

文章编号: 1005-0523(2007)04-0075-04

# 用容错控制技术提高微机保护系统的可靠性

伦利, 王勋, 程宏波

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 在介绍容错控制技术基本理论的基础上, 将容错控制技术应用到微机保护系统中, 提出微机保护系统中应用容错控制技术的基本准则及常用方法. 在分析一些常见故障的容错控制方案的基础上, 重点分析了针对微机保护系统传感器故障的容错控制, 分析了其故障检测及容错的工作原理. 以牵引供电系统的馈线保护为例, 介绍了容错控制技术在保护系统中的应用方法. 采用容错控制技术为提高微机保护装置的可靠性提供了一条新的途径.

**关键词:** 容错控制; 故障检测; 微机保护; 可靠性

中图分类号: TM774

文献标识码: A

## 0 引言

生产的发展对电力系统的稳定供电提出了越来越高的要求. 由于联网步伐的加快, 电网结构日趋复杂, 对保护装置的功能要求越来越高, 使得微机保护装置的结构日趋复杂, 保护装置出现故障的几率随之增大. 而保护装置一旦出现故障, 所造成的后果也越来越严重. 国内外实践证明, 继电保护装置一旦发生故障, 往往会扩大事故, 继而酿成严重后果<sup>[1]</sup>.

容错技术是一种高可靠性技术, 目前已在航空、航天等领域得到了广泛的应用, 如何将容错技术应用于继电保护设备的故障控制, 从而提高继电保护装置的可靠性, 保证电网的稳定运行, 是当前电力工作人员迫切需要研究和解决的一个重要问题.

容错技术能够达到对故障的“容忍”, 并非是“无视”故障的存在, 而是要能够自动、适时地监测并诊断出系统的故障, 然后采取相应的故障控制或处理的策略, 而要达到这些要求, 还要有相应的硬件作为基础. 故障容错技术包括硬件冗余、故障检测与诊断和故障决策等内容. 容错技术所包含的内容可以归纳如图 1 所示<sup>[3]</sup>.

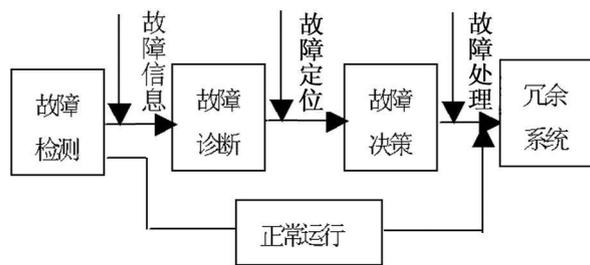


图 1 容错技术所包含的内容

## 1 容错控制概述

容错技术是一种将故障检测、智能诊断与容错控制融为一体的新兴综合性学科, 他涉及到系统论、信息论、控制论、信号处理、模式识别、故障诊断、人工智能、工业自动化、工程可靠性、微型计算机等多学科知识和技术<sup>[2]</sup>.

## 2 微机保护中的容错控制

根据不同原理构成的继电保护装置种类虽然很多, 但一般情况下, 继电保护装置都是由测量部分、逻辑部分和执行部分组成的, 其原理结构如图 2 所示<sup>[4]</sup>.

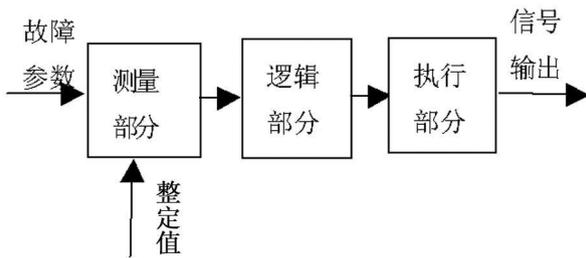


图2 继电保护装置的原理结构图

微机保护系统是一个比较典型的控制系统,他通过输入设备(互感器与A/D转换)和输出设备(执行机构)将受控系统和控制器连接到一起,这为我们容错控制的应用提供了基础。

### 2.1 控制器子系统的容错

控制器是整个微机保护系统的核心,他连接着输入、控制着输出,是一个控制系统中最关键的部分.它的突出特点就是以软件为核心,因此控制器的容错与一般意义下的硬件容错技术有所不同,必须考虑软件的独特特点.控制器可能出现的故障主要有:控制器硬件故障,控制软件故障等<sup>[5]</sup>.

#### 2.1.1 控制器硬件的容错

微机保护系统中为了提高控制系统的可靠性,常采用集中分布式控制方式,采用通用或专用计算机作为核心配置.对于控制计算机,由于其程序运行的独立性,较难实现热切换,而冷切换又不能满足保护系统的要求,因此必须选用高可靠性的计算机.

#### 2.1.2 控制软件的容错

控制软件是由操作平台和应用软件组成的.理想的操作平台,不但要功能强大,而且要稳定.应用软件就是微机保护算法的具体实现,他应当能够如实的再现保护的算法,并且要具有准确、高效的特点.软件故障与硬件故障的特点不同:软件故障主要是软件设计和编码的错误,而与拷贝、使用、维护的关系甚小;可靠度与时间无关,软件的可靠度随软件错误的排除而提高,相同软件的冗余不会提高可靠性.

由于软件故障的以上特点,因此对于微机保护系统软件的容错工作主要是如何发现和避免软件中的错误,在设计时尽量提高程序的稳定与可靠性,这需要应用到软件系统工程的方法.

软件容错的方法,比较典型的有:N文本法,又称多版本程序设计法,对一个给定的功能,由 $N(N \geq 2)$ 个不同的设计组采用不同的算法独立编制出 $N$ 个不同的程序,然后同时在机器上运行并比较运行的结果;恢复块法,每一时刻有一个文本处于运行状

态,一旦该文本出现故障,则以备用文本加以替换;程序卷回,在每个恢复点都进行错误检测,假如在某个时刻检测到错误,则让程序退回到上一时刻的状态重新开始执行.

对于控制器特别是计算机的容错技术,先前的研究已经比较成熟,并已有了较多的应用成果<sup>[6]</sup>,这里不再赘述.

### 2.2 输入、输出子系统的容错

输入、输出设备都是以硬件为主构成的.当其元件出现故障时,会有明显异于正常的特征信号出现,因此可以采用常规的硬件冗余表决的容错方案.

硬件冗余方法是通过重要部件及易于发生故障部件提供备份以提高系统的容错能力,它设计方法简单,易于实现,但缺点是备份部件过多时,会使系统成本提高,体积增大.

随着研究的发展,人们提出一种基于解析冗余的方法,它利用系统中不同部件在功能上的冗余性,利用各输入输出量之间固有的解析关系,通过信息处理技术来实现故障容错.这种方法具有性能好、功能强、成本低和易于实现等特点.在微机保护系统中,电压电流量的输入占有比较重要的地位,而且两者之间往往存在着一定的解析关系,因而基于解析冗余的容错控制方法应该在微机保护输入输出系统的容错中受到了重视.

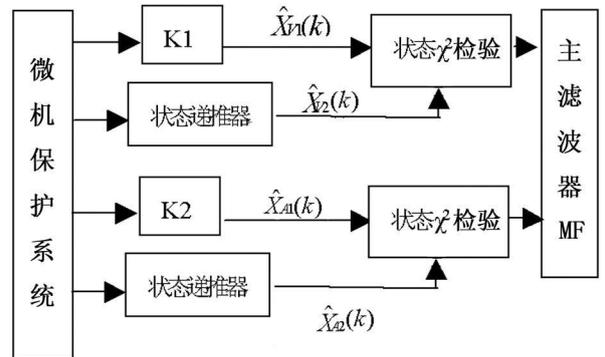


图3 微机保护系故障诊断结构框图

卡尔曼滤波器是基于解析冗余技术中的一个重要方法.它是应用线性最小方差估计原理对被估计量进行动态估计的.卡尔曼滤波是一种递推滤波,由递推方程随时给出新的状态以及输出估计.对于计算机来说,卡尔曼滤波因其计算量和对存储量要求不大而比较容易满足其实时性计算的要求.我们可以利用卡尔曼滤波的方法,由前几个时刻的状态,对下一个时刻的状态进行预测与估计,用以修正因异常而引起的输出错误.

本文采用具有联邦滤波结构的卡尔曼滤波器对

微机保护系统的传感器故障进行容错.如图 3 所示.首先,由两个局部滤波器  $K1$ 、 $K2$  来获得微机保护系统误差状态的局部估计值,再将这些局部估计值按最优准则组合起来,输入到主滤波器  $MF$ ,从而得到整个微机保护系统误差状态的估计值,利用这些估计值来对微机保护系统进行反馈校正.

局部滤波器采用状态  $\chi^2$  检验法来确定各子系统是否发生故障.状态  $\chi^2$  检验法利用两个状态估计的差异来对故障进行检测和隔离<sup>[7]</sup>:  $X_{V1}(k)$ 、 $X_{A1}(k)$  是由量测值  $X_V(k)$ 、 $X_A(k)$  经卡尔曼滤波得到的,  $X_{V2}(k)$ 、 $X_{A2}(k)$  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.

以 TV 故障的检测为例.  $X_{V1}(k)$ 、 $X_{V2}(k)$  可视为高斯随机向量,定义估计误差为:

$$e_1(k) = X_{V1}(k) - X_V(k)$$

$$e_2(k) = X_{V2}(k) - X_V(k)$$

$$\beta(k) = e_1(k) - e_2(k) = X_{V1}(k) - X_{V2}(k)$$

$\beta(k)$  的方差为:

$$\begin{aligned} T(k) &= E\{\beta(k)\beta^T(k)\} \\ &= E\{e_1(k)e_1^T(k) - e_1(k)e_2^T(k) \\ &\quad - e_2(k)e_1^T(k) + e_2(k)e_2^T(k)\} \end{aligned}$$

故障检测函数可选:

$$\lambda(k) = \beta^T(k) T^{-1}(k) \beta(k)$$

$\lambda(k)$  服从自由度为  $n$  的  $\chi^2$  分布,即  $\lambda(k) \sim \chi^2(n)$ .

故障判断准则为  $\lambda(k) > T_D$  有故障  
 $\lambda(k) \leq T_D$  无故障

其中  $T_D$  是预先设置的门限值,当限定误警率  $P_f = \alpha$  时,由  $P_f = P[\lambda_k > T_D | H_0] = \alpha$  解出的门限  $T_D$  可使漏检率  $P[\lambda_k \leq T_D | H_1]$  最小,故  $T_D$  可由要求的误警率  $P_f$  确定.

当传感器无故障时,  $\lambda(k)$  的均值为零.当  $\lambda(k)$  均值大于门限值  $T_D$  时,可确定为传感器故障,此时,故障传感器的测量数据将不能正确反映电力系统的运行状态,我们可以将此时局部滤波器的估计值按最优准则组合后,输入给主滤波器,得到一个最优的全局估计值,输入给保护系统,取代故障传感器的测量值,从而实现容错.

使用联邦滤波结构的卡尔曼滤波器较集中式滤波器有更强的容错性.联邦卡尔曼滤波是一种分块估计、两步级联的数据处理技术,其思路就是先分散处理,再全局融合.

### 3 应用举例

上述容错控制技术可应用于牵引供电系统的馈线保护中.

该保护系统的结构如图 4 所示,装置采用 ARM + DSP 的双 CPU 结构. ARM 处理器作为主 CPU 主要用于与变电站级的通信, DSP 则主要进行数据的采集、计算、逻辑判断.故障监控的主要计算工作也由 DSP 完成.

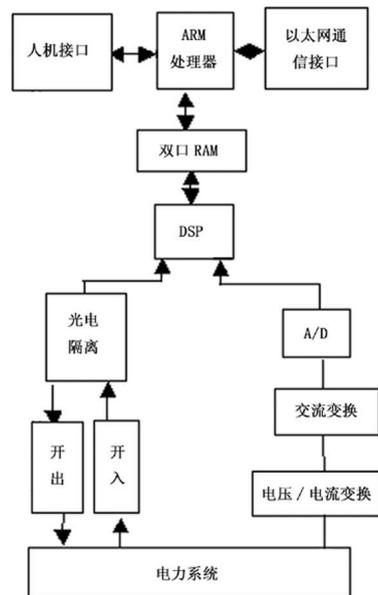


图 4 具有容错能力的微机馈线保护系统

该系统的输入设备由电压/电流互感器、交流变换、模数转换模块组成.由于采集的各信号之间具有一定的解析关系,可以构成解析冗余,故不选用投资较高的硬件冗余方法.该部分的容错采用上文所介绍的联邦卡尔曼滤波器来实现.当电压互感器或其通道出现问题时,利用另一未失效的传感器测量到的电流值,经滤波器得到电压的最优估计值,反馈给系统,避免因传感器的故障而引起的误动.

输出设备由一系列的执行继电器和断路器组成.对该部分的检测主要依靠测量执行机构的位置反馈信号和控制器的输出信号,然后进行比较来完成.如对断路器的检测,可以将该断路器所在线路的电流值作为反馈信号.若检测到该执行器的故障,则向 ARM 发出故障信息,再由 ARM 和其他部分进行通信,改由其他执行机构来切除掉该线路.

而对于控制部分计算机的容错,当前的研究已经比较成熟,计算机的可靠性已经可以达到控制系统的要求(连续无故障工作时间达到  $10^3$ h),另一方

面由于程序运行的独立性,故而对其采用冷备用.

采用这种方法,可以在不增加额外设备的情况下,充分利用保护系统中各设备及各信号之间的冗余关系,有效的提高保护装置的可靠性.

## 4 结论

容错技术的应用正在逐步的由原来的航空航天、核电、军事等领域向日常生活领域渗透<sup>[8]</sup>.将容错控制技术应用于微机保护系统,将有利于提高微机保护系统的稳定性,从而为电力系统的安全稳定运行提供强有力的保障.当前,容错控制在微机保护系统中应用的具体例子还不是很多,还有待于各方面的共同努力,以求最大程度的提高微机保护系统的可靠性.

## 参考文献:

- [1] 韩帧祥,曹一家.电力系统的安全性及防治措施[J].电网技术,2004,28(9):1-5.
- [2] 王福利,张颖伟.容错控制[M].沈阳:东北大学出版社,2003.
- [3] 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.
- [4] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [5] 李明,徐向东.用容错技术提高锅炉控制系统的可靠性[J].清华大学学报,1999,39(3):88-91.
- [6] 王志荣.抗恶劣环境计算机的冗余技术研究[D].哈尔滨工程大学,硕士学位论文,1999.
- [7] Brumaback B D, Srinath M D. A chi-square test for fault-detection in Kalman filters[J].IEEE Transactions on Automatic Control.1987,32(6):552-554.
- [8] 王仲生.智能容错技术及应用[M].北京:国防工业出版社,2002.

# Enhancing Reliability of Computer Protection System by Using Fault-tolerant Control

LUN Li, WANG Xun, CHENG Hong-bo

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China JiaoTongUniversity, Nanchan 330013, China)

**Abstract:** The basic principles and common methods of enhancing the microcomputer protection's reliability by using Fault-tolerant Control have been proposed, based on the analysis of the theory of Fault-tolerant Control. The sensor's Fault-tolerant Control of microcomputer protection system has been discussed intensively, and the working principle of its fault detection and fault tolerance is analyzed. For example, the feeder protection combined with Fault-tolerant Control of traction substation has been proposed. Fault-tolerant Control brings a new way for microcomputer protection to enhance its reliability.

**key words:** fault-tolerant control; fault detection and diagnosis; computer protection; reliability