

基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据

郑玉平^{1,2}, 吴通华², 丁 琰^{2,3}, 陈允平¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

(2. 国电自动化研究院, 江苏省南京市 210003; 3. 东南大学电气工程系, 江苏省南京市 210096)

摘要: 推导出了基于贝瑞隆模型的差动判据在三相耦合线路区内故障时的故障相差流和非故障相差流表达式,并在此基础上,提出一种新的基于贝瑞隆模型的实用判据,新判据在区外故障时能完全补偿暂态和稳态电容电流,区内故障时灵敏度高、允许过渡电阻能力强。仿真结果表明分析正确、新判据可靠。

关键词: 线路保护; 电流差动保护; 贝瑞隆模型; 电容电流补偿

中图分类号: TM773

0 引言

分相式线路差动保护原理具有灵敏度高、简单可靠和动作速度快等诸多优点,已经成为超高压线路的主保护。但是超高压长线路的分布电容不仅影响故障暂态过程中计算出的电流相量精度,更主要的是电容电流的存在使线路两端的测量电流不再满足基尔霍夫电流定律,从而影响了差动保护的灵敏度和可靠性。

针对电容电流对差动保护的影响,文献[1]提出半补偿法、全补偿法和切换补偿法等 3 种电容电流的补偿方案,但都是基于稳态补偿的,而在暂态过程中不能完全补偿电容电流。文献[2,3]提出了一种基于贝瑞隆模型的差动保护判据(下文称贝瑞隆差动),该判据与传统相量差动判据相比,前者比较的是同侧量,后者是比较异侧量,因为线路有分布电容电流,因此后者会受其影响,而前者不受其影响。贝瑞隆模型反映的是输电线路内部无故障时两端电压电流之间的关系,当区内发生故障时,贝瑞隆模型并不适用,对此问题文献[3]讨论了单相线路区内故障时的情况。本文则详细讨论了三相耦合线路区内故障时的情况,并导出了故障相差流和非故障相差流表达式。分析发现非故障相最大可能不平衡差流在较长线路、较小系统阻抗时将达到相当的规模,为躲过不平衡差流,定值将取得很大,在经较高电阻接地时将导致保护的灵敏度不足甚至拒动。

为消除贝瑞隆差动的缺点,本文提出一种基于贝瑞隆模型的差动保护实用判据,新判据在区外故障时能完全补偿暂态和稳态电容电流,区内故障时

灵敏度高、允许过渡电阻能力强。文章最后利用 EMTDC 在一典型线路上对经半补偿的相量差动、贝瑞隆差动和贝瑞隆差动实用判据进行数字仿真比较,仿真结果验证了以上结论。

1 贝瑞隆差动保护判据^[2,3]

对于一条双端(j 侧、 k 侧)三相线路, j 侧保护装置通过采样得到本侧各时刻三相电压、电流采样值: $u_j^a, u_j^b, u_j^c, i_j^a, i_j^b, i_j^c$;通过光纤或微波通道,得到 k 侧经采样同步化后各相同时刻的电压电流采样值: $u_k^a, u_k^b, u_k^c, i_k^a, i_k^b, i_k^c$ 。用 j 侧当前时刻 t 的 3 个电压量和以前 $t-\tau$ 时刻 j 侧三相的 6 个电压、电流量和 k 侧三相的 6 个电压、电流量,用贝瑞隆公式^[2~5]可以计算得到 j 侧当前时刻 3 个电流量的计算值 $i_{sj}^a, i_{sj}^b, i_{sj}^c$ 。然后用全周差分傅里叶算法对 3 个电流实测值 i_j^a, i_j^b, i_j^c 和 3 个计算值 $i_{sj}^a, i_{sj}^b, i_{sj}^c$ 进行滤波得到各自的基波矢量 $\dot{I}_j^a, \dot{I}_j^b, \dot{I}_j^c, \dot{I}_{sj}^a, \dot{I}_{sj}^b, \dot{I}_{sj}^c$ 。同理可求得对侧电流的基波矢量 $\dot{I}_k^a, \dot{I}_k^b, \dot{I}_k^c, \dot{I}_{sk}^a, \dot{I}_{sk}^b, \dot{I}_{sk}^c$ 。将实测值和计算值进行比较,构成基于贝瑞隆模型的差动判据:

$$I_{cdj}^n = |\dot{I}_{cdj}^n| = |\dot{I}_j^n - \dot{I}_{sj}^n| > I_0 \quad (1)$$

$$I_{cdk}^n = |\dot{I}_{cdk}^n| = |\dot{I}_k^n - \dot{I}_{sk}^n| > I_0 \quad (2)$$

式中: $n=a, b, c$; 定值 I_0 按大于外部故障时可能产生的最大不平衡动作量给定。

2 区内外故障时的动作特性

2.1 正常运行和区外故障

因为贝瑞隆模型真实地反映了两端母线之间线路内无故障的稳态运行或外部故障的暂态过程,故在内部无故障时理论上计算值和实测值应该基本相

等,有 $\dot{I}_j^n = \dot{I}_{Sj}^n, \dot{I}_k^n = \dot{I}_{Sk}^n (n=a, b, c)$, 故两侧动作量应该为 0。但考虑到各种误差和简化考虑损耗的影响,不会绝对为 0, I_0 的选取要躲过最大可能的误差。故正常运行和区外故障时,保护能可靠不动作。

2.2 区内故障

线路发生内部故障,相当于在故障点增加了一个节点,破坏了波的传播方程,贝瑞隆模型不再适用。此时保护判据式(1)、式(2)左边算出的动作量多大? 文献[3]分析了这种情况。以图 1 所示单根无损线路为例,假设 F 点发生短路,从文献[3]有:

$$i_{cdj}(t) = i_j(t) - i_{Sj}(t) = i_F(t - \tau_j) \quad (3)$$

$$i_{cdk}(t) = i_k(t) - i_{Sk}(t) = i_F(t - \tau_k) \quad (4)$$

式中: τ_j, τ_k 分别为由 F 到 j 端, F 到 k 端的波行时间; i_F 为故障电流。

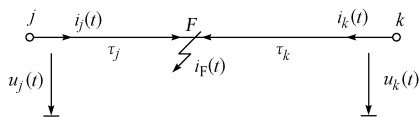


图 1 单根无损线路区内故障

Fig. 1 Internal fault of a lossless single phase line

此时两侧动作量 $i_{cdj}(t), i_{cdk}(t)$ 反映的是故障电流,因此保护能正确动作。

以上是单相线路的情况,对于三相耦合线路,文献[3]没有分析,本文以均匀换位的三相耦合无损线路为例展开分析。三相耦合线路通过相模变换可以转换为 3 个没有耦合的模分量。本文选取 Karenbauer 变换矩阵求模分量,其形式如下:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

各模量都满足贝瑞隆模型,因此有:

$$i'_{cdj}(t) = i'_j(t) - i'_{Sj}(t) = i'_F(t - \tau'_j) \quad (5)$$

$$i'_{cdk}(t) = i'_k(t) - i'_{Sk}(t) = i'_F(t - \tau'_k) \quad (6)$$

式中: $n'=0, \alpha, \beta; \tau_j^0, \tau_j^\alpha, \tau_j^\beta$ 分别表示由故障点到 j 端模量 0, α 和 β 的波行时间; $\tau_k^0, \tau_k^\alpha, \tau_k^\beta$ 分别表示由故障点到 k 端模量 0, α 和 β 的波行时间;对于均匀换位的三相无损线路,有 $\tau_j^\alpha = \tau_j^\beta, \tau_k^\alpha = \tau_k^\beta$ 。

利用变换矩阵 $\mathbf{S}$,可将式(5)、式(6)转换为分相形式:

$$i_{cdj}^a(t) = i_F^0(t - \tau_j^0) + i_F^\alpha(t - \tau_j^\alpha) + i_F^\beta(t - \tau_j^\beta) \quad (7)$$

$$i_{cdj}^b(t) = i_F^0(t - \tau_j^0) - 2i_F^\alpha(t - \tau_j^\alpha) + i_F^\beta(t - \tau_j^\beta) \quad (8)$$

$$i_{cdj}^c(t) = i_F^0(t - \tau_j^0) + i_F^\alpha(t - \tau_j^\alpha) - 2i_F^\beta(t - \tau_j^\beta) \quad (9)$$

当区内 A 相接地短路时,有

$$\begin{bmatrix} i_F^0(t) \\ i_F^\alpha(t) \\ i_F^\beta(t) \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} i_F^a(t) \\ i_F^b(t) \\ i_F^c(t) \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} i_F^a(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_F^a(t) \\ i_F^a(t) \\ i_F^a(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

把式(10)代入式(7)~式(9),可得三相差流表达式:

$$i_{cdj}^a(t) = \frac{1}{3} [i_F^a(t - \tau_j^0) + 2i_F^a(t - \tau_j^\alpha)] \quad (11)$$

$$i_{cdj}^b(t) = \frac{1}{3} [i_F^a(t - \tau_j^0) - i_F^a(t - \tau_j^\alpha)] \quad (12)$$

$$i_{cdj}^c(t) = \frac{1}{3} [i_F^a(t - \tau_j^0) - i_F^a(t - \tau_j^\alpha)] \quad (13)$$

式中: $i_F^a(t)$ 为 A 相故障电流。

类似可推出 B 相接地短路、C 相接地短路时的差流表达式。式(14)~式(17)给出了区内单相故障时故障相和非故障相差流表达式:

$$i_{cdj}^F(t) = \frac{1}{3} [i_F(t - \tau_j^0) + 2i_F(t - \tau_j^\alpha)] \quad (14)$$

$$i_{cdj}^{NF}(t) = \frac{1}{3} [i_F(t - \tau_j^0) - i_F(t - \tau_j^\alpha)] \quad (15)$$

$$i_{cdk}^F(t) = \frac{1}{3} [i_F(t - \tau_k^0) + 2i_F(t - \tau_k^\alpha)] \quad (16)$$

$$i_{cdk}^{NF}(t) = \frac{1}{3} [i_F(t - \tau_k^0) - i_F(t - \tau_k^\alpha)] \quad (17)$$

式中: $i_{cdj}^F(t), i_{cdk}^F(t)$ 为 j 侧和 k 侧故障相差流; $i_{cdj}^{NF}(t), i_{cdk}^{NF}(t)$ 为 j 侧和 k 侧非故障相差流。

差动保护比较的是基波分量的大小,为分析方便,给出式(14)~式(17)的基波矢量形式(f 为基波频率):

$$\dot{I}_{cdj}^F = \frac{1}{3} (\dot{I}_F e^{-j2\pi f \tau_j^0} + 2\dot{I}_F e^{-j2\pi f \tau_j^\alpha}) \quad (18)$$

$$\dot{I}_{cdj}^{NF} = \frac{1}{3} (\dot{I}_F e^{-j2\pi f \tau_j^0} - \dot{I}_F e^{-j2\pi f \tau_j^\alpha}) \quad (19)$$

$$\dot{I}_{cdk}^F = \frac{1}{3} (\dot{I}_F e^{-j2\pi f \tau_k^0} + 2\dot{I}_F e^{-j2\pi f \tau_k^\alpha}) \quad (20)$$

$$\dot{I}_{cdk}^{NF} = \frac{1}{3} (\dot{I}_F e^{-j2\pi f \tau_k^0} - \dot{I}_F e^{-j2\pi f \tau_k^\alpha}) \quad (21)$$

下面举例说明式(18)~式(21)的各值。设一 500 kV 均匀无损线路 jk , 长 500 km, 线路参数为: $L_0 = 0.002\ 863\ 2\ \text{H/km}, L_1 = 0.000\ 908\ 46\ \text{H/km}, C_0 = 0.008\ 625\ \mu\text{F/km}, C_1 = 0.013\ 699\ \mu\text{F/km}$ 。当在 j 侧出口处 A 相金属性接地短路,有 $\tau_j^\alpha = \tau_j^\beta = 0; \tau_k^0 = 2.485\ \text{ms}, \tau_k^\alpha = 1.764\ \text{ms}$ 。代入式(18)~式(21),可得 $\dot{I}_{cdj}^F = \dot{I}_F, \dot{I}_{cdj}^{NF} = 0, \dot{I}_{cdk}^F = 0.994\dot{I}_F, \dot{I}_{cdk}^{NF} = 0.075\ 3\dot{I}_F, K_f = \frac{\dot{I}_{cdk}^{NF}}{\dot{I}_{cdk}^F} = \frac{0.075\ 3\dot{I}_F}{0.994\dot{I}_F} = 0.075\ 8$ 。

通过上例和式(18)~式(21)发现,由于地中模

量波速小于空中模量波速,在传播过程中发生波形畸变,使故障相差流不完全等于故障电流,但其值和故障电流差别很小,可以近似认为相等;但非故障相差流将不再为 0,其大小有以下规律:

a. 非故障相的最大不平衡差流出现在系统阻抗较小侧线路出口处金属性接地短路时。

b. 系统阻抗越小时,其出口短路电流越大,非故障相不平衡差流也越大。

c. 线路越长时,地中模量播行时间 τ^0 和空间模量播行时间 τ^e 差值越大,非故障相不平衡差流也越大。

d. 远故障侧的非故障相不平衡差流比近故障侧大。

超高压输电线路一般要求选相跳闸,区内单相故障时要求跳单相,如果 I_0 按文献[2]所述按大于外部故障时可能产生的最大不平衡差流整定,就有可能引起非故障相误动。因此, I_0 的选取应同时大于区内单相故障时非故障相最大可能的差流和外部故障及故障切除时、空载合闸时可能产生的最大不平衡差流。当线路较长、某侧系统阻抗较小时,非故障相的最大可能不平衡差流将达到相当的规模,如上所举例子,最大不平衡差流达 $0.0753\dot{I}_F$,此时 I_0 必将整定得很大,当区内经高阻接地短路时保护可能因灵敏度不足而拒动,其允许过渡电阻能力大大降低。

区内多相短路故障时跳三相,不存在选相问题。有损线路情况的分析方法基本同上,在此不详述。

3 基于贝瑞隆模型的差动保护实用判据

3.1 实用判据的提出

为了克服贝瑞隆差动判据灵敏度受区内单相接地短路非故障相不平衡差流影响的缺点,同时又能保留原判据不受电容电流影响的特点,本文在原判据基础上提出了一种基于贝瑞隆模型的差动保护实用判据。新判据的差流(动作量)为:

$$I_{cd}^n = |\dot{I}_{cd}^n| = |\dot{I}_j^n - \dot{I}_{Sj}^n + \dot{I}_k^n - \dot{I}_{Sk}^n| \quad (22)$$

式中: $n=a, b, c$ 。

可看出,有 $\dot{I}_{cd}^n = \dot{I}_{cdj}^n + \dot{I}_{cdk}^n$,即新判据的差流等于原判据中两侧差流之和。三相差动判据分别为:

$$I_{cd}^a > K_{fd} \max(I_{cd}^b, I_{cd}^c) + I_0 \quad (23)$$

$$I_{cd}^b > K_{fd} \max(I_{cd}^a, I_{cd}^c) + I_0 \quad (24)$$

$$I_{cd}^c > K_{fd} \max(I_{cd}^a, I_{cd}^b) + I_0 \quad (25)$$

式中: I_0 为固定门槛; K_{fd} 为制动系数。

判据采用固定门槛+其他两相差流大者的权值来构成制动量。

3.2 实用判据的保护动作特性

3.2.1 正常运行和区外故障

如 2.1 节所述,线路内部无故障时有 $\dot{I}_j^n = \dot{I}_{Sj}^n$, $\dot{I}_k^n = \dot{I}_{Sk}^n$ ($n=a, b, c$),三相动作量 $I_{cd}^a, I_{cd}^b, I_{cd}^c$ 为 0,但考虑各种误差和简化损耗的影响,不会绝对为 0, I_0 的选取应按大于外部故障及故障切除时、空载合闸时的最大可能不平衡差流整定。

3.2.2 区内故障

线路发生内部单相短路接地时,由式(18)~式(21)可得故障相和非故障相的差流分别为:

$$\dot{I}_{cd}^F = \frac{\dot{I}_F}{3} (e^{-j2\pi f\tau_j^0} + 2e^{-j2\pi f\tau_j^e} + e^{-j2\pi f\tau_k^0} + 2e^{-j2\pi f\tau_k^e}) \quad (26)$$

$$\dot{I}_{cd}^{NF} = \frac{\dot{I}_F}{3} (e^{-j2\pi f\tau_j^0} - e^{-j2\pi f\tau_j^e} + e^{-j2\pi f\tau_k^0} - e^{-j2\pi f\tau_k^e}) \quad (27)$$

仍以 2.2 节中的 500 kV 三相均匀无损线路 jk 为例,此时有 $k_F = \dot{I}_{cd}^F / \dot{I}_F \approx 2$,表明新判据故障相差流为原判据的 2 倍。现在来看 $k_{NF} = \dot{I}_{cd}^{NF} / \dot{I}_F$,图 2 是 k_{NF} 随故障地点变化的曲线图。

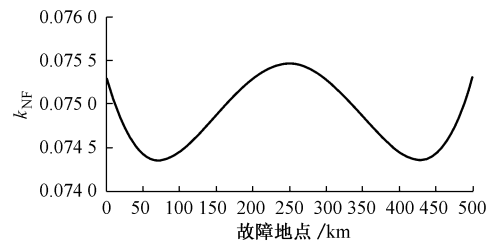


图 2 k_{NF} 与故障地点关系

Fig. 2 Relation of k_{NF} and fault location

可以看到其值变化很小,基本在 $[0.07435, 0.07545]$ 内变化,其中最大值出现在线路中点,此时 $k_{NF} = 0.07545$ 。为保证区内单相故障时非故障相不误动,本判据采用固定门槛+其他两相差流大者的权值来构成制动量,利用故障相差流自动提高非故障相的门槛,这样就能够灵活地躲过非故障相的不平衡差流;同时,由于非故障相差流较小,使得故障相的动作门槛较低,具有很高的灵敏度。 K_{fd} 的选取要保证制动量必须躲过可能的最大不平衡差流,因此必须找出非故障相差流和故障相差流比值 K_f 最大的点,显然有:

$$K_{fmax} = \frac{\dot{I}_{cd}^{NF}}{\dot{I}_F} = \frac{0.07545\dot{I}_F}{2\dot{I}_F} = 0.0377$$

考虑一定的裕度,取 $K_{fd} = 0.1$,当线路小于 500 km 时,可以取更小。

新判据与原判据相比,非故障相最大差流与故障相差流比值 K_f 由 0.0758 降到 0.0377,灵敏度提高了 1 倍。说明虽然贝瑞隆模型并不适用于区内

故障的情况,不能通过贝瑞隆模型计算出区内故障时的暂态电容电流,但是基于贝瑞隆模型的差动实用判据在区内故障时比原判据动作量增大,有很高的灵敏度。

4 仿真分析

利用 EMTDC 电磁暂态仿真程序,建立了一条 340 km 长的 500 kV 线路模型,线路经完全换位,忽略电导,具体参数见图 3,两侧电源角度差设为 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$,进行了各种运行情况和内、外部故障的仿真。故障类型为 10 种,过渡电阻从 $0 \Omega \sim 500 \Omega$,在 j, k 两端和中点设置了 K_1, K_2, K_3 等 3 个区内故障点,在距 k 侧 1 km 处设置了 K_4 区外故障点。每种情况均对经半补偿的相量差动、贝瑞隆差动和贝瑞隆差动实用判据进行对比。采用全周差分傅里叶滤波,每周期采样 48 点,电压互感器装于线路侧。

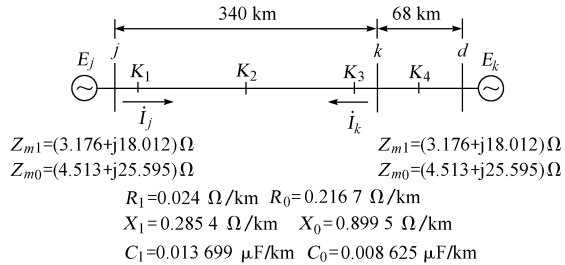


图 3 500 kV 系统模型
Fig. 3 Model of 500 kV system

4.1 仿真项目

- a. 双电源情况下各种区内、外部故障。
- b. 空投线路:模拟 j 侧电源空载合到正常线路;模拟 j 侧电源空载合到各种故障线路上。
- c. 单侧电源(j 侧)带负荷运行情况下,各种区内、外部故障,负荷取线路的波阻抗。

4.2 仿真结果与分析

4.2.1 区外故障及故障切除

如图 4 所示,区外故障时,半补偿相量差动使差流显著下降,但在故障后第 1 个周期和故障切除后第 1 个周期由于暂态电容电流较大,补偿效果不是很好。比较严重的情况是切除小接地电阻类型的故障^[6],这是因为小接地电阻使故障暂态情况严重,线路电压下降很多,故障切除时分布电容在充电,线路电压在恢复,暂态分量影响更大;在故障和故障切除后第 2 个周期起,半补偿法对电容电流补偿得较好。

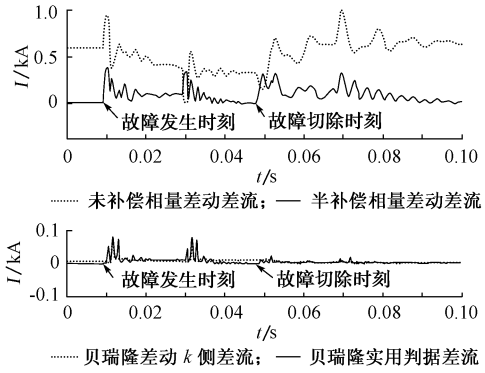


图 4 区外(K_4 点)A 相金属性接地故障相差流幅值
Fig. 4 Differential current amplitude of fault-phase for external single phase A to ground fault at K_4

贝瑞隆差动判据和贝瑞隆差动实用判据在各种区外故障下差流均非常小,说明两者在区外故障时能对暂态和稳态电容电流进行很好的补偿。

4.2.2 区内故障

区内故障时,主要讨论差动判据的允许过渡电阻能力和单相接地时是否能正确选相两个方面,表 1 是区内 A 相短路接地时 3 种判据的差流幅值,取故障发生后两周期内最大值。

表 1 区内 A 相短路接地故障时各判据差流值
Table 1 Differential current amplitude of three kinds of criterions for internal single phase(A) to ground fault

差动判据	差流幅值	K_1 , 空载 $R=0 \Omega$	K_1 点故障, 电势角 $\phi=45^{\circ}$			K_2 点故障, 电势角 $\phi=45^{\circ}$			K_3 点故障, 电势角 $\phi=45^{\circ}$			kA
			$R=200 \Omega$	$R=250 \Omega$	$R=500 \Omega$	$R=200 \Omega$	$R=250 \Omega$	$R=500 \Omega$	$R=200 \Omega$	$R=250 \Omega$	$R=500 \Omega$	
半补偿相量差动判据差流	I_{cd}^a	21.744 5	1.960 2	1.579 0	0.800 2	1.831 5	1.502 4	0.813 9	1.921 2	1.580 1	0.832 5	
	I_{cd}^b	0.033 9	0.011 1	0.010 1	0.007 9	0.039 4	0.035 0	0.024 9	0.038 2	0.033 9	0.022 2	
	I_{cd}^c	0.031 0	0.010 2	0.009 3	0.007 2	0.036 8	0.032 4	0.021 4	0.036 1	0.031 8	0.020 1	
贝瑞隆差动判据差流	I_{cdj}^a	22.030 8	1.977 0	1.588 9	0.800 5	1.756 7	1.444 4	0.758 5	1.816 9	1.478 8	0.763 0	
	I_{cdj}^b	0.157 3	0.007 8	0.006 9	0.006 8	0.079 0	0.067 4	0.039 6	0.172 5	0.148 0	0.091 5	
	I_{cdj}^c	0.157 1	0.019 2	0.016 6	0.011 4	0.068 3	0.056 7	0.029 1	0.128 8	0.104 4	0.051 5	
	I_{cde}^a	20.672 0	1.854 1	1.490 1	0.750 8	1.749 6	1.438 0	0.751 2	1.911 8	1.554 4	0.795 5	
	I_{cde}^b	1.180 2	0.116 5	0.093 6	0.046 9	0.069 7	0.058 6	0.032 2	0.031 4	0.029 0	0.023 4	
	I_{cde}^c	1.181 0	0.126 9	0.103 8	0.056 5	0.081 5	0.070 1	0.043 0	0.018 3	0.017 7	0.017 3	
贝瑞隆实用判据差流	I_{cd}^a	41.762 5	3.750 7	3.014 9	1.520 6	3.506 3	2.882 4	1.508 7	3.614 1	2.936 3	1.507 5	
	I_{cd}^b	1.144 0	0.114 4	0.092 2	0.046 7	0.148 1	0.125 3	0.070 6	0.153 5	0.130 0	0.075 5	
	I_{cd}^c	1.146 1	0.115 5	0.093 3	0.047 8	0.149 8	0.126 8	0.072 1	0.137 9	0.114 5	0.060 1	

a. 对于半补偿的相量差动判据,故障相差流和未补偿的差流差别不大,非故障相不平衡差流很小,说明半补偿法能较好补偿非故障相的电容电流。未补偿的相量差动判据容易在大电势角、高接地电阻时出现拒动,其允许过渡电阻能力一般不超过 $250\ \Omega^{[7]}$,采取半补偿后,动作特性有所改善,但效果并不明显。

b. 对于贝瑞隆差动判据,其两侧的故障相差流和半补偿差流差别不大;但其非故障相差流在某些情况下比半补偿法的差流大很多,最大值出现在空载状态下 K_1 处单相金属性短路时,为 $1.181\ \text{kA}$,按大于最大不平衡差流整定,取可靠系数为 1.5 ,则定值应取 $I_0 = 1.5 \times 1.181\ \text{kA} = 1.772\ \text{kA}$ 。当电势角为 45° , K_2 点经 $200\ \Omega$ 电阻 A 相单相接地短路时,贝瑞隆差动的故障相差流最大值为 $1.7567\ \text{kA}$,稳态值为 $1.748\ \text{kA}$,即使按最大值考虑,其灵敏度 $K_1 = 1.7567/1.772 = 0.991 < 1$ 。可见贝瑞隆差动的允许过渡电阻能力小于 $200\ \Omega$,不能满足 $500\ \text{kV}$ 线路允许过渡电阻能力 $300\ \Omega$ 的要求。

c. 对于贝瑞隆差动实用判据,故障相差流约为贝瑞隆差动差流的 2 倍;非故障相最大不平衡差流也出现在空载状态下 j 侧出口处单相金属性短路时,其值达 $1.1461\ \text{kA}$ 。仿真结果表明,本判据外部故障及故障切除时、空载合闸时的最大可能不平衡差流出现在 j 侧空载合闸时,其值为 $0.208\ \text{kA}$ 。取可靠系数 2,则定值应取 $I_0 = 2 \times 0.208\ \text{kA} = 0.416\ \text{kA}$ 。当发生区内单相短路故障时,非故障相的门槛通过故障相差流自动抬高,可以安全地躲过最大不平衡差流。当电势角为 45° , K_2 点经 $500\ \Omega$ 电阻 A 相单相接地短路时, A 相差流稳态值为 $1.499\ \text{kA}$, A 相制动力 $I_{dz} = 0.1 \times \max\{I_{cd}^b, I_{cd}^c\} + I_0 = 0.42\ \text{kA}$,则灵敏度 $K_1 = 1.499/0.42 = 3.569$ 。可见贝瑞隆差动实用判据区内故障时灵敏度比半补偿相量差动和贝瑞隆差动大大提高,其允许过渡电阻能力大大增强,对 $500\ \text{kV}$ 线路允许过渡电阻能力超过 $500\ \Omega$ 。

图 5 所示的图形曲线能对上述结论给出更加直观的说明。

4.2.3 空载合闸和空合于故障线路

空载合闸到正常线路时,半补偿相量差动不能完全补偿暂态电容电流, I_0 的整定必须超过补偿后三相中最大值,从图 6 可见,在合闸后的第 2,3 个周期起才能对电容电流进行较好的补偿。贝瑞隆差动判据和贝瑞隆差动实用判据的差流都很小,这是因为两者都能对暂态和稳态电容电流进行很好的补偿。

空合于故障线路时各差动判据均能可靠动作。

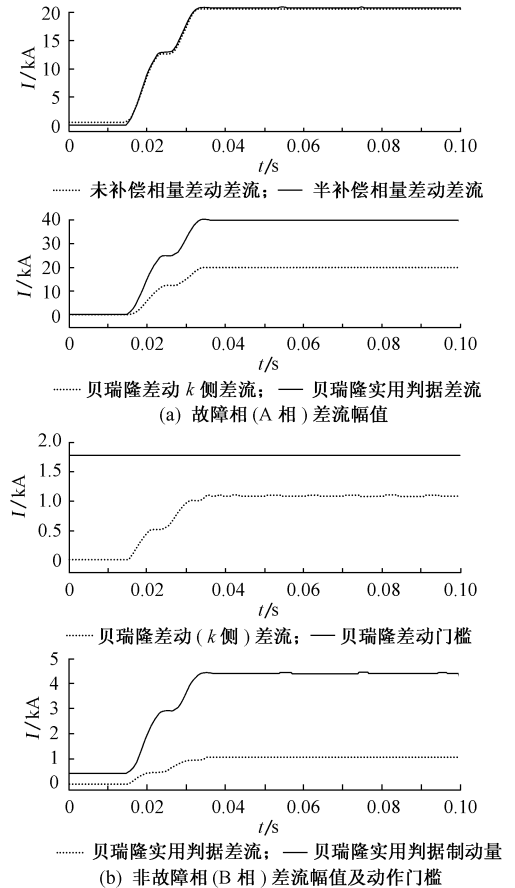


图 5 区内 K_1 点 A 相接地短路时各判据电气量
Fig. 5 Electric quantities of four kinds of criteria for internal single phase A to ground fault at K_1

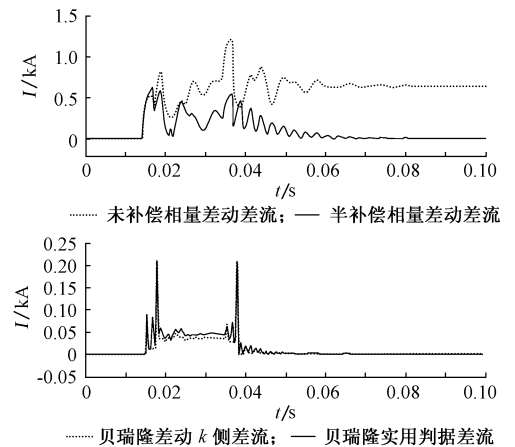


图 6 j 侧空载合闸时 B 相各判据的差流幅值
Fig. 6 Phase B differential current amplitude of four kinds of criteria switching on from j side without load

4.2.4 单电源系统

单电源系统时考虑了区外故障,因为区内故障时空投于线路故障情况类似。仿真表明,单电源故障时由于线路电压下降较多,半补偿相量差动补

偿的电容电流较小,在故障后第 1 个周期补偿效果不是很理想,在故障后第 2 个周期,电容电流能得到较好的补偿。贝瑞隆差动判据和贝瑞隆差动实用判据的差流都很小,能可靠不动作。

5 结论

a. 本文推导出了基于贝瑞隆模型的差动判据在三相耦合线路区内故障时的故障相差流和非故障相差流表达式。

b. 当发生区内故障时,基于贝瑞隆模型的差动判据^[2]在不需选相跳闸时具有很高的灵敏度,但在需选相跳闸时灵敏度不足。

c. 本文提出的基于贝瑞隆模型的实用差动判据在区外故障时差流很小,区内故障时故障相动作量是贝瑞隆差动判据的 2 倍,因此判据在区外故障时具有很高的可靠性,区内故障时具有很高的灵敏度。同时,通过自适应的制动量来灵活躲过区内单相接地短路时非故障相不平衡差流,消除了贝瑞隆差动判据在区内经高阻接地故障时灵敏度不足的缺点。仿真表明该判据在 500 kV 线路允许过渡电阻能力超过 500 Ω 。

d. 基于贝瑞隆模型的差动判据的非故障相最大不平衡差流出现在系统阻抗较小侧线路出口处金属性接地短路时,且系统阻抗越小、线路越长时其值越大。

参考文献

- 1 高中德(Gao Zhongde). 超高压电网继电保护专题分析(The Dissertation Analysis of EHV Transmission Line Protective Relaying). 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and

Electric Power Press), 1990

- 2 郭征,贺家李(Guo Zheng, He Jiali). 输电线纵联差动保护的新原理(New Principle of Pilot Relay Protection of Transmission Lines). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2004, 28(11)
- 3 葛耀中(Ge Yaozhong). 新型继电保护与故障测距原理与技术(New Types of Protective Relaying and Fault Location—Their Theory and Techniques). 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 1996
- 4 吴维韩,张芳榴(Wu Weihang, Zhang Fangliu). 电力系统过电压数值计算(Numerical Calculation of Over Voltages in Power Systems). 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1989
- 5 Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论(The Calculation Theory of Power System Electromagnetism Transient State). 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1991
- 6 李岩,陈德树,张哲,等(Li Yan, Chen Deshu, Zhang Zhe, et al). 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(The Influence of EHV Long Transmission Line's Capacitance Current on the Differential Protection and Its Simulation Analysis of the Compensation Scheme). 继电器(Relay), 2001, 29(6): 6~9
- 7 王绪昭,伍叶凯,杨奇逊(Wang Xuzhao, Wu Yekai, Yang Qixun). 一种适应于双端系统微机微波电流差动保护的跳闸判据(A Trip Criterion Suitable for Microcomputer-based Microwave Current Differential Protection in Double Terminals System). 继电器(Relay), 1991, 19(4): 2~8

郑玉平(1964—),男,博士研究生,教授级高级工程师,从事电力系统继电保护的研究、开发工作。E-mail: zhengyp@nari-relays.com

吴通华(1977—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。E-mail: th_wu@nari-relays.com

丁琰(1976—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

APPLIED CRITERION OF CURRENT DIFFERENTIAL PROTECTION BASED ON BERGERON MODEL

Zheng Yuping^{1,2}, Wu Tonghua², Ding Yan^{2,3}, Chen Yunping¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

(3. South East University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A criterion of current differential protection of EHV transmission lines based on Bergeron model is proposed in Literature. This paper educes the criterion's differential current expressions of fault—phase and nonfaulted-phase when internal fault occurs in three phase coupling lines. A new applied criterion of current differential protection based on Bergeron model is proposed, which can compensate steady capacitance current and transient capacitance current perfectly to external faults. Further more, it has high sensibility to internal faults that means it can response sensibly the earth fault via a high resistance. Simulation results show that the analysis is correct and the new criterion is reliable.

Key words: line protection; current differential protection; Bergeron model; capacitive current compensation