

微机保护传感器故障的一种容错控制方法

程宏波, 王勋, 伦利

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 提高微机保护装置的可靠性对电力系统本身和用户都具有重要的意义。采用容错控制技术, 设计了一个基于故障检测与诊断的容错控制系统, 将基于联邦卡尔曼滤波器的故障检测与诊断系统和智能容错控制器相结合, 实现针对微机保护传感器故障的容错。联邦卡尔曼滤波器采用基于状态 x^2 的检验法对各传感器的状态进行监测。当传感器出现故障时, 容错控制器根据检测到的故障类型, 采用不同的控制策略进行信号重构, 利用重构后的信号代替故障传感器的测量值, 输入给保护部分, 从而使系统在传感器发生故障时仍能保持稳定。

关键词: 微机保护; 传感器故障; 容错控制; 卡尔曼滤波

Sensors' fault tolerant control of microcomputer-based relay protection

CHENG Hong-bo, WANG Xun, LUN Li

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: It is important to enhance microcomputer-based protection's reliability for both the electrical power system and the utility. Based on fault detection and diagnosis, a fault-tolerant control plan is given, which unifies the federal Kalman filters and intelligent controller. It can ensure the microcomputer-based protection work normally even if its sensor failed. Federal Kalman filters use state x^2 to detect sensors' fault. Different strategy to different fault, the controller will get restructured signals to protection instead of the false sensor's wrong signals, thus fault tolerance is achieved.

Key words: microcomputer-based relay protection; sensor's fault; fault-tolerant control; Kalman filter

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)19-0001-04

0 引言

容错控制是一门新兴的应用学科, 它的理论基础涉及现代控制理论、计算机技术、信号处理以及人工智能等多种应用学科。它的兴起是实际需求和理论发展交替作用的结果。随着自动化水平的不断提高, 系统的复杂性大大增加, 系统的可靠性和安全性已引起广泛高度的重视。因此, 开展容错控制技术及其在实际系统中应用的研究, 以提高现有系统的可靠性和安全性, 具有十分重要的意义^[1]。

电力系统微机保护是电力系统安全、可靠、稳定、经济运行的重要保证, 其可靠性对整个系统而言具有重要意义。

无论是何种形式的保护, 都需要检测系统真实的电压、电流值。这些值是反映系统状态的重要参数。微机保护系统动作与否很大程度上都取决于这些值的变化情况。所以, 传感器部分(互感器、变换器、A/D模块等)对微机保护系统具有至关重要的意义。对于传感器故障具有一定的容错能力, 将

有效地提高微机保护系统的可靠性。避免出现微机保护误动或停止工作的情况。

1 微机保护传感器故障的检测与诊断

故障的检测与诊断是容错控制技术应用的前提。只有正确地检测出故障, 才有可能采取适当的措施来对微机保护系统实现容错控制。

本文采用基于状态 X^2 的检验方法来检测微机保护传感器部分的故障。为了提高检测的可靠性, 采用 Carlson 提出的具有联邦结构的 Kalman 滤波器^[2]来实现。结构如图1所示。

根据前一时刻系统的测量值, 利用 KF_I 、 KF_{II} 对系统下一时刻的值作出预测, 该预测值和用“状态递推器”由先验信息递推而得的预测值进行比较。前者和传感器的测量值有关, 后者则不受传感器测量值的影响。根据两个预测值之间的差异, 对传感器的工作状态作出判断。将判断结果和预测值送入到主滤波器 MF, 进行进一步的处理, 为后面的容错控制提供条件。

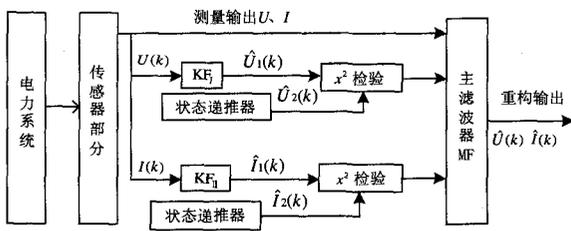


图1 采用联邦滤波结构的微机保护传感器故障诊断系统
Fig.1 Sensors' fault detection with Federal Kalman filters in microcomputer-based relay protection

局部滤波器采用状态 X^2 检验法来确定各子系统是否发生故障。状态 X^2 检验法利用两个状态估计的差异来对故障进行检测： $\hat{U}_1(k)$ 、 $\hat{I}_1(k)$ 是由量测值 $U(k)$ 、 $I(k)$ 经卡尔曼滤波得到的， $\hat{U}_2(k)$ 、 $\hat{I}_2(k)$ 则是由状态递推器由先验信息递推而来。前者和测量信息有关，因而会受到系统故障信息的影响，而后者则和测量信息无关，不会受系统信息的影响。

对于电压传感器来说，由于其下一时刻和上一时刻所测量的量之间是连续的，所以其状态转移矩阵 $\Phi(k, k-1) = I$ ，为单位矩阵。由于互感器的变换作用，电压、电流表所测得的数据与系统真实值之间，即测量值与被测值之间成一定比例，且为互感器变比的倒数，则观测矩阵 $H(k) = 1/K_n$ 。对于局部滤波器 KF_i ，有：

$$P(k|k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1)\Phi^T(k, k-1) = P(k-1) \quad (1)$$

$$K_g(k) = P(k|k-1)H^T(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1} = P(k|k-1)K^{-1}_n[K^{-1}_nP(k|k-1)K^{-1}_n + R(k)]^{-1} \quad (2)$$

$$\hat{U}_1(k|k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{U}_1(k-1) = \hat{U}_1(k-1) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{U}_1(k) &= \hat{U}_1(k|k-1) + K_g(k)[Y(k) - H(k)\hat{U}_1(k|k-1)] = \\ &= \hat{U}_1(k|k-1) + K_g(k)[H(k)\hat{U}_1(k-1) - H(k)\hat{U}_1(k|k-1)] = \\ &= \hat{U}_1(k|k-1) + K_g(k) \cdot [K^{-1}_n\hat{U}_1(k-1) - K^{-1}_n\hat{U}_1(k|k-1)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$P(k) = [I - K_g(k)]P(k|k-1) \quad (5)$$

式(1)称为预报误差方差方程，它表明了预报值的准确程度。式(4)为滤波方程，它表示的为该滤波器的最优估计值，我们用它来对被测系统的值进行估计，得到被测电压的估计值 $\hat{U}_1(k)$ 。

为了令卡尔曼滤波器开始工作，我们需要告诉

卡尔曼滤波器两个零时刻的值： $\hat{U}_1(0)$ 和 $P(0)$ 。对于 $\hat{U}_1(0)$ 的值，我们可以随便给定一个，因为随着卡尔曼滤波器的工作， $\hat{U}_1(k)$ 会逐渐的收敛。但对于 $P(0)$ ，一般不能取 0，因为这样会令卡尔曼滤波器认为所给定的 $\hat{U}_1(0)$ 是系统最优的值，从而使算法不能收敛。

在供电系统中，出于稳定供电的需要，电压一般要求为一固定的稳定值，如在牵引供电系统中，电压稳定在 27.5 kV。所以，对于电压，由先验信息得到的状态递推器的输出为：

$$\hat{U}_2(k) = \frac{27500}{K_n} \quad (6)$$

则残差：

$$\begin{aligned} \beta(k) &= e_1(k) - e_2(k) = [\hat{U}_1(k) - U(k)] - \\ &= [\hat{U}_2(k) - U(k)] = \hat{U}_1(k) - \hat{U}_2(k) \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $\beta(k)$ 是高斯随机变量 $e_1(k)$ 和 $e_2(k)$ 的线性组合，所以它也是高斯随机向量，且均值为零。

当系统发生故障时，由于估计 $\hat{U}_2(k)$ 与测量值 $U(k)$ 无关，故仍是无偏估计， $E\{e_2(k)\} = 0$ 。而估计 $\hat{U}_1(k)$ 因受故障影响变成了有偏估计， $E\{e_1(k)\} \neq 0$ ，则： $E\beta(k) = E\hat{X}_1(k) - E\hat{X}_2(k) \neq 0$ 。

因此，通过对 $\beta(k)$ 均值的检验即可确定传感器是否发生了故障。对于电流互感器，其检测的原理基本如上相同。

对于由电力系统波动而引起的传感器输出的变化，由于在波动时，电压的变化和电流的变化之间存在着一定的关联，故通过判断电压互感器的检测残差和电流互感器的检测残差之间的关系，就可以确定。从而可以将由于系统波动而引起的输出变化，和由于传感器故障而引起的输出变化区分开来。

2 容错控制器的设计

当微机保护系统中的某一部分传感器出现故障时，所对应的局部滤波器将检测到故障。此时，故障传感器测量到的信号将是不正确的，若将它直接传输给保护部分，将会引起保护装置的误动。从而给系统造成不必要的停电。

当局部滤波器检测到故障后，如何对故障进行处理，采取合适的策略，保证系统的正常运行，这是实现系统容错的关键。

如前所述，卡尔曼滤波器可以根据前一时刻的

测量值对下一时刻的状态作出估计, 而状态递推器则可以根据先验信息对系统的状态作出估计。当检测到传感器故障时, 对两个估计值进行重构, 使之更接近系统真实的状态。并利用这个重构信号来取代故障传感器的测量值, 以保证微机保护系统的稳定运行。

所以, 在针对微机保护传感器故障的容错控制系统中, 控制器主要完成如下两种任务: (1) 根据子滤波器故障检测逻辑的输出值, 确定传感器的故障种类, 并依此选择相应的数据融合中心; (2) 将卡尔曼滤波器的估计值和状态递推器的估计值进行融合, 得到系统状态的最优估计值, 并输送给保护部分。

检测逻辑输出的传感器工作状况可以分成4种: (1) 全部正常工作; (2) 电压测量回路故障; (3) 电流测量回路故障; (4) 电压、电流测量回路均故障。故选用4组神经元分别对这4种情况进行处理。由于每种情况下都有电压和电流两个状态量要进行重构, 因此每组中应包含2个单独的神经元。

对每个神经元, 需要融合的数据主要有(1)卡尔曼滤波器的估计值; (2)状态递推器的估计值。故每个神经元应包含有2个输入。

由此设计的控制器的结构如图2所示。

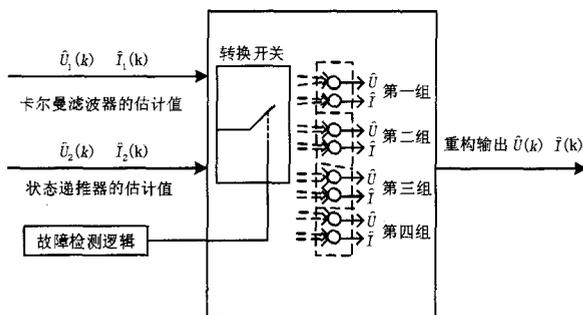


图2 控制器功能结构示意图
Fig.2 Block diagram of controller

图中共有四组神经元, 每组分别对两个状态进行融合。融合后的输出为:

$$\begin{aligned} \hat{U}(k) &= \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_1(k) \\ \hat{U}_2(k) \end{bmatrix} \\ \hat{I}(k) &= \begin{bmatrix} w_{13} & w_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_1(k) \\ \hat{I}_2(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\hat{U}_1(k)$ 为卡尔曼滤波器对电压测量值所作的预测, $\hat{U}_2(k)$ 为状态递推器的估计值。他们作为对电压数据进行融合的神经元的两个输入, w_{11}, w_{12}

($i=1,2,3,4$) 则为他们所对应的连接权重。 $\hat{I}_1(k)$ 为卡尔曼滤波器对电流测量值所作的预测, $\hat{I}_2(k)$ 为状态递推器所作出的估计。 $w_{13}, w_{14}(i=1,2,3,4)$ 分别为他们所对应的连接权重。

在不同故障情况下, 选取不同组的神经元作为数据融合中心。不同组的神经元, 其连接权重一般也不同。如在正常情况下, 选择第一组来进行数据融合, 此时两个估计值都接近于系统的真实值, 故满足 $w_{11} + w_{12} = 1, w_{13} + w_{14} = 1 (0 \leq w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14} \leq 1)$ 的所有值都可以满足要求。而在故障情况下, 其权重 $w_{ij}(i=2,3,4; j=1,2,3,4)$ 值的确定应通过事先的训练确定^[3]。该训练是离线的。

只要训练充分, w_{ij} 的值确定得当, 当某一传感器出现故障时, 所得到的重构信号 $\hat{U}(k), \hat{I}(k)$ 能比较充分地接近系统状态的真实值, 而不会受到传感器故障的影响, 从而保证微机保护系统的正常工作, 实现对传感器故障的容错。

针对微机保护传感器故障的容错控制系统的整体结构如图3所示。

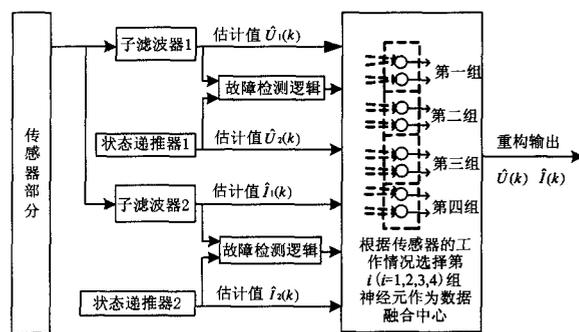


图3 微机保护传感器故障容错控制系统整体框图
Fig.3 Sensor's fault-tolerant scheme diagram of microcomputer-based relay protection

当电力系统出现故障, 保护装置需要动作时, 如果传感器出现了故障, 卡尔曼滤波器利用故障发生时刻之前的传感器的测量值, 对下一时刻的状态作出预测, 该预测值是无偏的。在检测出故障后, 利用该预测值, 取代故障传感器的测量信号, 作为下一时刻预测的输入, 结合未发生故障的其他传感器的测量值, 可以得到符合变化趋势的预测值作为重构信号, 从而保证正确动作。

3 传感器故障容错控制系统的仿真

按照由简单到复杂的原则, 我们先对单回路容错系统的性能进行仿真和验证。对于单回路系统中单一传感器故障进行容错是进行其它容错的基础。

在牵引供电系统中, 取变电所的出线电压 27.5

kV, 馈线电流 1400 A。为了测量的方便, 电压互感器的变比取 27500/100。电流互感器的变比取 1600/5。

先仿真当测量电压的传感器出现故障时的工作情况。卡尔曼滤波器估计的初始值 $\hat{U}_1(0) = 0$; 滤波误差方差的初始值给定为一不为零的值 $P(0) = 0$ 。

图 4 所示为测量电压的传感器出现故障时, 故障诊断系统检测出故障, 并报警。图中横线表示传感器故障检测的阈值, 波浪线则为滤波残差。当传感器在仿真时刻之间出现故障时, 残差超出其阈值。算法因连续两次检测到传感器输出超门限而诊断其发生故障。

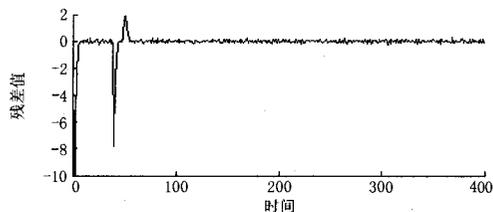


图 4 传感器滤波残差
Fig.4 Filter residual of sensor

此时, 所测量到的实际电压值如图 5 所示。

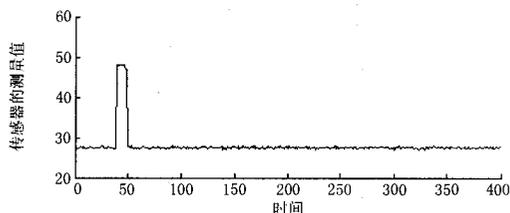


图 5 故障传感器的测量值
Fig.5 Output of false sensor

将卡尔曼滤波器的估计输出与状态递推器的估计值经神经元重构后的信号输出如图 6 所示。

图 7 仿真了在两路传感器中有一路出现了问题时, 卡尔曼滤波器的故障检测函数及状态估计的情况, 图 8 表明了该情况下容错控制系统的重构信号。

图 9 则仿真了双回路传感器发生故障时故障检测及信号重构的情况。

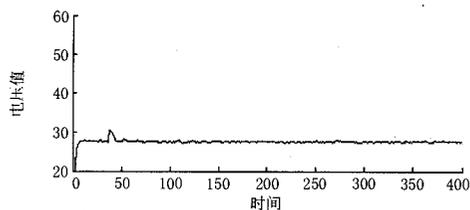


图 6 容错控制系统的重构输出
Fig.6 Restructured signal of FTC

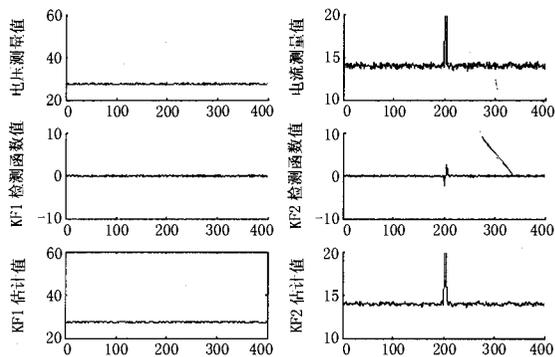


图 7 一回路传感器故障时子滤波器的输出
Fig.7 Outputs of sub-filter when one sensor failed

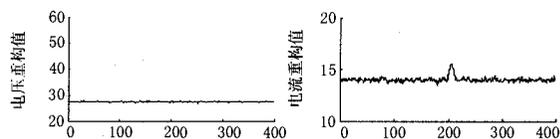


图 8 一回路故障时容错控制系统的重构信号
Fig.8 Restructured signals of FTC when one sensor failed

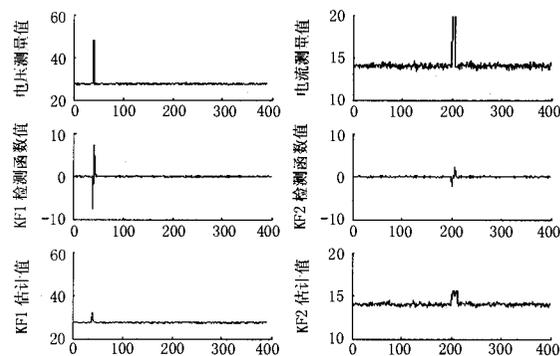


图 9 双回路传感器故障时故障检测及信号的重构
Fig.9 Residual of sub-filter and restructured signals of FTC when dual sensors failed

由仿真结果可以看到, 无论是单传感器通道发生故障, 还是双传感器通道发生故障, 容错控制系统都可以得到接近系统真实值的重构信号, 从而保证微机保护系统的稳定性。而且, 在双通道发生故障时, 系统的容错性能不比单通道故障时的容错性能低。这与控制器中对两通道的数据分别进行融合有关。

4 结论

本文所设计的容错控制系统, 可以在不增加额外设备的情况下, 通过在保护主机中增加软件模块, 来实现对微机保护系统中传感器通道故障的容错。

(下转第 8 页 continued on page 8)

同等条件下, 低电势圆的动作特性如图 7 所示。

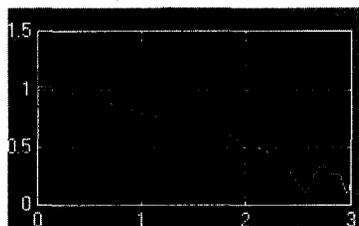


图 7 全失磁故障时等电势圆的动作特性

Fig.7 Action characteristic of the low potential criterion when full loss-of-excitation fault occurred

图中横线为低电势圆整定值, 曲线为阻抗运行轨迹。在 0.8 s 时等电势圆动作。比之静稳边界的 1.2 s, 快了 0.4 s。其他仿真结果还表明, 主变高压侧无论发生何种短路故障, 低电势圆都不会动作, 且其阻抗轨迹向背离低电势圆的方向变化。而对于机端三相短路和两相短路, 低电势圆可能会误动。仿真结果证明了推理的正确性。

4 结论

本文通过分析失磁后发电机电势的变化规律, 利用电压平面、阻抗平面和导纳平面之间的互演关系, 进行了低电势圆的推导过程, 并对其动作特性进行了分析和仿真。得出低电势圆具有很高的灵敏度和反应速度以及对主变高压侧短路故障的强干扰能力。仿真结果反映了推理过程的正确性。

(上接第 4 页 continued from page 4)

在变电所普遍采用综合自动化技术的今天, 充分利用综合自动化系统中的信息冗余取代硬件冗余, 使得方案具有较好的可行性和经济性。

参考文献

- [1] 闻新, 张洪钺, 周露. 控制系统的故障诊断和容错控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
WEN Xin, ZHANG Hong-yue, ZHOU Lu. Fault Diagnosis and Tolerant Control of Control System[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] Carlson N A, Berarducci M P. Federal Kalman Filter Simulation Results[J]. Navigation, 1994, 41(3): 297-321.
- [3] 马昕, 袁信. 基于神经元的容错组合导航系统设计[J].

低电势圆动作快速的特点对于水轮发电机具有重大意义; 而对于系统振荡等干扰, 由于反应迅速, 为延时躲过故障提供了更大的冗余。将文中的凸极等效同步电势换成同步电势, 就可以类推出隐极机的等电势圆。

参考文献

- [1] 柳焕章. 发电机失磁保护的原理及整定计算[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 72-75.
LIU Huan-zhang. Principle of Generator Loss-of-excitation Protection and Its Setting Calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 72-75.
- [2] 姚晴林. 同步发电机失磁及其保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [3] 李田刚. 水轮发电机失磁保护的研究[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005.
LI Tian-gang. Study of the Loss-of-excitation of the Hydraulic Generator[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2005.

收稿日期: 2007-05-10;

修回日期: 2007-06-10

作者简介:

李田刚(1978-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事继电保护方面的研究、应用和工程调试工作; E-mail: linaldo@163.com

王钢(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护、控制和自动化方面的研究工作。

宇航学报, 1999, 20(2): 7-13.

MA Xin, YUAN Xin. Fault-tolerant Integrated Navigation System Based on Neurons[J]. Journal of Astronautics, 1999, 20(2): 7-13.

收稿日期: 2007-04-26;

修回日期: 2007-06-14

作者简介:

程宏波(1979-), 男, 助教, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护及综合自动化; E-mail: hbcheng@4y.com.cn

王勋(1960-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为变电站综合自动化;

伦利(1980-), 女, 助工, 主要研究方向为电力系统保护。