

卡尔曼滤波技术在距离保护上的应用

山东工业大学 于九祥 汤懿红

摘要

本文论述了以卡尔曼滤波理论为基础的计算机距离保护方案,并在500kV、376.4kM的山东邹县—潍坊高压输电线上做了大量仿真研究。结果表明,该方案对模型参数的准确性不敏感,滤波精度和收敛速度均优于一般的算法,故障分类可在9ms之内完成,故障准确定位可在20ms内完成。

一 微机距离保护系统

微机距离保护系统其硬件结构是在通用的微机系统基础上,加上专用的输入、输出系统构成的。与常规保护继电器不同,微机保护是以软件来实现保护功能。软件的核心由三部份组成,即故障检测、故障分类及故障范围确定和故障点定位。应用卡尔曼滤波技术的距离保护的软件安排由图1表示。故障检测相当于一个起动元件,在输电线路发生故障时,短时开放主程序执行距离保护功能,其余时间cpu在DMA中断管理和检查起动元件是否动作的环内踏步,并设计一套予置故障信息数据来定时自动检测距离保护系统是否完好。下面从功能上分别叙述距离保护各组成部份的实施方案。

二 故障检测

它的功能是在线实时监测被保护输电线是否正常运行。七个模拟信号量,分别为三相电压、三相电流及从电流和回路取得的零序电流,通过采样系统,A/D转换,由DMA直接存取通道送入微机RAM指定单元。故障检测是以出现电流突变量为依据,判别式为:

$$i_{a,b,c}(k) - i_{a,b,c}(k-N) > 0.05p.u \quad (1)$$

式中 $j_e(a, b, c)N$ 为每周采样数。

由此判别式检测新采样值是否为故障信息,以决定程序是否进入下一步。在某些运行方式下,利用(1)式检测故障,有时灵敏度不足,可考虑采用电压突变量或二者同时采

用的检测方法。故障检测时间与故障形式、故障点的位置及采样率等因素有关。当采样频率大于1.6kHz（即每周32个采样点）时，大多数情况下，故障发生之后1~2个采样值即可检测出输电线的故障。

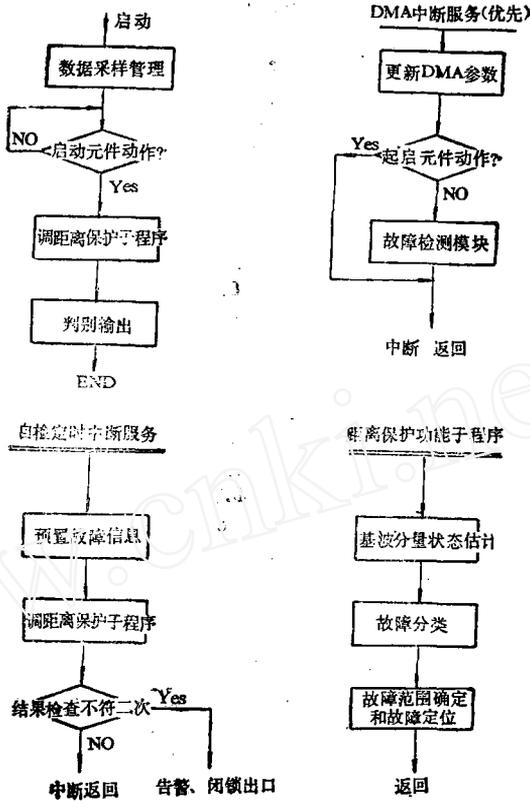


图1 微机距离保护软件接排框图

三 故障信息基波分量的最佳状态估计

当任何一相电流由(1)式判别为故障状态时，程序进入应用四个三阶和三个二阶卡尔曼滤波器模型，最佳估计出输入到保护装置中电流和电压的基波分量。这一部份内容已在《继电器》杂志1990年第一期里有介绍，这里不再赘述。

四 故障分类

本文采用故障补偿电流比值判别法进行故障分类。故障补偿电流为，卡尔曼滤波器得到的故障后电流状态值减去故障前的电流状态值。选择三个故障补偿电流中最大的一个作为比较的基准值，用 $I_{p,max}$ 表示，再用补偿电流 I_j ($j \in a, b, c$) 与 $I_{p,max}$ 求比

值，导出故障相和非故障相的分类识别判別式：

$$\frac{I_j}{I_{p \cdot max}} \geq k_1 \quad \text{判別为故障相} \quad (2)$$

$$\frac{I_j}{I_{p \cdot max}} \leq k_2 \quad \text{判別为非故障相} \quad (3)$$

在邹一滩线上的全长20%~80%处，通过各种不同类型的故障，对 k_1 和 k_2 的取值范围进行了大量的仿真运算和统计，得出 k_1 的范围为0.8~1.0， k_2 的范围为0.01~0.43。我们取 k_1 的门槛值为0.8， k_2 的门槛值为0.5。故障分类时间最长为8.125ms。下面给出不同短路情况下的故障分类图。

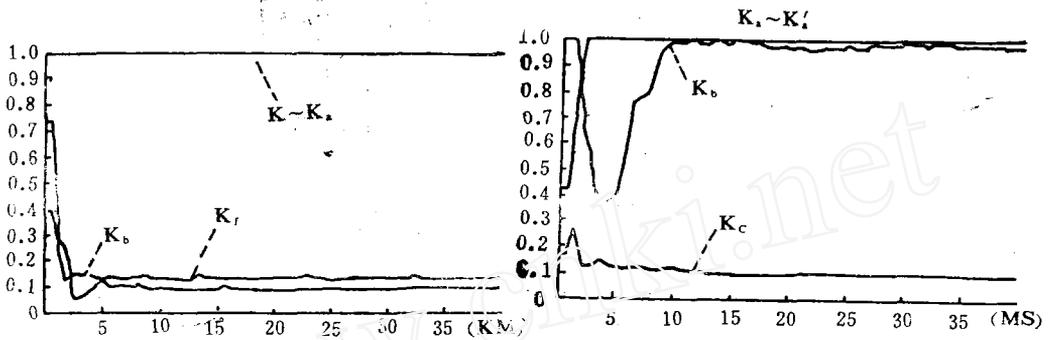


图2 单相短路故障分类图

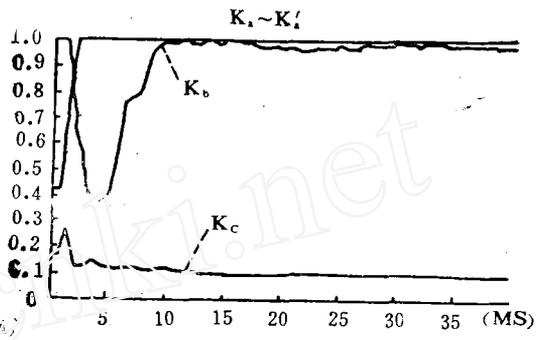


图3 A、B两相接地短路故障分类图

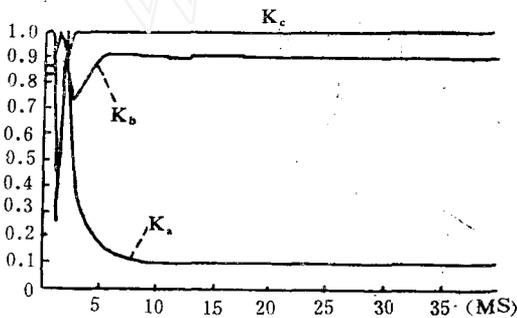


图4 B、C相间短路故障分类图

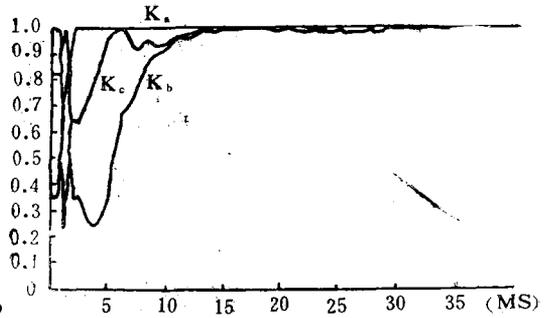


图5 三相短路故障分类图

五 故障阻抗计算及测距

由卡尔曼滤波器可得到精确的基波状态估计量，根据故障分类的结果，选择合适的电压——电流时，对单相故障，采用 $\frac{U_Y}{I_Y + k \cdot 3I_0}$ 接线；对相间故障，采用 $\frac{U_{\Delta}}{I_{\Delta}}$ 接线，计算故障视在阻抗和故障距离。故障视在阻抗可简单地用所选故障相电压、电流的比值来表示。

$$Z_{\alpha\beta\gamma} = R_{\alpha\beta\gamma} + jx_{\alpha\beta\gamma} = \frac{U_{\alpha,1} + jU_{\alpha,2}}{I_{\alpha,1} + jI_{\alpha,2}} \quad (4)$$

为了补偿故障点阻抗 R_f 的影响,需要考虑馈入故障点的电流($I_d + jI_q$)。单相故障馈入电流与零序电流成正比;相间故障馈入电流与故障分类中的补偿电流之差成正比,如表1所示。

表1

故障	选择电压 V_s	选择电流 I_s	馈入故障点电流
A—G	U_a	$I_a + K \cdot 3I_0$	I_0
B—G	U_b	$I_b + K \cdot 3I_0$	I_0
C—G	U_c	$I_c + K \cdot 3I_0$	I_0
AB或AB—G	U_{ab}	$I_a - I_b$	$I_{af} - I_{bf}$
BC或BC—G	U_{bc}	$I_b - I_c$	$I_{bf} - I_{cf}$
CA或CA—G	U_{ca}	$I_c - I_a$	$I_{cf} - I_{af}$
三相故障		与相间故障同	

忽略馈入故障点电流间的相位差,则视在阻抗修正为:

$$Z_{\alpha\beta\gamma} = R_{\alpha\beta\gamma} + jx_{\alpha\beta\gamma} = (R_1 + jx_1)L + \frac{R_f k_f (I_d + jI_q)}{I_{\alpha,1} + jI_{\alpha,2}} \quad (5)$$

按照实部、虚部重新整理得:

$$\left| \frac{R_{\alpha\beta\gamma}}{X_{\alpha\beta\gamma}} \right| = \left| \frac{R_1}{X_1} \frac{(I_d \cdot I_{\alpha,1} + I_q \cdot I_{\alpha,2}) / I_{\alpha,m}^2}{(-I_d \cdot I_{\alpha,2} + I_q \cdot I_{\alpha,1}) / I_{\alpha,m}^2} \right| \cdot \left| \frac{L}{k_f \cdot R_f} \right| \quad (6)$$

式中:

$$I_{\alpha,m}^2 = I_{\alpha,1}^2 + I_{\alpha,2}^2$$

对于单相接地故障, $I_d + jI_q = I_{01} + jI_{02}$;

对于相间故障, $I_d + jI_q$ 为故障补偿电流之差。

记:

$$A = (I_d \cdot I_{\alpha,1} + I_q \cdot I_{\alpha,2}) / I_{\alpha,m}^2$$

$$B = (-I_d \cdot I_{\alpha,2} + I_q \cdot I_{\alpha,1}) / I_{\alpha,m}^2$$

则故障点距离 L 的计算公式为:

$$L = \frac{B \cdot R_{\alpha\beta\gamma} - A \cdot X_{\alpha\beta\gamma}}{B \cdot R_1 - A \cdot X_1} \quad (7)$$

本算法得到的故障点距离 L ,在很大程度上减少了 R_f 对故障测距的影响。

本文对各种不同故障类型和各不同点的故障进行了测距计算。故障的准确定位时间为18ms,测距误差在5%以内,且 R_f 对测距结果影响不大。下面给出几种故障的测距结果图。

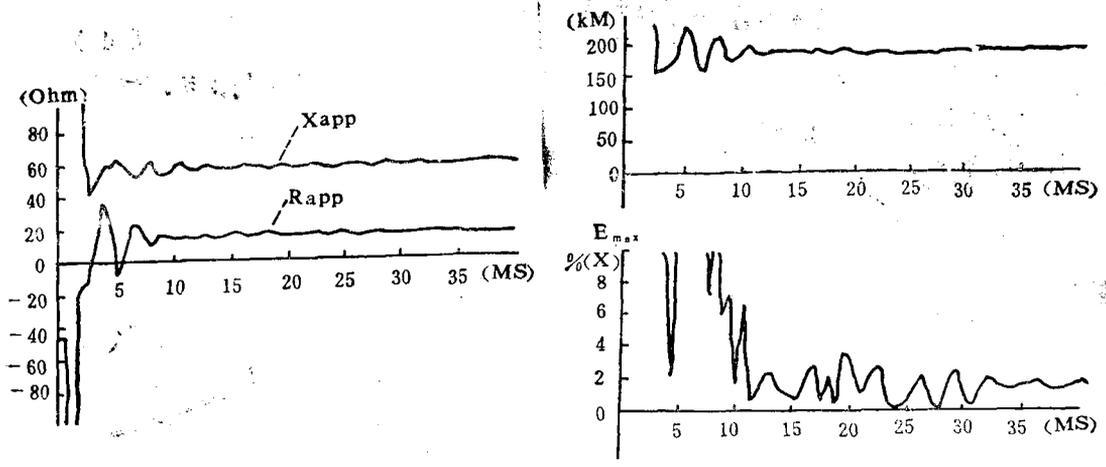


图6 全线50%处A相故障测距结果(182.4kM)

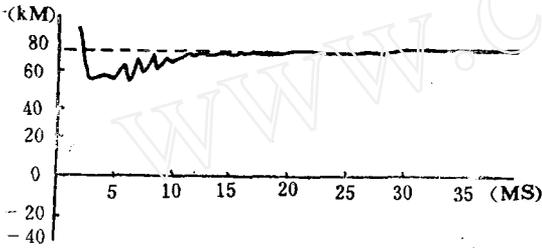


图7 75.28kM处A相故障测距结果

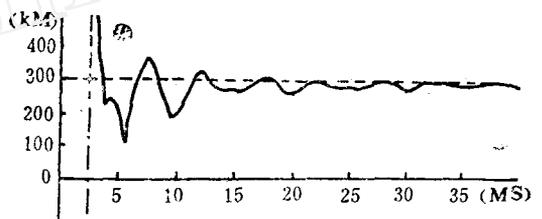


图8 301.12kM处A相故障测距结果

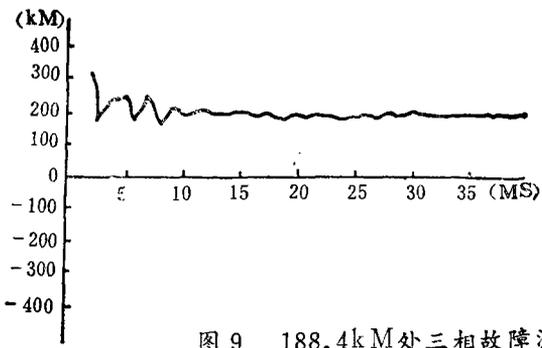


图9 188.4kM处三相故障测距结果

六 结 论

本文论述了卡尔曼滤波技术在微机距离保护中的应用。由于对故障信息的数据处理,采用了随机分析方法,考虑了常规保护算法中忽视的一些明显的随机现象,对改善保护性能带来了有益的影响。超高压远距离输电线路的感应噪声非常接近白噪声,因而使用卡尔曼滤波技术更能体现其优越性。从大量的仿真试验结果中,得出以下结论:

1.卡尔曼滤波器对故障噪声的低次、高次谐波及衰减直流分量均有很强的抑制能力;对超高压输电线由于串补电容引起的分数次谐波也能被很好的滤除。

2.卡尔曼滤波器对模型参数的准确性不敏感,当噪声有较大波动时,卡尔曼滤波器显示出良好的适应性,允许在一组输电线路保护中使用标准的卡尔曼滤波算法。

3.采用故障补偿电流比值法分类,所需要的量均是卡尔曼滤波中的量,使得滤波和分类可同时进行,故障发生后8ms之内即可判别故障相。

4.门槛值 k_1 、 k_2 是故障判别的依据,它决定了故障分类时间的长短。

5.本文论述的卡尔曼滤波测距算法对任何点的任何短路故障都可在20ms内准确定位,最大误差在5%以内。在全线60%以内短路,其准确定位时间可减少为16ms,误差可控制在3%以内。

6.卡尔曼滤波结果和故障定位基本不受故障电阻的影响。

7.采样频率为3.2kHz或1.6kHz,即每周64或32个采样点,可省掉抗混频模拟低通滤波器,从而进一步减少微机保护动作时间。

参考文献

1.A.A.Girgis and R.G.Brown "Application of kalman Filtering in Computer Relaying" IEEE Transactions on power Apparatus and Systems Vol.pas 100 No.7 July 1981 pp.3387~3397

2.A.A.Girgis "A kalman Filtering Based Digital Distance Relag" IEEE Trasactions on power Apparatus and systems, Vol pas 101 No.9 sept.1982 pp.3471~3480

3.A.A.Girgis and E.B.Makram, "Application of Adaptive kalman Filtering in classification Distance protection and Fault Location Using Microprocessor" IEEE Transactions on power Apparatus and Systems, Vol pas 107 No.1 Feb 1988 pp.301~309

4."最佳估计原理"袁天鑫编著 上海交通大学 1980年

5."离散时间系统滤波的数学方法"中国科学院数学研究所 国防工业出版社