

轨迹式行波保护数字仿真及动作特性分析

山东工业大学 陈青 江世芳

摘要

本文对轨迹式行波保护的方向继电器进行了数字仿真。并利用电力系统电磁暂态计算的贝瑞隆法对山东邹—潍500kV输电线路一次系统在各种故障状况下的暂态过程进行了仿真计算。利用仿真计算的结果分析了轨迹式方向继电器(LR—91型)在各种简单故障下的动作轨迹特性,分析了弧光电阻对动作轨迹的影响。本文对继电器在各种转换性故障过程中的动作特性进行了仿真分析,对其是否适用于串补电容线路进行了仿真计算。指出了该继电器在某些方面所存在的缺陷。

引言

超高压输电线路的迅速发展,对电力系统继电保护提出了更高的要求,致使常规保护已不能满足超高速动作的需要。近几年来,具有超高速功能的各类行波保护得到了较大的发展。轨迹式行波保护是一种原理上比较新颖的方向保护,它利用电流电压的暂态变化特征(即 $\Delta u_A - \Delta u$ 平面上的暂态轨迹)⁽¹⁾来检测故障的方向,具有许多优点。鉴于国内已大量引进了该套装置(LR—91型),为更好地掌握其原理,提高系统运行的安全可靠,本文对其进行了数字仿真及分析,目的在于探讨其动作轨迹的变化规律,为生产运行提供一定的理论依据。

仿真数字模型

首先建立系统暂态,继电器测量回路等各个部分的数字模型,分别编制其程序。通过数据文件将其按先后次序连接起来,形成所需要的分析信号。其总体框图如图1所示。

1. 电力系统暂态计算的数学模型

本文利用电磁暂态计算的贝瑞隆法建立各类系统暂态过程的数学模型。该法以单相系统为基础。可利用模变换理论($\alpha, \beta, 0$ 变换矩阵)将相互耦合的三相系统变换为三

参考文献

- 1.《单片机相差高频保护的研究》,宋英义 华北电力学院硕士论文
- 2.《超高压输电线路故障分析与继电保护》贺家李 葛耀中
- 3.《超高压电网继电保护的特殊问题分析》,华北电力学院

个独立的系统，对每一独立系统分别求解。建立网络中各元件的诺顿等值模型，利用节点电压法，从一已知的初始状态开始，递推计算出整个网络的解。

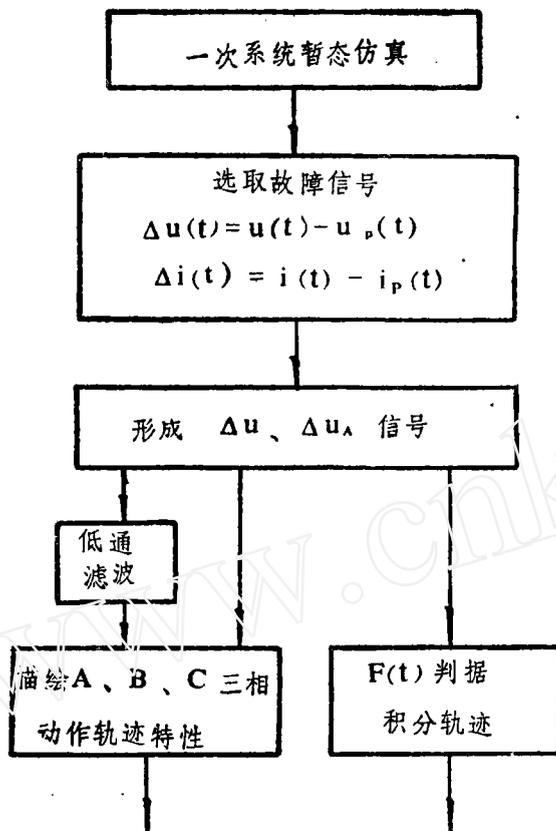
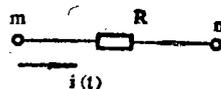


图1 总体仿真框图

各元件数学模型:

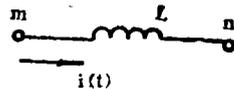
电阻R,

$$i(t) = [u_m(t) - u_n(t)] / R$$



电感L,

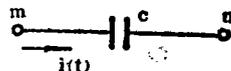
$$i(t) = \frac{\Delta t}{2L} \cdot [u_m(t) - u_n(t)] + I(t - \Delta t)$$



式中 $I(t - \Delta t) = i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [u_m(t - \Delta t) - u_n(t - \Delta t)]$

电容C,

$$i(t) = \frac{2c}{\Delta t} \cdot [u_m(t) - u_n(t)] + I(t - \Delta t)$$



式中 $I(t - \Delta t) = -\frac{2c}{\Delta t} \cdot [u_m(t - \Delta t) - u_n(t - \Delta t)] - i(t - \Delta t)$

传输线L,

考虑线路分布参数建立其数学模型，将线路分布电阻处理成集中电阻的形式⁽⁴⁾，即将全线损耗的四分之一分别串入线路的两端，二分之一串入线路中点，如图2所示。其中R为线路总电阻。

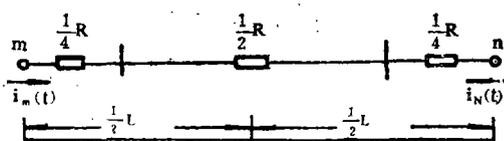


图2 输电线路mn等效图

由无损线行波方程

$$\begin{cases} -\frac{2u}{2x} = L' \frac{2i}{2t} \\ -\frac{2i}{2x} = c' \frac{2u}{2t} \end{cases}$$

式中 L' 、 c' 为单位长度电感电容。

采用梯形法数值积分，并考虑各集中电阻连接点上的边界条件，可导出线路数字模型为：

$$i_m(t) = u_m(t) / Z_2 + I_m(t - \tau)$$

$$i_n(t) = u_n(t) / Z_2 + I_n(t - \tau)$$

式中

$$I_m(t - \tau) = -\frac{1 + H_2}{2Z_2} \cdot u_n(t - \tau) - \frac{1 - H_2}{2Z_2} \cdot u_m(t - \tau) - \frac{H_2(1 + H_2)}{2} \cdot i_n(t - \tau) - \frac{(1 - H_2) \cdot H_2}{2} \cdot i_m(t - \tau)$$

$$I_n(t - \tau) = -\frac{1 + H_2}{2Z_2} \cdot u_m(t - \tau) - \frac{1 - H_2}{2Z_2} \cdot u_n(t - \tau) - \frac{H_2(1 + H_2)}{2} \cdot i_m(t - \tau) - \frac{H_2(1 - H_2)}{2} \cdot i_n(t - \tau)$$

其中 $Z_2 = Z + R/4$, $H_2 = (Z - R/4) / (Z + R/4)$

Z 为线路阻抗， τ 为线路时间常数。

2. 测量信号 Δu_A 仿真

将带有负出电阻的电流变换器图3(a)等效为如图3(b)所示的网络，所有参数归算至一次侧。其等效网络微分方程组为：

$$\begin{cases} L \cdot \frac{di_1(t)}{dt} = \Delta u_A(t) \\ R \cdot i_2(t) = \Delta u_A(t) \\ i_1(t) + i_2(t) = \Delta i(t), \end{cases}$$

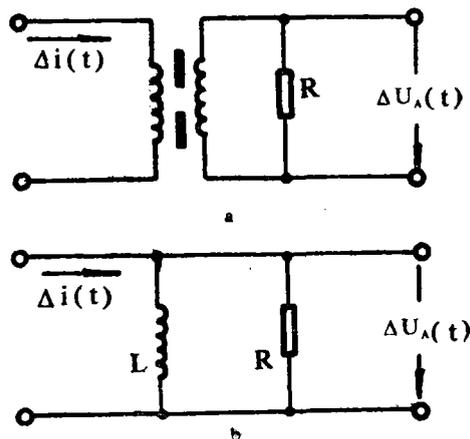


图3 电流变换器及等效网络 11

由前向欧拉法, 可导出其数值解公式为:

$$\begin{cases} i_1(n+1) = \frac{h}{L} \cdot R \cdot \Delta i(n) + (1 - \frac{h}{L} \cdot R) \cdot i_1(n) \\ \Delta u_A(n+1) = R \cdot [\Delta i(n+1) - i_1(n+1)] \end{cases}$$

其中 $n = 0, 1, 2, \dots, N; h = \Delta t, T = N \cdot h。$

$$\Delta i(0) = i_1(0) = 0$$

网络等效阻抗:

$$|Z_R| = R / (\sqrt{1 + (R/\omega L)^2}),$$

$$\varphi_R = \frac{\pi}{2} - \arctg(R/\omega L)。$$

阻抗幅值与继电器背后系统阻抗相匹配, 其幅角 φ_R 选为 70° [1]。

3. 低通滤波器仿真

本文采用二阶巴特沃思模拟低通滤波器, 利用时域暂态伴随模型分析方法建立较小时间间隔内的R、L、C元件的数值解模型, 利用节点电压法求得整个网络的离散的数值时域响应。

电容C数值模型:

$$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}$$

在微小时间间隔(t_n, t_{n+1})内, 上式可近似为:

$$i_C(t_{n+1}) = \frac{C}{h} \cdot [u_C(t_{n+1}) - u_C(t_n)]$$

其中 $h = t_{n+1} - t_n。$

同理可得电感L的数值模型为:

$$i_L(t_{n+1}) = \frac{h}{L} \cdot u_L(t_{n+1}) + i_L(t_n)$$

改变滤波器中R、L、C参数, 可得到不同的低通截止频率 $f_c。$

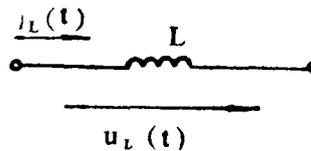
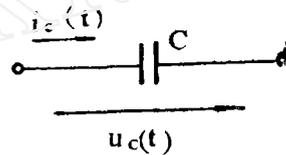
4. 辅助判据F(t)仿真

由判据公式 [1]:

$$\begin{aligned} F(t) = & K_i \cdot \int_0^t s_{gn} [\Delta u(t)] \cdot \Delta u_A(t) \cdot dt \\ & + K_u \cdot \int_0^t s_{gn} [\Delta u_A(t)] \cdot \Delta u(t) \cdot dt \quad (1) \end{aligned}$$

并施以数值积分的梯形法则, 可得:

$$\begin{aligned} F(t) = & K_i \cdot \frac{h}{2} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \cdot \{ s_{gn} [\Delta u(h \cdot i)] \cdot \Delta u_A(h \cdot i) \\ & + s_{gn} [\Delta u(h \cdot (i+1))] \cdot \Delta u_A(h \cdot (i+1)) \} \\ & + K_u \cdot \frac{h}{2} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \cdot \{ s_{gn} [\Delta u_A(h \cdot i)] \cdot \Delta u(h \cdot i) \\ & + s_{gn} [\Delta u_A(h \cdot (i+1))] \cdot \Delta u(h \cdot (i+1)) \} \end{aligned}$$



式中 K_i , K_u 为积分系数, $s_{i,u}(x)$ 为符号函数, $h = \Delta t = T/N$ 。

简单故障条件下LR-91方向继电器动作轨迹特性

山东邹—潍500kV输电系统如图4所示。本文仿真计算了各种正反向简单故障条件下潍坊侧继电器的动作轨迹特性。

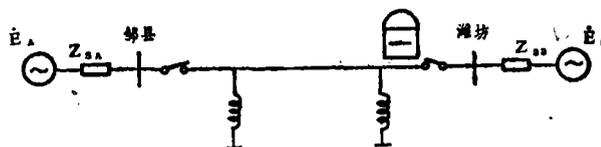
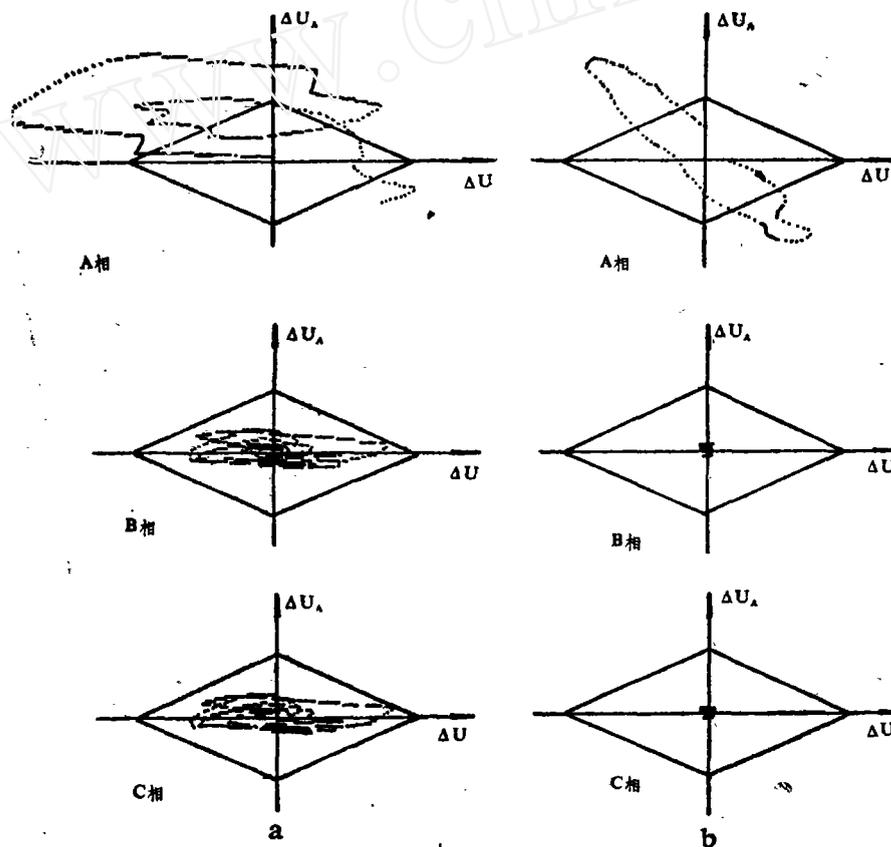


图4 邹—潍500kV输电线路系统

1. 正向故障时暂态轨迹特性

由继电器基本原理分析, 可知短路时故障轨迹起始于第II或第IV象限, 按顺时针方向沿椭圆轨迹旋转⁽¹⁾。仿真计算表明, 故障轨迹首先从原点跃变至某一点然后沿一椭圆轨迹旋转。故障引起的电压电流突变使得暂态轨迹在极短的时间内穿越动作边界, 继电器能够根据其首次穿越边界的点所处的象限来确定故障的方向, 如图5(b)所示, 故障量中所包含的高频行波分量将使



(a) 电压最大值时刻短路, (b) 电压零值时刻短路

图5 线路中点A相接地短路三相暂态轨迹特性

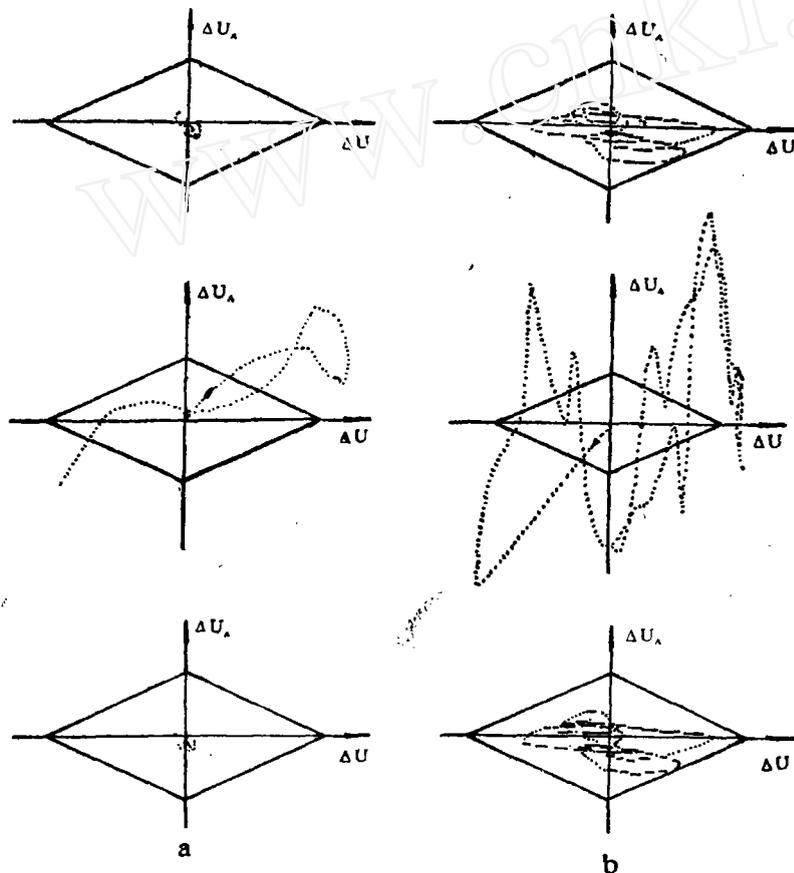
故障轨迹不再是一个光滑的椭圆，而在其上迭加了许多波动。这种影响有时会使得轨迹初始部分非常接近 Δu 轴，给继电器判断故障方向带来困难，如图5（a）所示。同时，高频分量的存在有可能使方向元件产生暂态超越。

一般来说，单相接地短路时非故障相故障量很小，非故障相继电器不动作，如图5（b）所示。但当故障量中含有丰富的高频行波分量时，各相之间的相互耦和使得这些高频分量耦和到非故障相，使非故障相测量信号增大，故障轨迹偏离了原点附近，有穿越动作边界的趋势，如图5（a）所示。高频分量愈严重，这种趋势愈明显，如果暂态轨迹在II或IV象限穿越边界，将会造成继电器的误选相。

对于多相故障，故障相继电器均会在很短的时间内检测到故障，经逻辑配合使保护跳三相。

2. 反向故障时暂态轨迹特性

类似于正向故障的分析，反向故障时暂态轨迹起始于第I或第III象限，在极短的时间内穿越动作边界，按逆时针方向沿一椭圆轨迹旋转，继电器能够根据其首次穿越边界的点所处的象限确定故障的方向，而非故障相暂态轨迹很小，如图6（a）所示。同



(a) 电压过零点时短路 (b) 电压最大值时短路

图6 反向出口B相接地短路三相暂态轨迹特性

理, 高频行波分量的存在亦将使反相暂态椭圆轨迹产生畸变, 同时, 各相之间的相互耦合将使这些高频分量耦合到非故障相, 使非故障相暂态轨迹偏离了起点附近, 如图 6 (b) 所示。高频分量有可能使暂态轨迹在 II 或 IV 象限穿越边界, 造成继电器反向误动。

由于反向故障时, 继电器感受故障量的大小与对侧系统阻抗有关, 而继电器内模拟阻抗 $|Z_R|$ 的整定是与其背后系统阻抗相匹配, 此时灵敏度最高^[9]。因此, 当两侧系统阻抗相差较大时, 将对继电器检测反向故障的灵敏度有所影响。

3. 短路时刻对故障轨迹的影响

当故障位于正方向时, 暂态轨迹具体地起始于第 II 象限还是第 IV 象限, 取决于短路那一时刻短路点电压值的正、负。若 $\Delta u > 0$, 则 $\Delta u_A < 0$, 故障轨迹起始于第 IV 象限; 反之, 起始于第 II 象限。同理对于反向故障条件下故障轨迹起始于第 I 象限或第 III 象限可得出类似的结论。图 7 示出了不同短路时刻的暂态轨迹特性。

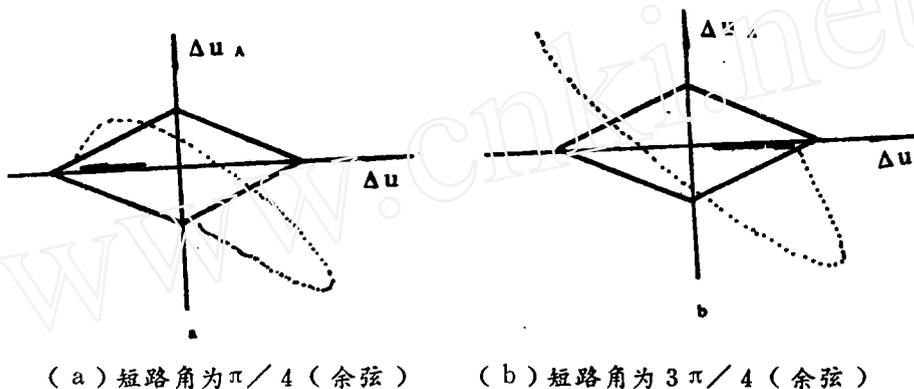


图 7 线路出口 A 相接地短路 A 相暂态轨迹特性

当故障发生于电压过零点时刻时, 突变电压为零, 此时产生的高频行波分量很小, 故障轨迹为一椭圆且缓缓穿越动作边界。若故障发生于电压最大值时刻, 突变电压最大, 产生的高频行波分量很大, 此时故障轨迹不再是一个椭圆, 且可在极短的时间内穿越边界。如图 5、图 6 所示。

因此, 短路时刻不仅决定了暂态轨迹起始的象限, 且影响继电器检测故障的时间。而且不同的短路时刻将使得高频分量影响暂态轨迹的结果不同。

4. 低通滤波对暂态轨迹的影响

采用低通滤波, 可以降低高频分量的影响, 使暂态轨迹趋于平滑、稳定, 易于继电器检测; 同时可以消除高频分量对非故障相暂态轨迹的影响, 提高继电器动作的可靠性, 防止方向元件的暂态超越。但滤波亦增加了继电器检测故障的时间。图 8 示出了不同低通截止频率 f_c 下的暂态轨迹特性。 f_c 愈

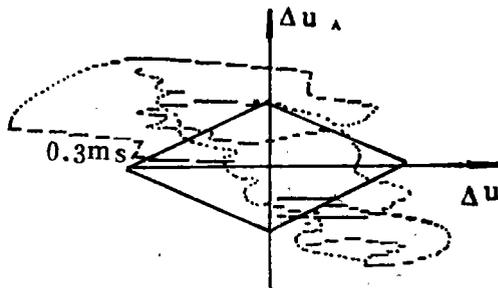


图 8 (a) 不滤波

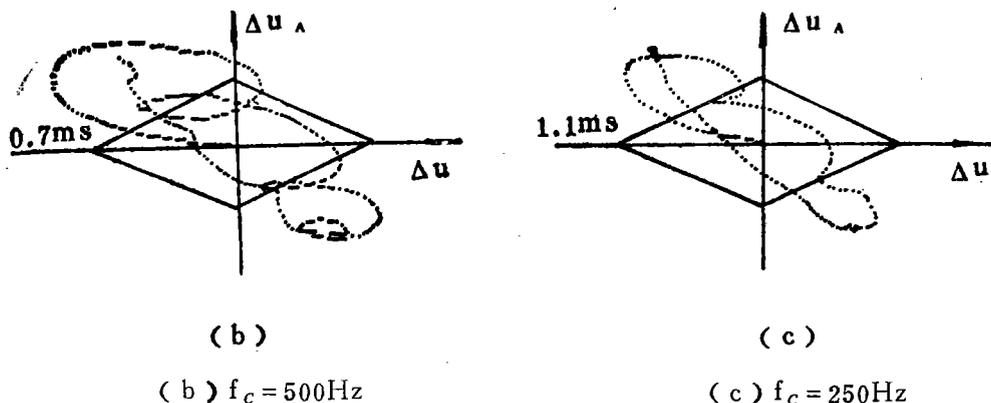


图8 线路中点A相接地短路发生于电压最大值时刻A相暂态轨迹

低，轨迹特性愈好，继电器可靠性愈高，但动作时间愈长。因此，低通滤波器的选择应全面考虑各种因素的影响，在保证继电器动作可靠性的前提下使动作速度尽可能高。

在LR-91方向继电器中设置了一辅助判据 $F(t)$ ，如式(1)所示，对于正向故障 $F(t) < 0$ ，反之 $F(t) > 0$ 。由于该判据的数学意义反映曲线下面积的概念，高频分量的影响仅仅使 $F(t)$ 轨迹产生波动，如图9所示，积分面积的相互抵消可降低高频分量带来的不良影响，因此，只要合理地选择 $F(t)$ 动作阈值 I, K ，将其与 $\Delta u - \Delta u_A$ 判据结合起来与门输出，亦可防止由高频分量造成的继电器不正确动作。

5. 过渡电阻 R_g 对暂态轨迹的影响

过渡电阻 R_g 的存在，降低了故障电流电压的幅值，使故障轨迹缩小。若 R_g 足够大，将有可能使故障轨迹完全缩于动作边界以内，如图10所示，致使继电器不能检测到故障。

一般情况下， R_g 约小于 100Ω ，对暂态轨迹影响不是很大。但对于某些特殊情况，有时 R_g 会很大。仿真计算表明，当 R_g 大于 300Ω 时，继电器有拒动的可能性。继电器所能反映的最大过渡电阻 R_{gmax} 受几方面因素的影响，动作边界整定的大小，短路点的不同，以及不同的短路时刻等，都会造成 R_{gmax} 的不同。

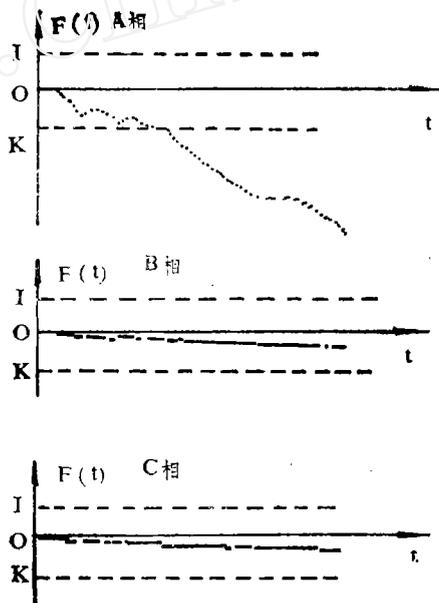


图9 图5(a)中所示故障的三相 $F(t)$ 暂态轨迹特性

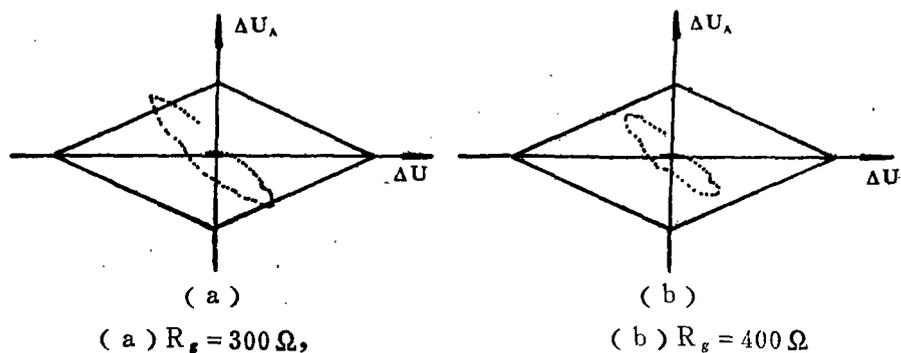
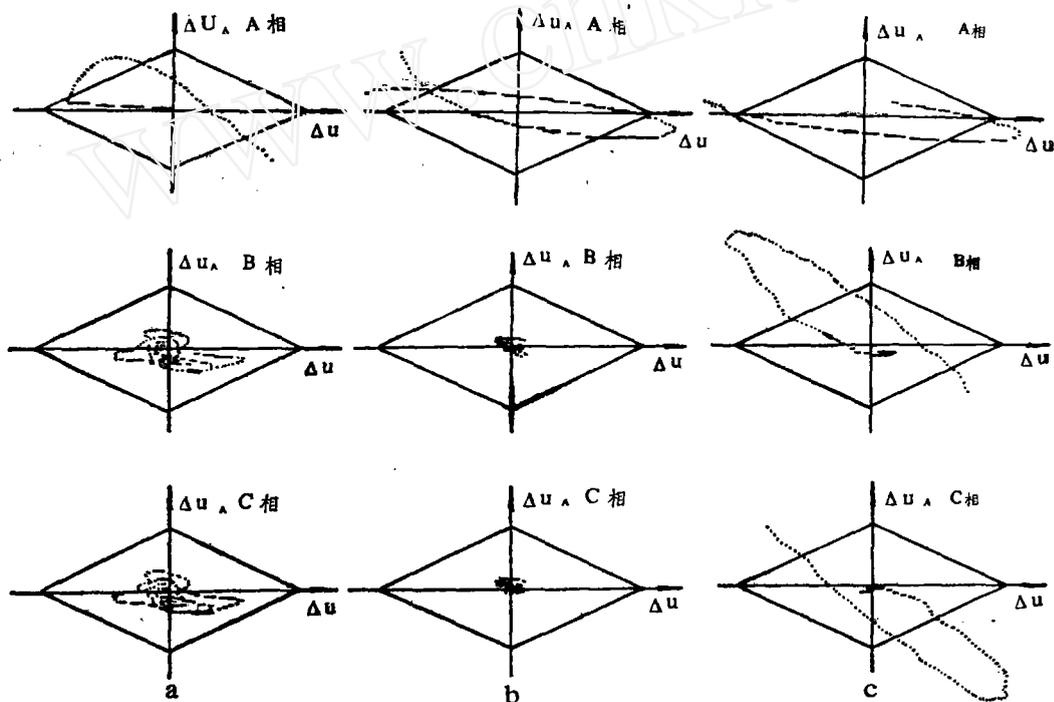


图10 线路出口A相接地短路, A相暂态轨迹

转换性故障条件下LR-91方向继电器动作轨迹特性

本文对多种区内发展性故障进行了仿真计算, 结果表明继电器一般能正确地动作, 受故障转换时间的影响较小。

如图11所示, 当发生区内单相接地短路时, 故障柜继电器可在极短的时间内检测出



(a) A相接地短路到两侧开关跳开之前三相轨迹特性

(b) 两侧开关跳开到BC相短路之前三相轨迹特性

(c) BC相短路三相轨迹特性

图11 线路出口A相接地短路 $R_g = 15 \Omega$ 。经20ms, A相两侧线路开关跳开再经约20ms发展为BC两相短路A、B、C三相暂态轨迹特性

故障,从而切除故障相(图11(a))。在故障相切除及下次故障发生前这段非全相运行时间内,故障相暂态轨迹呈衰减振荡的变化趋势,非故障相轨迹则由于故障相的切除降低了由于时间相互耦和而产生的高频分量的影响,从而使其逐步衰减而趋于原点,保证非故障相继电器可靠不动作,且为下一次起动具备了前提条件(只有轨迹回到起始点一定范围内,继电器才能第二次起动检测故障),如图11(b)所示。当发展为第二次故障时,该故障相继电器立刻起动(图11(c)),借助与重合闸的逻辑配合跳三相。

对于区外转换为区内这种故障类型,故障轨迹的变化较复杂,继电器能否正确动作与故障转换时间、网络结构以及故障类型等因素有关,还需做进一步的分析、计算。

线路串补电容对继电器动作特性的影响

本文考虑一种通常的串补形式⁽⁶⁾,串补电容位于线路中间,串补度为50%。仿真计算表明,当系统发生短路时,仅有故障相串补电容放电间隙被击穿,其对暂态轨迹的影响较小,且串补电容本身对非故障相暂态轨迹的影响亦较小。因此,该方向行波保护适用串补电容线路。

结 论

在大量分析计算的基础上可看出,该方向继电器具有极快的故障检测时间(小于1ms),灵敏度高,不受直流分量的影响,动作区稳定不受系统负荷变化的影响等优点。该继电器不受线路非全相状态的影响,不受线路串补电容的影响,对区内发展性故障能正确地动作。但影响其动作轨迹的因素较多,短路时刻的不同,短路点及过渡电阻的变化,以及系统运行方式的改变等,都将使暂态轨迹的形状及大小发生变化。

该方向保护适用于网络结构比较均衡的系统。对于网络结构比较复杂,系统运行方式变化较大的系统,在该装置实际投运以前,应进行全面的数字仿真。对于高频分量严重的系统(如平行双回线系统),应考察其继电器动作的可靠性(包括故障相及非故障相)。这对确保系统安全运行有着积极的意义。

参考文献

- 1.“轨迹式行波保护动作特性分析” 江世芳 陈青
- 2.M.Vitins,“A Fundamental Concept For High speed Relaying”,IEEE PAS-100, N0.1, January 1981.
- 3.F.Engler,“Transient signals and their processing in an ultra-high-speed directional relay for EHV/UHV transmission line protection”,IEEE PAS-104, N0, 6, June 1985.
- 4.H.W.Dommel,“Computation of electromagnetic transients”,Proc.of.IEEE, vol.62, N0.7, July 1974.
- 5.ASEA BROWN BOVERI,“Ultra-High-Speed Diectional Relay, TYPE LR91”.
- 6.R.K.Aggarwal,“Computer modelling of series com Pensateel EHV transmission systems”. IEE Proc. Vol 131 Pt.C No.5 Sep.1984