

自适应卡尔曼滤波技术在故障分类中的应用

山东工业大学 于九荷

摘要 本文论述了应用自适应卡尔曼滤波技术进行故障分类的方法。这种方法是把每一相电压或电流同时用两个卡尔曼滤波模型进行处理,一种模型表示故障相特征,另一种模型表示非故障相特征,故障相和非故障相的识别,是通过后验概率的计算来确定。故障相一旦被确定,使用故障相卡尔曼滤波器,继续估计暂态过程中的基波电压和电流分量。所述算法在山东邹县——潍坊500kV数字仿真线路上进行了验算,结果表明,该算法准确、可靠,收敛速度小于5毫秒。

关键词 卡尔曼滤波、后验概率、故障分类

1 概述

大多数故障分类技术是以三相电压或电流采样值的变化或以基波信号相量为基础的。Breingan等提出采用电流突变量(Clark分量)分类法,这项技术假定线路是理想换位,它对正确区分两相接地故障存在困难。Phadke等提出了一套利用序电压、序电流相量系数分类的方法,这种方法同样存在对输电线路作不尽实际的假设及计算量较大的缺点。日本的Sakoguchi提出以电压、电流样本识别值为依据的故障分类统计方法。这种技术是在模拟某一具体继电器判据方程的前提下进行的。Girgis提出用迭加的电流幅值变化的比值区分故障,如果这个比值超过某一特定的临界值,相应的相将被区分为故障相,如果这个比值低于临界值,被区分为非故障相。这项技术可以说是半统计和半确定性的,因为临界值是以电流变化量的比值为依据的。本文介绍的自适应卡尔曼滤波,是应用概率统计的方法对故障相进行识别和分类的。它是利用测量数据和噪声信号特征的不同,通过后验概率的计算,估计每一相的特征,即故障相或非故障相,并利用故障相的卡尔曼滤波器继续进行基波分量的最佳估计。

2 卡尔曼滤波的数学模型

建立数学模型的出发点,是将故障信号中的基频分量看成是有效成份,而将故障中基波分量以外的所有成份均作为噪声来处理。50Hz的有效成份用带有未知幅值和相角的相量表

示, 假定相量是静止的, 参考轴以50Hz频率旋转, 这样, 50Hz的瞬时值为:

$$S(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta) \\ = \cos\omega_0 t \cdot X_{k1} - \sin\omega_0 t \cdot X_{k2}$$

卡尔曼滤波的目的, 在于以极短的时间从暂态信号中估计出 X_{k1} 和 X_{k2} 。

卡尔曼滤波的数学模型

系统状态方程:

$$X_k = \phi_k X_{k-1} + w_k; \quad \phi_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

量测方程:

$$Z_k = H_k X_k + v_k, \\ H_k = [\cos\omega_0 K \Delta t, -\sin\omega_0 K \Delta t]$$

式中 Δt 为采样周期,

验前统计量:

w_k 为随机扰动, 假定是高斯分布

$$E[w_k] = 0, \quad E[w_k w_k^T] = Q_k \delta_{k,l}$$

v_k 为测量噪声, 假定是高斯分布,

$$E[v_k] = 0, \quad E[v_k v_k^T] = R_k \delta_{k,l}$$

w_k, v_k 相互独立,

状态预测估计:

$$\hat{X}_{k/k-1} = \phi_k \hat{X}_{k-1},$$

方差预测:

$$P_{k/k-1} = \phi_k P_{k-1} \phi_k^T + Q_{k-1}$$

状态估计:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1})$$

方差迭代:

$$P_k = [I - K_k H_k] P_{k/k-1}$$

滤波增益:

$$K_k = P_{k/k-1} \cdot H_k^T [H_k \cdot P_{k/k-1} \cdot H_k^T + R_k]^{-1}$$

递推初值为 $X(0), P(0)$ 。

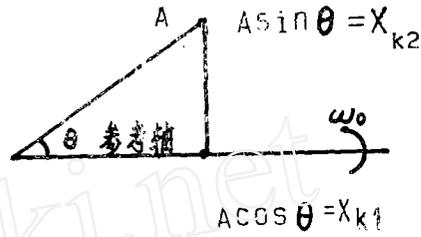


图 1

3 自适应卡尔曼滤波故障分类方法

自适应滤波算法是根据输入到卡尔曼滤波器的不同噪声参数来识别系统特征的一个自学习过程。系统发生故障时, 故障相和非故障相中的电压、电流波形明显不同, 其噪声信号统计特征有很大差别。图 1、2 示出了在山东邹县——潍坊 500kV 输电线始端发生单相接地时电压、电流噪声波形图。故障相中的电压、电流噪声方差、状态估计初始值及初始协方差矩阵均明显的不同于非故障相。根据这一区别, 对每一相的电压数据(也可以用电流数据)用

两个卡尔曼滤波器同时处理，一个模型设为故障相特征，另一个模型设为非故障相特征，通过后验概率的计算，可以确定每一相的情况，即故障相或非故障相。为了计算后验概率，也就是故障概率和非故障概率，首先要从递推方程中计算两个事前条件密度函数，

$$P(Z_k | a_i) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} (H_k P_{k|k-1} \cdot H_k^T + R_k)^{1/2}} \cdot \exp \left[-1/2 \cdot \frac{(Z_k - H_k \cdot \hat{X}_{k|k-1})^2}{H_k P_{k|k-1} \cdot H_k^T + R_k} \right] \cdot P(Z_{k-1} | a_i)$$

式中 a_i ， $i=1$ 为故障状态， $i=2$ 为非故障状态，

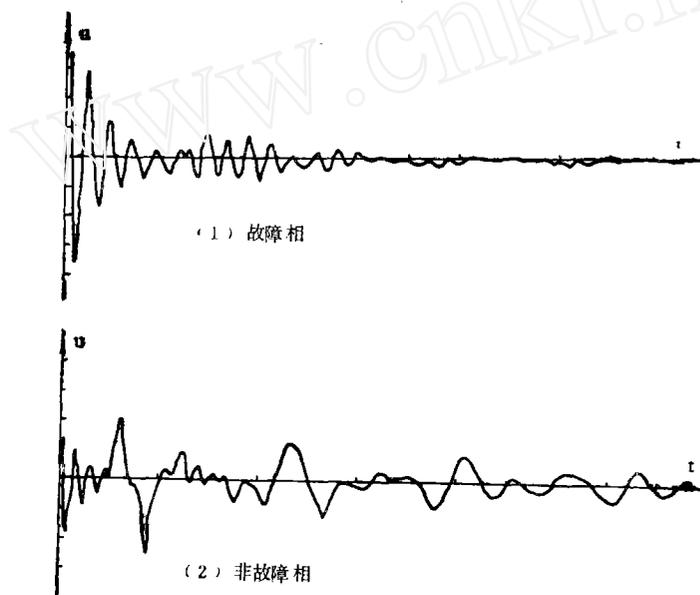


图1 电压过峰值，A相接地短路电压噪声波形

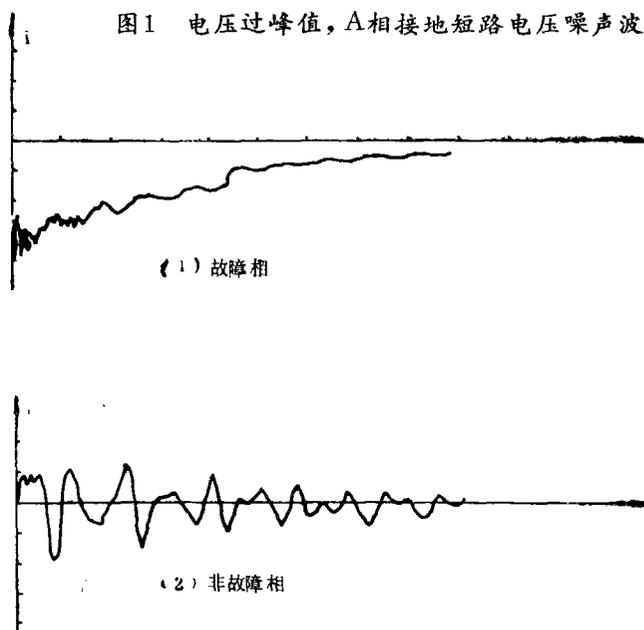


图2 A相接地短路时电流噪声波形

当 $K=0$ 时, 对所有模型, $P(Z_{K-1} | a_i) = 1.0$

由条件概率的定义有

$$P(a_i | Z_K) = \frac{P(Z_K | a_i) P(a_i)}{P(Z_K)}$$

又由全概率公式:

$$P(Z_K) = \sum_{i=1}^2 P(Z_K | a_i) \cdot P(a_i)$$

假设非条件概率 $P(a_1) = P(a_2)$,

则故障概率和非故障概率(即贝叶斯公式)为:

$$P(a_i | Z_K) = \frac{P(Z_K | a_i)}{P(Z_K | a_1) + P(Z_K | a_2)}$$

式中 $i=1, 2$

$$P(a_1 | Z_K) + P(a_2 | Z_K) = 1$$

如果 $P(a_1 | Z_K)$ 已知, 则 $P(a_2 | Z_K)$ 很容易被决定。对于故障相 $P(a_1 | Z_K)$ 应该接近1, $P(a_2 | Z_K)$ 接近于零, 对于非故障相, 结果相反。这样, 概率论和统计方法在电力系统微机继电保护领域中得到了应用, 建立了自适应卡尔曼滤波的新型故障分类技术。

识别故障相是由下列判别式决定,

$P(a_1 | Z_K) \geq 0.99$, 则识别 Z_K 为故障相测量值,

$P(a_2 | Z_K) \geq 0.99$, 则识别 Z_K 为非故障相测量值。

4 自适应卡尔曼滤波故障分类仿真实验结果

使用EMTP程序, 对山东邹——潍500kV、376.4公里输电线路, 进行各种类型短路的仿真运算, 得出故障相、非故障相参数的准确值如下:

故障相参数:

$$R_0 = 0.6 \quad P_0 = \begin{pmatrix} 0.6 & 0 \\ 0 & 0.6 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

非故障相参数:

$$R_0 = 0.1, \quad P_0 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{pmatrix}, \quad x_0 = \text{故障前值}$$

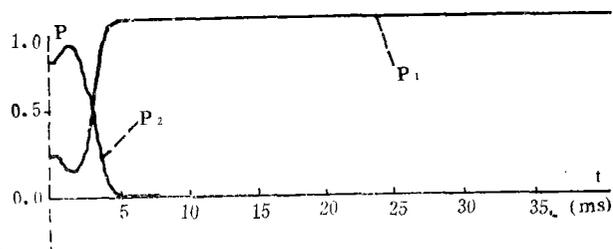


图3 A相故障分类参数 P_1 、 P_2 曲线

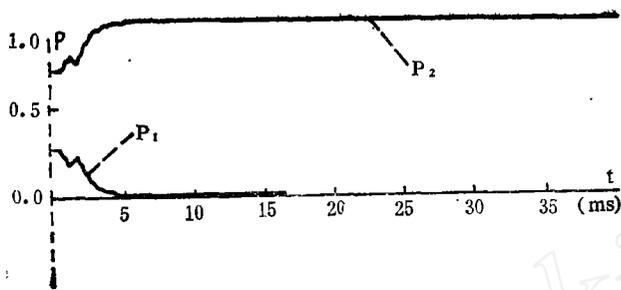


图4 B相故障分类参数 P_1 、 P_2 曲线

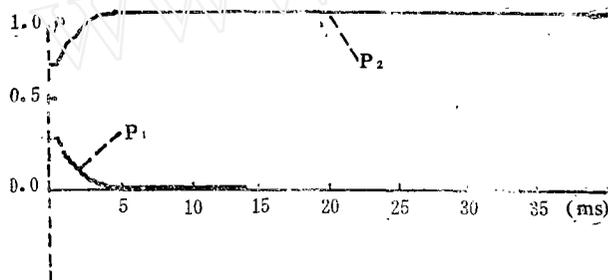


图5 C相故障分类参数 P_1 、 P_2 曲线

对每一相均可算出两个后验概率 P_1 、 P_2 ， P_1 为故障相指示参数， P_2 为非故障相指示参数，对某一相，如果 P_1 大于0.99，且 P_2 小于0.01，则判别此相为故障相，如果 P_1 小于0.01，且 P_2 大于0.99，则判别此相为非故障相，图3、4、5给出了A相短路时A、B、C各相的 P_1 、 P_2 曲线。

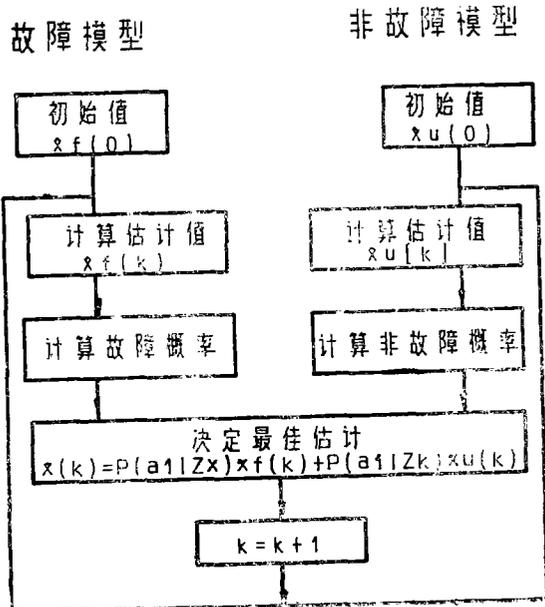


图6 最佳状态估计流程图

5 评价

自适应卡尔曼滤波的故障分类技术是一种快速、准确的故障分类方法，它不需要采用简化的假设，如不考虑线路换位，负荷电流影响等。计算事前条件密度函数时，用到测量误差 $(Z_k - H_k \cdot \hat{X}_{k|k-1})$ 和 $(H_k \cdot P_{k|k-1} \cdot H_k^T + R_k)$ 两项，这两项也是利用卡尔曼滤波最佳估计基波电压、电流用到的计算值，且第二项可以出线计算。这样，便于将故障分类和最佳状态估计同时进行，如图6所示，形成了自适应卡尔曼滤波状态估计算法，大大缩短了状态估计的时间。

发一变组增量差动微机保护

清华大学 李海 王维俭

1 引言

从近十几年来国内外关于变压器微机保护的研究文献来看,大致有两种发展趋势,一种是模仿模拟型变压器保护采用差动原理,以二次谐波和间断角等波形特征来闭锁励磁涌流引起的误动作;一种是从变压器的非线性模型出发,利用两侧电流、电压量检测变压器的内部故障,从原理上避免了励磁涌流引起的误动。

模型法之所以能够精确地区分内部故障和外部故障、励磁涌流、过激磁等,也可以说是因为它顾及了变压器两侧的电压,输入了较多的信息,从而得到了较好的特性。但是,目前电力系统中,变压器高压侧出口与开关之间一般不装设PT,500kV母线的PT大多是CVT(电容式电压互感器),暂态特性较坏,致使模型法在普遍应用时受到限制。

差动原理应用于变压器保护有着悠久的历史,关键问题是区分励磁涌流和内部故障。一般利用两者在波形上的明显不同,例如二次谐波的含量或间断角的大小,以防止励磁涌流下的误动作,本文选用了二次谐波制动方式。为了区分内部短路和外部短路,通常采用传统的比率差动原理,利用微机保护的优点,使动作特性更趋于合理,我们选用了增量差动原理,能更灵敏地动作于内部小故障。

2 算法说明

增量差动保护原理是文献^[3]最早提出的。简介如下:

.....

本文提出的故障分类技术,对噪声模型参数的准确性要求很高,因为只有正确的模型参数,才能得到正确的结果,而正确的模型参数又取决于起始状态估计和噪声的统计特性。本文用到的模型参数是通过大量的仿真运算确定的。

参考文献

- [1] 浙江大学教学引航。概率论与数理统计。人民教育出版社。
- [2] A. Girgis, Implementation of Kalman and Adaptive Kalman Filtering Algorithms for Digital Distance Protection on a vector signal Processor. IEEE Transaction on power, Deliverg. Vol 4. No 1. January 1989.
- [3] G. W. Swift, The spectra of Fault Induced Transients. IEEE. PES Summer Meeting July 1978, PP1~7.