(t) \\ i_{fa}(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)对于任何时间 t 都是成立的,用 $(t-k_0)$ 、 $(t-k)$ 、 $(t-k)$ 代替 t 可得:

$$\begin{bmatrix} i_{f0}(t-k_0) \\ i_f(t-k) \\ i_f(t-k) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_{fa}(t-k_0) \\ i_{fa}(t-k) \\ i_{fa}(t-k) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式(14)中用 $(t+k_0)$ 、 $(t+k)$ 、 $(t+k)$ 代替 t 可得:

$$\begin{bmatrix} i_{f0}(t+k_0) \\ i_f(t+k) \\ i_f(t+k) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_{fa}(t+k_0) \\ i_{fa}(t+k) \\ i_{fa}(t+k) \end{bmatrix} \quad (16)$$

将式(15)和(16)代入式(13)中,并考虑到在完全换位三相线路中有 $k = k$,可得:

$$\begin{bmatrix} di_a(t) \\ di_b(t) \\ di_c(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_{fa}(t-m_0) + 2i_{fa}(t-m) \\ i_{fa}(t-m_0) - i_{fa}(t-m) \\ i_{fa}(t-m_0) - i_{fa}(t-m) \end{bmatrix} + \right.$$

$$\left. \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_{fa}(t+m_0) + 2i_{fa}(t+m) \\ i_{fa}(t+m_0) - i_{fa}(t+m) \\ i_{fa}(t+m_0) - i_{fa}(t+m) \end{bmatrix} \right] \quad (17)$$

公式(17)反映了 A 相接地故障时各相动作量与短路点电流之间的关系。上式经过傅氏变换写成相量形式并根据傅氏变换的延时定理得:

$$\begin{bmatrix} dI_a \\ dI_b \\ dI_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_{fa}e^{-jw_k_0} + 2I_{fa}e^{-jw_k} \\ I_{fa}e^{-jw_k_0} - I_{fa}e^{-jw_k} \\ I_{fa}e^{-jw_k_0} - I_{fa}e^{-jw_k} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_{fa}e^{jw_k_0} + 2I_{fa}e^{jw_k} \\ I_{fa}e^{jw_k_0} - I_{fa}e^{jw_k} \\ I_{fa}e^{jw_k_0} - I_{fa}e^{jw_k} \end{bmatrix} \right] \quad (18)$$

令 $F_1^- = (e^{-jw_k_0} + 2e^{-jw_k})/3$, $F_1^+ = (e^{jw_k_0} + 2e^{jw_k})/3$, 所以有:

$$F_1 = (F_1^- + F_1^+)/2 = [\cos(w_k_0) + 2\cos(w_k)]/3 \quad (19)$$

令 $F_2^- = (e^{-jw_k_0} - e^{-jw_k})/3$, $F_2^+ = (e^{jw_k_0} - e^{jw_k})/3$ 所以有:

$$F_2 = (F_2^- + F_2^+)/2 = [\cos(w_k_0) - \cos(w_k)]/3 \quad (20)$$

可见 F_1 、 F_2 都是实数,这时式(18)可以写为:

$$\begin{bmatrix} dI_a \\ dI_b \\ dI_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{bmatrix} I_{fa}F_1^- \\ I_{fa}F_2^- \\ I_{fa}F_2^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{fa}F_1^+ \\ I_{fa}F_2^+ \\ I_{fa}F_2^+ \end{bmatrix} \right] = \begin{bmatrix} I_{fa}F_1 \\ I_{fa}F_2 \\ I_{fa}F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_2 \\ F_2 & F_1 & F_2 \\ F_2 & F_2 & F_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

AB 两相都有故障时(包括 AB 相间短路故障和 AB 相间短路并接地故障),经过相似的推导类似于

公式(18)有:

$$\begin{bmatrix} dI_a \\ dI_b \\ dI_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_{fa}e^{-jw_k_0} + 2I_{fa}e^{-jw_k} + I_{fb}e^{-jw_k_0} - I_{fb}e^{-jw_k} \\ I_{fb}e^{-jw_k_0} + 2I_{fb}e^{-jw_k} + I_{fa}e^{-jw_k_0} - I_{fa}e^{-jw_k} \\ I_{fa}e^{-jw_k_0} - I_{fa}e^{-jw_k} + I_{fb}e^{-jw_k_0} - I_{fb}e^{-jw_k} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_{fa}e^{jw_k_0} + 2I_{fa}e^{jw_k} + I_{fb}e^{jw_k_0} - I_{fb}e^{jw_k} \\ I_{fb}e^{jw_k_0} + 2I_{fb}e^{jw_k} + I_{fa}e^{jw_k_0} - I_{fa}e^{jw_k} \\ I_{fa}e^{jw_k_0} - I_{fa}e^{jw_k} + I_{fb}e^{jw_k_0} - I_{fb}e^{jw_k} \end{bmatrix} \right] \quad (22)$$

同样,按照公式(21)的推导上式可简写为:

$$\begin{bmatrix} dI_a \\ dI_b \\ dI_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_2 \\ F_2 & F_1 & F_2 \\ F_2 & F_2 & F_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

当 AB 相间短路时 $I_{fa} + I_{fb} = 0$, 由上式得 $dI_c = 0$
三相都有故障时:

$$\begin{bmatrix} dI_a \\ dI_b \\ dI_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_{fa}e^{-jw_{k0}} + 2I_{fa}e^{-jw_k} + I_{fb}e^{-jw_{k0}} - I_{fb}e^{-jw_k} + I_{fc}e^{-jw_{k0}} - I_{fc}e^{-jw_k} \\ I_{fb}e^{-jw_{k0}} + 2I_{fb}e^{-jw_k} + I_{fa}e^{-jw_{k0}} - I_{fa}e^{-jw_k} + I_{fc}e^{-jw_{k0}} - I_{fc}e^{-jw_k} \\ I_{fc}e^{-jw_{k0}} + 2I_{fc}e^{-jw_k} + I_{fa}e^{-jw_{k0}} - I_{fa}e^{-jw_k} + I_{fb}e^{-jw_{k0}} - I_{fb}e^{-jw_k} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_{fa}e^{jw_{k0}} + 2I_{fa}e^{jw_k} + I_{fb}e^{jw_{k0}} - I_{fb}e^{jw_k} + I_{fc}e^{jw_{k0}} - I_{fc}e^{jw_k} \\ I_{fb}e^{jw_{k0}} + 2I_{fb}e^{jw_k} + I_{fa}e^{jw_{k0}} - I_{fa}e^{jw_k} + I_{fc}e^{jw_{k0}} - I_{fc}e^{jw_k} \\ I_{fc}e^{jw_{k0}} + 2I_{fc}e^{jw_k} + I_{fa}e^{jw_{k0}} - I_{fa}e^{jw_k} + I_{fb}e^{jw_{k0}} - I_{fb}e^{jw_k} \end{bmatrix} \right] \quad (24)$$

同样可简写为:

$$\begin{bmatrix} dI_a \\ dI_b \\ dI_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_2 \\ F_2 & F_1 & F_2 \\ F_2 & F_2 & F_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} \quad (25)$$

其他故障类型都可以按照这种方式进行推导,不再具体给出。总结公式(21)、(23)和(25),所有故障类型都可以统一用公式(25)表示保护的动作用与故障点处短路电流的关系,当输电线内部第 ϕ 相 ($\phi = a, b, c$) 有故障时, $I_{f\phi}$ 就为该相短路点电流,否则 $I_{f\phi} = 0$ 。并且式(25)与过渡电阻是没有关系的,这使后面按照该式所提保护判据受过渡电阻影响小。

下面以本文仿真验证部分所提的特高压线路参数为例说明 F_1 和 F_2 的大小,因为他们的值都与 k_0 和 k 有关,即与故障点和参考点的距离有关,下面给出当参考点选为线路中点时,不同故障点发生故障时所对应的 F_1 和 F_2 的大小,其中图 5 和图 6 的横坐标 l 表示故障点与 m 侧母线间的距离。

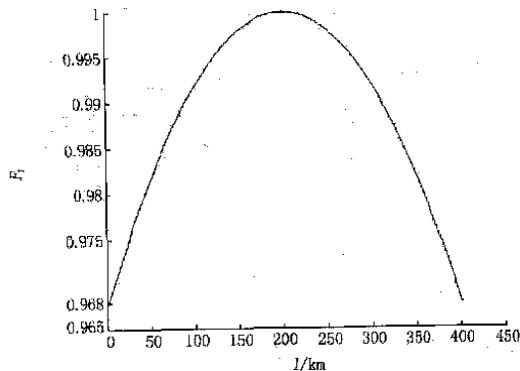


图 5 不同故障点所对应的 F_1

Fig. 5 F_1 for different fault points

由图 5 和图 6 可见故障点和参考点之间的距离越近, F_1 越接近 1, F_2 越接近 0,从公式(19)和(20)可知这个结论与参考点的具体选择位置无关。在 400 km 线路上,当参考点选择在路中点,故障点和

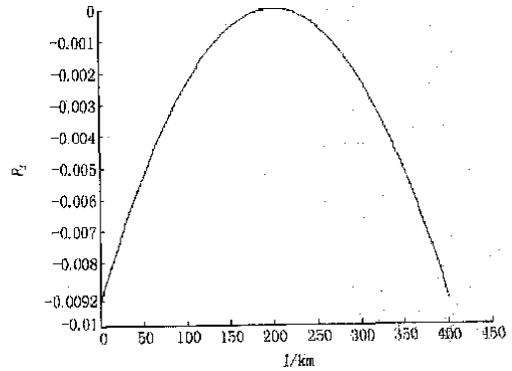


图 6 不同故障点所对应的 F_2

Fig. 6 F_2 for different fault points

参考点的距离最大 200 km, F_1 不小于 0.968, $|F_2|$ 不大于 0.009 2。

以上推导都是从无损线路入手的,实际线路都是有电阻的,很难给出较简单的表达式。但是本文经过仿真表明,线路电阻对 $|F_1|$ 和 $|F_2|$ 的计算结果影响很小,完全可用保护的定值躲过。

4 保护判据及灵敏度分析

由上面分析可知,内部故障时非故障相差动保护动作用原理上并不为零,而是与故障相的短路电流成正比,因此为了防止其误动可以用故障相的动作用作制动。三相的判据分别为:

$$\begin{cases} dI_a > K \max(dI_b, dI_c) + I_s \\ dI_b > K \max(dI_c, dI_a) + I_s \\ dI_c > K \max(dI_a, dI_b) + I_s \end{cases} \quad (26)$$

判据中有固定门槛 I_s 和浮动门槛, K 为浮动门槛的制动系数,某相判据中浮动门槛是取其相其余两相动作用的最大值,这样做的好处在于不对称短路时非故障相可以被故障相可靠制动,单相接地故障时故障相灵敏度很高。

固定门槛 I_s 的作用如下:(1) 外部故障时 I_s 大

于各相可能出现的最大不平衡动作量,防止保护误动;(2)内部故障短路电流较小时,固定门槛占主导, I_s 要大于非故障相不平衡动作量,躲过计算误差对非故障相电流的影响,防止保护非选择性动作。

固定门槛 I_s 的整定应使保护在内部故障短路电流最小情况下,故障相能可靠动作,同时躲过外部故障时可能出现的最大不平衡动作量。外部故障时可能出现的最大不平衡动作量无法给出精确的表达式,本文系统仿真表明小于 200 A。由于 I_s 的整定是考虑短路电流较小的情况,这时非故障相电流理论值远小于所考虑的外部故障时可能出现的最大不平衡动作量,所以整定过程不必单独考虑。

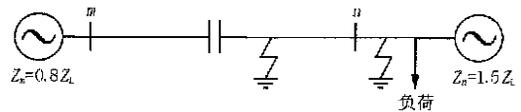
浮动门槛的作用是:当内部故障并且短路电流较大时,浮动门槛占主导,按照第 3 部分内容所述 F_1 和 F_2 的大小关系进行整定,可以防止保护非选择性动作。浮动门槛的使用可以避免固定门槛整定的过大,有效提高保护抗过渡电阻能力。

下面举例分析内部故障时保护的灵敏度。 K 值的整定主要考虑有较大短路电流的情况,因此忽略固定门槛 I_s 。单相接地故障时(以 A 相为例),各相动作量为 $dI_a = |F_1 I_{fa}| = |F_1| |I_{fa}|$, $dI_b = |F_2 I_{fb}| = |F_2| |I_{fb}|$, $dI_c = |F_2 I_{fc}| = |F_2| |I_{fc}|$, 所以 $K = k_l \left[\frac{|F_2|}{|F_1|} \right]_{\max}$, k_l 为可靠系数。以本文参数为例,当故障发生在一侧母线处时 $|F_2|_{\max} = 0.0092$, $|F_1|_{\min} = 0.968$,这时 $\frac{|F_2|}{|F_1|}$ 达到最大值 0.0095,即使取较大的 $k_l = 4$,可得 $K = 0.038$,灵敏度 $K_l = 26.3$,可见单相接地故障时灵敏度很高。在两相故障时(以 AB 相间短路并接地故障为例), $dI_{ma} = |F_1 I_{fa} + F_2 I_{fb}| = |F_1| |I_{fa}|$, $dI_{mb} = |F_2 I_{fa} + F_1 I_{fb}| = |F_1| |I_{fb}|$, $dI_{mc} = |F_2 I_{fa} + F_2 I_{fb}| = |F_2| |I_{fa} + I_{fb}|$,对 A 相来说浮动门槛 $K \cdot \max(dI_{mb}, dI_{mc}) = K \cdot dI_{mb}$,如果取和上面分析单相接地时同样的制动系数 K , $K_l = \frac{dI_{ma}}{K \cdot dI_{mb}} = \frac{|F_1| |I_{fa}|}{K \cdot |F_1| |I_{fb}|} = 26.3 \frac{|I_{fa}|}{|I_{fb}|}$,输电线两相故障时一般为两相经弧光电阻短路,或两相经弧光电阻短路后再对杆塔放电,两相短路电流差别不会很大,所以对故障相来说,仍然有足够的灵敏度。B 相情况与此相似,三相故障也可以类推。

5 仿真验证

仿真选用 750 kV 双电源系统,线路长为 400

km,如图 7 所示,线路参数取自某设计中的 750 kV 线路完全换位参数,忽略电导,串补电容安装在线路中点,电容补偿度 40%, n 侧电源角度落后于 m 侧 44 度, m 侧和 n 侧电势分为 1.106 2 和 1.106 9 倍额定电压, n 侧所带负荷等效阻抗为 242.283 9 + j34.523 5,两侧系统传输功率约等于 2 414 MW,暂未考虑有并联电抗器的情况。本文进行了各种内、外部故障的仿真,仿真时固定门槛按照承受 500 过渡电阻整定取为 $I_s = 300$ A,综合考虑可靠性和灵敏性,制动系数取 $K = 0.1024$ 。因篇幅所限,下面首先以 A 相内、外部短路为例比较新的和带半补偿传统分相电流差动保护判据的仿真结果,然后又给出两种典型情况的对比结果。内部短路发生在线路距离 m 侧母线 300 km 处,外部短路在 n 侧反向出口处,过渡电阻都为零。表 1 和图 8 给出了输电线路保护区内发生 A 相接地故障时的情况;表 2 和图 9 给出了输电线路保护区外发生 A 相接地短路时的情况;表 3 和图 10 给出了 m 侧空载合闸时的情况;表 4 和图 11 给出了 m 侧电源空投于 C 相接地故障线路时的情况。



$r_1 = 0.013326 / \text{km}$	$r_0 = 0.307915 / \text{km}$
$x_1 = 0.266079 / \text{km}$	$x_0 = 0.814968 / \text{km}$
$c_1 = 0.0138776 \mu\text{F}/\text{km}$	$c_0 = 0.00977857 \mu\text{F}/\text{km}$

图 7 仿真时使用的系统图

Fig. 7 System equivalent circuit used for simulation

所有表中 dI_ϕ 表示两种分相电流差动保护第 ϕ 相的动作量(差动量), ZdI_ϕ 表示新的分相电流差动保护第 ϕ 相的门槛值。所有表中故障都发生在序号为 80 的采样时刻,对应于图 8~11 中横坐标的 0.04 s,每周采样 40 点。由于数据量大,对于故障后表中只给出了序号为偶数的数据。所有电流值是以安培为单位的一次电流。

6 仿真结果分析

1) 从表 1 和表 2 可见,本文所提新原理在外部故障时每一相及内部故障时非故障相的动作量在各采样时刻几乎都小于传统差动保护,在内部短路时,故障相故障后的动作量比传统差动保护小,但是相对差别不大,这与前面推导的各相动作量表达式是相符的。因此本文所提新原理比传统差动保护更灵

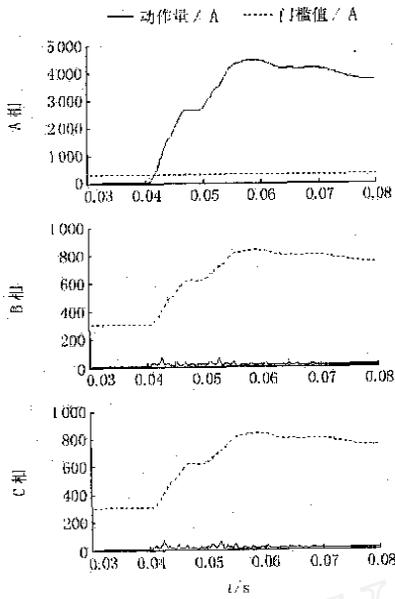


图 8 保护区内发生 A 相接地短路时新的分相电流差动保护的仿真结果

Fig. 8 Simulating results of new segregated phase current differential protection in case of single phase A to ground fault in protected zone

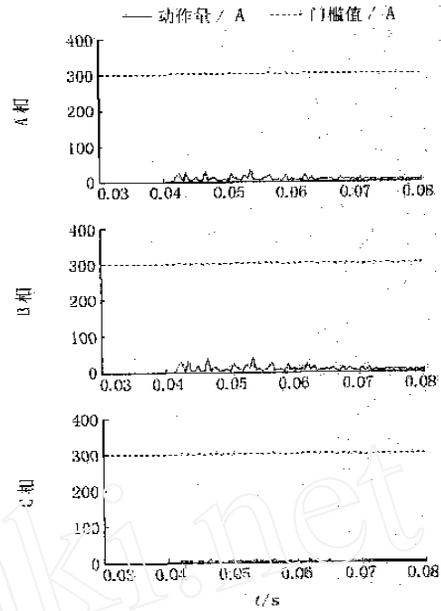


图 10 m 侧空载合闸时新的分相电流差动保护的仿真结果

Fig. 10 Simulating results of new segregated phase current differential protection in case of switching without any load

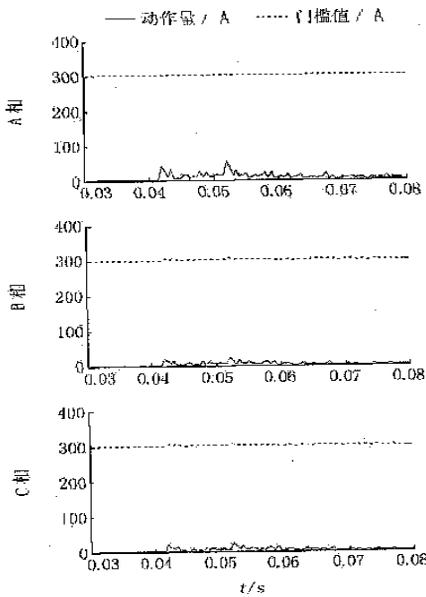


图 9 保护区外发生 A 相接地短路时新的分相电流差动保护的仿真结果

Fig. 9 Simulating results of new segregated phase current differential protection in case of single phase A to ground fault out of protected zone

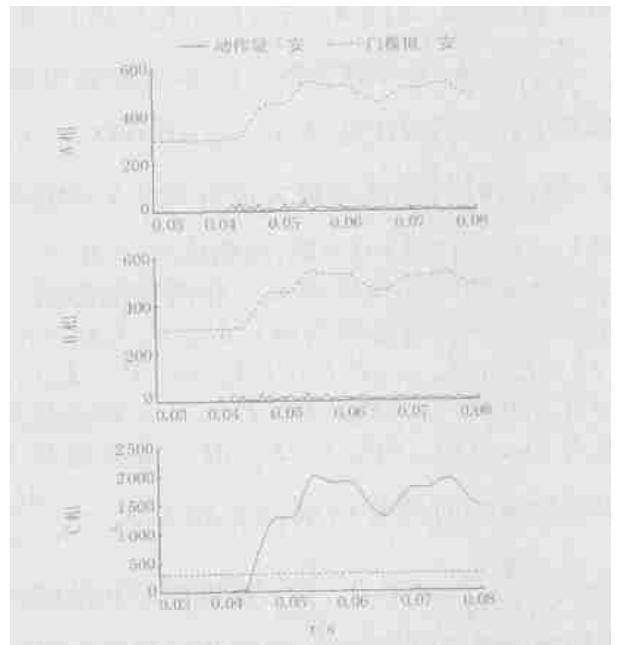


图 11 空投于 C 相接地故障线路时新的分相电流差动保护的仿真结果

Fig. 11 Simulating results of new segregated phase current differential protection in case of switching on phase C to ground fault line

表 1 保护区内发生 A 相短路时两种分相电流差动保护动作量的比较

Tab. 1 Comparison of operating quantities of two kinds of segregated phase current differential protection in case of single phase A to ground fault in protected zone

状态	序号	本文所提判据					传统判据			
		dI_a	ZdI_a	dI_b	ZdI_b	dI_c	ZdI_c	dI_a	dI_b	dI_c
故障前	77	0.70	300.08	0.70	300.08	0.70	300.08	0.87	0.87	0.87
	78	0.70	300.08	0.70	300.08	0.70	300.08	0.87	0.87	0.87
	79	0.70	300.08	0.70	300.08	0.70	300.08	0.87	0.87	0.87
故障时刻	80	0.70	300.08	0.70	300.08	0.70	300.08	0.87	0.87	0.87
	82	71.20	303.56	29.53	308.57	28.36	308.57	406.33	14.52	15.43
	84	495.31	302.83	23.47	359.64	22.39	359.64	1 125.93	88.59	88.13
	86	1 145.34	301.89	15.68	437.90	15.24	437.90	1 834.44	195.56	195.16
	88	1 585.67	301.49	11.95	490.91	12.39	490.91	2 289.40	37.72	36.54
	90	1 941.16	304.17	34.48	533.72	34.64	533.72	2 585.04	76.66	75.85
	92	2 387.92	300.99	7.16	587.51	8.25	587.51	2 790.12	51.42	50.78
	94	2 644.66	300.16	0.91	618.42	1.35	618.42	2 804.83	16.54	17.90
	96	2 648.48	301.55	12.90	618.88	11.92	618.88	2 696.12	44.03	42.71
	98	2 634.27	302.57	20.27	617.17	21.38	617.17	2 819.38	115.92	114.45
	100	2 716.42	303.06	24.25	627.06	25.44	627.06	3 239.92	86.61	85.13
	102	3 024.76	304.95	39.94	664.18	41.13	664.18	3 604.84	79.60	78.11
	104	3 333.75	302.35	18.30	701.38	19.49	701.38	3 883.21	53.79	52.49

表 2 保护区外发生 A 相接地短路时两种分相电流差动保护动作量的比较

Tab. 2 Comparison of operating quantities of two kinds of segregated phase current differential protection in case of single phase A to ground fault out of protected zone

状态	序号	本文所提判据					传统判据			
		dI_a	ZdI_a	dI_b	ZdI_b	dI_c	ZdI_c	dI_a	dI_b	dI_c
故障前	77	0.70	300.08	0.70	300.08	0.70	300.08	0.87	0.87	0.87
	78	0.70	300.08	0.70	300.08	0.70	300.08	0.87	0.87	0.87
	79	0.70	300.08	0.70	300.08	0.70	300.08	0.87	0.87	0.87
故障时刻	80	0.70	300.08	0.70	300.08	0.70	300.08	0.87	0.87	0.87
	82	0.78	300.15	1.23	300.09	0.47	300.15	400.06	38.08	39.41
	84	41.60	302.65	22.01	305.01	20.98	305.01	475.19	16.30	15.06
	86	10.92	300.69	5.74	301.31	5.27	301.31	76.36	149.11	148.89
	88	6.94	300.34	2.81	300.84	1.88	300.84	81.72	191.07	191.22
	90	4.87	300.26	2.17	300.59	1.00	300.59	131.59	60.25	60.37
	92	17.77	301.04	8.67	302.14	8.23	302.14	10.61	50.17	49.23
	94	10.42	300.50	4.17	301.25	3.57	301.25	75.73	23.34	21.96
	96	26.23	301.63	13.50	303.16	12.65	303.16	407.58	10.80	11.99
	98	22.36	301.52	12.67	302.69	11.74	302.69	418.07	10.66	11.08
	100	12.03	300.64	5.25	301.45	5.28	301.45	290.38	82.45	81.12
	102	13.23	300.79	6.52	301.59	6.08	301.59	143.32	150.20	149.02
	104	54.03	303.13	25.12	306.50	25.99	306.50	233.59	72.21	71.68

表 3 m 侧空载合闸时两种分相电流差动保护动作量的比较

Tab. 3 Comparison of operating quantities of two kinds of segregated phase current differential protection in case of switching without any load

状态	序号	本文所提判据					传统判据			
		dI_a	ZdI_a	dI_b	ZdI_b	dI_c	ZdI_c	dI_a	dI_b	dI_c
故障前	77	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	0.00	0.00
	78	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	0.00	0.00
	79	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	0.00	0.00
故障时刻	80	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	0.00	0.00
	82	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	606.87	623.49	17.65
	84	16.86	302.49	20.68	302.03	3.82	302.49	956.67	755.80	200.87
	86	1.29	300.21	1.74	300.16	0.45	300.21	1 072.89	571.12	502.33
	88	3.67	300.53	4.37	300.44	0.77	300.53	486.67	327.72	804.14
	90	12.94	302.17	18.00	301.56	5.11	302.17	337.08	1 145.94	809.62
	92	2.75	300.40	3.30	300.33	0.73	300.40	1 146.33	1 673.24	527.50
	94	2.68	300.49	4.10	300.32	1.65	300.49	1 745.72	1 731.43	31.49
	96	11.75	301.47	12.18	301.41	0.58	301.47	1 640.84	982.93	658.34
	98	4.66	300.65	5.36	300.56	0.71	300.65	1 184.05	85.06	1 109.19
	100	1.32	300.32	2.65	300.19	1.56	300.32	294.67	1 022.84	1 308.10
	102	10.03	301.62	13.50	301.21	3.66	301.62	1 145.80	2 273.99	1 129.07
	104	4.01	300.47	3.90	300.48	0.79	300.48	1 888.81	2 349.04	461.38

表 4 空投于 C 相接地故障线路时两种分相电流差动保护动作量的比较

Tab. 4 Comparison of operating quantities of two kinds of segregated phase current differential protection in case of switching on phase C to ground fault line

状态	序号	本文所提判据					传统判据			
		dI_a	ZdI_a	dI_b	ZdI_b	dI_c	ZdI_c	dI_a	dI_b	dI_c
故障前	77	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	0.00	0.00
	78	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	0.00	0.00
	79	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	0.00	0.00
故障时刻	80	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	0.00	0.00
	82	0.00	300.00	0.00	300.00	0.00	300.00	606.87	623.49	17.65
	84	17.38	302.43	20.16	302.09	1.56	302.43	956.68	755.81	203.55
	86	4.87	303.87	2.55	303.87	32.16	300.59	1 063.94	580.00	481.68
	88	8.76	316.43	4.17	316.43	136.45	301.05	505.27	347.10	817.32
	90	16.30	360.97	14.78	360.97	506.43	301.96	218.37	1 265.09	1 133.57
	92	4.15	400.52	3.90	400.52	834.89	300.50	953.41	1 866.23	1 318.50
	94	2.84	435.34	7.25	435.34	1 124.11	300.87	1 459.31	2 017.85	1 381.25
	96	17.48	451.69	6.55	451.69	1 259.92	302.10	1 337.62	1 286.28	1 305.41
	98	6.99	452.92	3.04	452.92	1 270.14	300.84	1 031.09	232.78	1 351.56
	100	6.81	452.66	10.45	452.66	1 267.91	301.26	350.02	1 080.35	1 575.41
	102	7.53	455.70	19.30	455.70	1 293.22	302.32	770.65	2 649.22	1 936.52
	104	5.42	482.32	7.49	482.32	1 514.32	300.90	1 238.81	2 999.36	2 129.55

敏,外部故障时可靠性更高。再由表3和表4可见,本文所提新原理在各种情况下都可正确动作(参考图8~11),而传统差动保护由于暂态过程的影响根本无法进行选相和选取合适的定值,实际上已经无法使用。

2) 从表1和表4中看到新判据中故障相动作量在故障后是逐渐增大的,这是因为采用的半波傅氏滤波中利用了部分故障前数据。

3) 由于新原理要求比较同一点的电流量,在稳态运行和外部故障时,被比较的两个电流量就是同一个电流,故对滤波算法的优劣不敏感。

7 结论

1) 本文提出的输电线路纵联保护新原理,从原理上不受电容电流的影响,解决了电容电流影响纵联保护的难题。

2) 本文所提新原理也适用于串补线路,而且线路两侧保护间通信量与传统差动保护相同。

3) 和传统的差动原理比较,此新原理的唯一缺点是引入线路两侧的电压量,但是用于长线路时传统差动保护要采用电容电流补偿措施同样需要引入电压量。

参考文献:

- [1] 贺家李,李永丽,郭征,等. 特高压输电线继电保护配置方案:(一)特高压输电线的结构与运行特点[J]. 电力系统自动化,2002,26(23):1-6.
- HE Jia-li, LI Yong-li, GUO Zheng, et al. Relay Protection for UHV Transmission Lines: Part One Construction and Operation Characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23):1-6.
- [2] 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 De-shu, ZHANG Zhe, et al. The Simulation Analysis for the Influence of Capacitance Current of UHV Transmission Line on Differential Current Protection and Compensating Countermeasure[J]. Relay, 2001, 29(6): 6-9.

[3] 文明浩,陈德树,尹项根. 超高压长线相量差动保护的研究[J]. 电力系统自动化,2000,24(20):37-40.

WEN Ming hao, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen. Study of Current Phasor Differential Protection for Long UHV Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 37-40.

[4] 郭征,贺家李. 输电线纵联差动保护的新原理[J]. 电力系统自动化,2004,28(11):1-5.

GUO Zheng, HE Jia-li. Novel Principle of Pilot Differential Relay Protection of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 1-5.

[5] 束洪春,司大军,陈学允. 基于分布参数模型的串补线路故障测距方法研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4):72-76.

SHU Hong-chun, SI Da-jun, CHEN Xue-yun. Studying on Locating Faults on Series Compensated Lines Based on Distributed Parameter Line Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 72-76.

[6] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996.

GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location—Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

收稿日期: 2004-10-14

作者简介:

贺家李(1925-),男,教授,中国电机工程学会名誉理事,IEEE高级会员,俄罗斯工程院外籍院士,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护;E-mail:jlh86222@yahoo.com

郭征(1976-),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: guozheng2003@126.com

New principle of segregated phase current differential protection in long distance transmission line with series capacitor compensation

HE Jia-li, GUO Zheng

(Department of Electric Power Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper improves the new principle of Bergeron-based segregated phase current differential protection. The improved new principle can be used in long distance transmission line with series capacitor compensation. This paper gives expressions of operating quantities of every phase. The theoretical analysis and simulation results prove that the improved principle will not still be affected by distributed capacity current of transmission line and has higher sensitivity and reliability.

Key words: differential relay; series compensated capacitor; Bergeron model