

文章编号:1005-0523(2011)05-0018-05

容错控制在电力系统中的应用研究

程宏波, 吴文辉, 王 勋

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:在介绍容错控制基本思想的基础上,从容错控制的角度对提高电力系统可靠性的措施进行了分析,总结了电力系统中已有的用以提高可靠性的方法与容错控制之间的关系,综述了电力系统中容错控制方法的应用,分析了其面临的问题和将来的发展趋势,对容错控制在电力系统中的应用进行了展望。

关键词:电力系统;容错控制;故障检测;可靠性

中图分类号:TM774

文献标志码:A

社会的发展使得人们对电能的依赖越来越强,对电力系统的可靠性提出了更高的要求。当前电网互联,相互之间的依赖增强,使得电力系统的结构更加复杂,故障的发生不可避免。而电力系统一旦出现故障,将会造成巨大的社会、经济、政治影响。

容错控制(fault tolerant control, FTC)是一门高可靠性学科。所谓容错是容忍故障的简称,它通过对系统的设计,使得当一个或部分元件发生故障后,系统仍然能按原定性能指标或是性能指标略有降低但在可以接受的范围内运行,从而保证系统的正常运行^[1-2]。容错控制为提高复杂系统的可靠性开辟了一条新的途径,也为提高电力系统的可靠性提供了一种新的思路。

1 容错控制简介

容错控制是一门应用型边缘交叉学科,它的理论基础涉及现代控制理论、计算机工程、数理统计、信号处理、模式识别、人工智能以及相应的应用学科^[3]。容错控制的指导思想是一个系统一旦发生故障,而且这种故障会对系统的稳定性及性能有很大的影响时,要求闭环系统仍然是稳定的,并且满足要求的性能指标。

容错控制系统设计主要包含两个问题:故障诊断机构的设计和容错控制器的设计^[4-5]。故障诊断技术的发展为容错控制的研究提供了必要的基础和前提,容错控制为故障诊断的研究注入了新的活力,这两个方面以其重要的理论和实践上的意义以及由此产生的深远的影响成为了引人入胜的研究热点^[6]。

根据系统中处理故障和冗余的不同方式,容错控制系统可分为被动容错系统和主动容错系统^[7]。在被动容错控制系统中,系统可能发生的故障情况在控制系统设计之初就作为先验知识被考虑进去了,不需要在线获知故障信息,多采用的是鲁棒控制技术。而主动容错控制系统或者通过算法设计自适应地在线辨识故障参数,或者利用故障诊断机构获取故障信息,如故障发生的位置和故障的程度等。由于实际中复杂系统的建模工作极其艰难,因此使智能控制技术的研究成为了许多研究人员的兴趣所在,也进一步引起了基于人工智能的容错控制技术的研究热潮。

2 电力系统中容错控制的研究综述

虽然电力系统的发展要早于容错控制理论的发展,但作为一个复杂的大系统,电力系统的控制已自觉

收稿日期:2011-07-15

基金项目:江西省教育厅青年基金资助项目(GJJ11113);华东交通大学校立课题资助项目(09DQ05)

作者简介:程宏波(1979—)男,讲师,研究方向为牵引供电系统的故障诊断及智能控制。

或不自觉的应用到了容错控制的一些思想及方法。这些方法有些是从容错控制的角度出发来设计的,而有些则是在实际的应用中广泛使用,而未曾用容错控制的理论来描述的。

2.1 二次系统对一次系统的容错控制

电能的生产、输送与分配是电力系统的主要功能,它要依靠一次系统来完成,而一次系统中设备(元件)的故障是不可避免的,电力系统的保护为保证一次系统安全、可靠的完成任务提供了保障^[8]。从容错控制的角度来看,保护对于一次系统而言就是一种容错控制方法,只不过它的容错控制策略较为简单,就是把故障加以切除。保护系统较好的达到了容错控制的目的:当系统中某一部分发生故障后,让系统仍然保持稳定,而不至于崩溃。保护系统具有前文所述的容错控制系统的2个典型功能:①故障的检测,这是保护系统最基本也最重要的功能,是保护系统正确动作与否的前提,不同原理的保护对故障检测的方法可能有所不同,但任何保护都必然的具有这一功能;②故障后的容错,当检测到某一元件故障后,为避免故障范围的扩大,保护一般的处理方法是将故障元件切除,以保证整个系统的稳定和正常运行,实际上就是实现了故障的隔离。在很多情况下,对于瞬时性故障,一般还可以通过自动重合闸来再次完成系统的重构。通过上面的分析可以看出,保护系统实际上就是对电力系统的一种容错控制方法,它能保证当电力系统中部分元件出现故障后,系统仍能够正常运行,当切除的元件较多时,系统的性能指标可能有所下降。

2.2 一次系统内的容错控制

一次系统作为电力系统能量传输的重要通道,其元件对整个系统的运行起着至关重要的作用,对于一次系统中的重要元件,除了采用前述的保护方法之外,还有一些其他的容错控制方法:

1) 电厂的容错控制:作为电力系统中最重要、最复杂的环节,电厂的控制一直是研究的重点,也是电力系统中采用容错控制方法研究最多的地方。电厂发出的电能最重要的指标是电压和频率,为保证这两个指标的的稳定,电厂中采用了一些对应的控制系统:励磁控制系统和调速控制系统,在这两个控制系统中都有很多较为成熟的容错控制方法的应用^[9-10]。

容错控制在励磁控制方面的应用主要包括:①采用容错冗余技术设计双微机励磁系统提高励磁控制器的可靠性^[11];②在单机励磁系统的硬件电路中采取的一些技术措施以保证脉冲的可靠触发和提高抗干扰能力^[12];③引入附加反馈量 P_i , ω 和 V_i 归并到原励磁模型中,利用硬件冗余技术实现最优容错控制^[13];④增加 δ 和 Q 传感器,以减小测量信号的传感器故障对励磁系统稳定性的影响^[14];⑤采用模型参考自适应控制器(MRAC)和传统的电力系统稳定器(PSS)并行的容错控制方法^[15]等。

调速器的研究经历了从模拟式到微机式的转变,20世纪80年代初设计的微机式调速器还只是考虑了控制性能的设计,到80年代中后期,调速器的容错性设计被逐渐采用。将冗余、故障检测、故障定位、故障隔离、自修复和系统重构技术成功的应用于水电站的微机调速器中,大大提高了调速器的可靠性^[16-17];文献[18]采用双PT、双测频通道,粗、细调双通道数字阀组输出等方式,通过硬件冗余和控制重构相融合的方法确保了水轮机调速器无位置反馈信号时能实现控制器无扰切换和稳定运行。

从上面可以看出,由于用现代控制理论的方法研究电厂的控制系统较为成熟,在此基础上发展起来的电厂控制系统的容错控制方法多而且较为成熟。

2) 变电站的容错控制:除了前述的采用保护来实现对设备的容错控制之外,变电站中较多的采用硬件冗余的方式来实现容错控制的目的。它主要通过对一些比较重要的设备设置备用来实现,常用的有:变压器(一台工作,一台备用)、母线(双母线,旁路母线)、断路器(1:1备用,1:N备用)。当设备发生故障时,由备用的那台投入工作,取代故障设备的功能,以保证系统的正常。这种硬件冗余方法是容错控制中最简单也最有效的方法,该方法原理简单,但会增加系统投资,同时会使系统复杂性增加,而且,到了一定程度后,再靠采用硬件冗余来增加系统的可靠性将变得非常困难。

3) 输电线的容错控制:由于输电线的结构较为简单,除了故障切除之外,目前尚未见到有其他容错控制方法的报导。将容错控制思想和输电线的广域保护相集合,利用容错控制的思想指导广域保护的系

统重构(reconfiguration),以尽量减小故障的影响范围,应该是一个值得研究的方向。

除此以外,随着直流输电的发展,容错控制在直流输电特别是FACTS装置中的应用也日趋广泛。文献[19]介绍了美国新墨西哥州的一条200 MW的背靠背高压直流输电线路模块化容错控制系统的应用情况;文献[20]采用层叠式多级逆变器结构实现STATCOM的容错控制策略;文献[21]提出当静止串联补偿器的一个或多个传感器信号中断时,结合粒子群算法和PQ解耦方法实现容错控制,文献[22-23]则将神经网络和粒子群相结合实现容错控制。

2.3 二次系统内的容错控制

作为保证一次系统正常运行的重要屏障,二次系统本身的可靠性要求更高,容错控制的方法在其中的应用主要有:

1) 后备保护与主保护。当主保护因种种原因未动作时,后备保护动作来切除故障,后备保护是主保护的备用,从本质上讲后备保护实际是主保护的一种硬件冗余。

2) 保护及监控系统中硬件的容错。当今保护和监控系统大量的采用电子计算机作为核心部件,而计算机的容错一直是容错控制研究的重点,很多容错控制理论就是来源于计算机容错的研究^[24],因而这一部分中容错控制的方法使用较多,ABB公司带有三取二表决器的保护装置,多Agent系统^[25]等都是具有容错功能的系统。文献[26]对保护系统传感器故障的容错进行了研究,提出基于联邦Kalman滤波的传感器故障容错方法,文献[27]则采用解析冗余的方法对保护中互感器故障的检测及容错进行了研究。

3) 保护及监控系统软件的容错。计算机组成的保护及监控系统,其主要功能要依靠计算机软件来实现,因而其软件的容错也是十分重要的部分。计算机学科对软件容错的研究也较为成熟,电力系统的保护及监控直接使用,如程序的回卷、多道程序表决,信息的冗余编码(校验码、纠错码)等^[28]。

2.4 基于解析冗余的变电站互感器故障的容错控制

变电站中各互感器所反映的信息之间是相互关联的,文献[27]在变电站综合自动化系统的基础上,通过构造关联矩阵 G ,根据各互感器的实测值 $I=[i_1, i_2, i_3, \dots, i_N]^T$,得互感器的解析值 $\hat{I}=G \times I$,解析值 $\hat{I}$ 与互感器的实测值 I 之间形成解析冗余,可用于对互感器故障的检测及容错。其流程如图1所示。基于该方法的具体应用可参见文[27]。

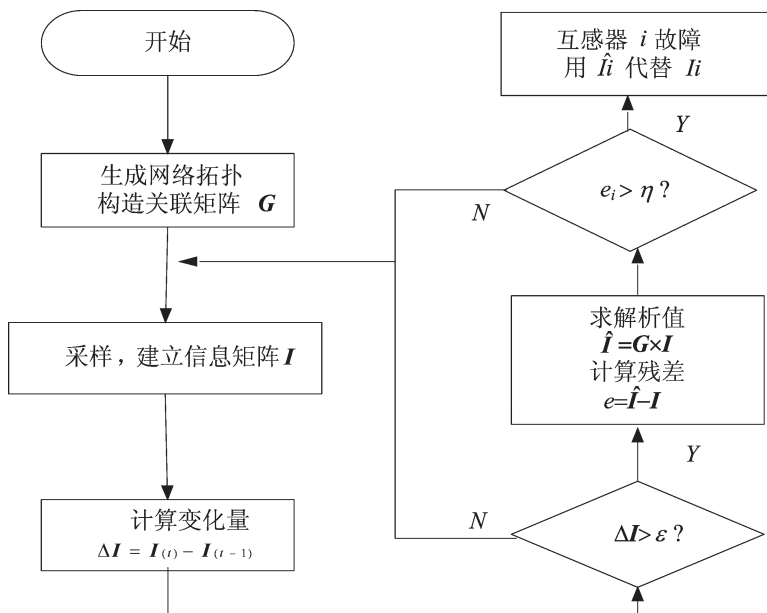


图1 基于解析冗余方法的变电站互感器故障的检测及容错流程图

Fig.1 Flow chart of fault detection and tolerant control of instrument transformer based on analytical redundancy method

3 存在的问题及发展趋势

作为一个动态非线性系统,电力系统中容错控制的应用主要面临如下问题:

1) 部分系统建模困难。容错控制的研究对象多为控制系统,控制系统的建模是应用容错控制理论的前提,由前述综述可以看到,发电厂的励磁控制及发电机的调速控制系统,因用现代控制理论方法研究较为成熟,相应的容错控制方法的应用成果也较多。而部分系统如保护系统,因其输出多为离散量,其状态方程建立较为困难,使得容错控制在其中的应用受到较大限制。

2) 应用方法缺乏理论指导。虽然电力系统中已经存在部分的容错应用,但缺乏系统理论的指导。系统理论的研究将有助于更多更好的容错方法在电力系统中得到应用。

3) 故障诊断研究较多,容错方法研究较少。电力系统无论是发电机、变压器等大型机电设备,还是输电线、电缆等联络部件,其故障诊断的研究都较为成熟,但更进一步的容错控制的研究还没有得到应有的重视。

目前,电力系统的容错控制研究尚处于起步阶段,未来应在以下几个方面加强研究:

1) 智能容错控制方法在电力系统中的应用。因为智能容错控制方法不需要精确的系统模型,可以解决非线性系统建模困难的问题,因而特别适宜于电力系统中的应用。

2) 与其他方法的结合。如模糊理论、人工神经网络、免疫算法等都可以与容错控制方法互相结合在一起,形成新的控制方法应用于电力系统中。容错控制与其他方法的结合,可以更有效的发挥各自的作用。网络化控制系统的容错。电力系统规模日趋扩大,其对应的控制系统日趋复杂,网络化控制系统的容错应是以后值得关注的重点。

3) 采用解析冗余代替硬件冗余。硬件冗余方法简单,但会增加系统投资,使系统复杂性增加。采用基于功能关系分析的解析冗余方法具有较大优势,特别在当前电力系统普遍实现数据共享的情况下,更是具有较大的实用价值。

4 结论

用容错控制的方法提高电力系统的可靠性具有重要意义,是保证电网安全、稳定、经济运行的有效手段,容错控制方法的研究已有30多年的历史,但在电力系统中的应用还有很多值得研究的地方。目前,容错控制在电力系统中的应用受到越来越多的重视,相关的研究取得了一定的成果,但还有许多问题有待解决。加强这方面的研究,将有助于未来加强智能电网的建设。

参考文献:

- [1] JIN JIANG. Fault-tolerant control systems——an introductory overview[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(1): 161-174.
- [2] CIESLAK J, HENRY D, ZOLGHADRI A. Fault tolerant flight control: from theory to piloted flight simulator experiments [J]. IET Control Theory Appl, 2010, (4)8: 1451-1464.
- [3] 胡昌华, 许化龙. 控制系统故障诊断与容错技术的分析和设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 10-12.
- [4] LIAO F, WANG J L, YANG G H. Reliable robust flight tracking control: an LMI approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(1): 76-89.
- [5] PATTON R J. Robustness issues in fault control[C]//Proceedings of International Conference on Fault Diagnosis, Toulouse, France, 1993: 1081-1117.
- [6] WU N E. Coverage in Fault-tolerant control[J]. Automatica, 2004, 40(4): 537-548.
- [7] ZHANG Y M, JIANG J. Fault-tolerant control system design with explicit consideration of performance degradation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 37(3): 133-136.
- [8] 贺家李. 电力系统继电保护原理与实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 87-94.
- [9] 张建华, 史运涛, 侯国莲, 等. 燃煤电厂协调控制系统故障诊断与容错控制应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24

- (8):175-179.
- [10] 于达仁,杨永滨,崔涛,等.大范围线性化最优鲁棒容错快关控制系统的设计[J].中国电机工程学报,2002,22(9):25-29.
- [11] 李善奎,邓思敏.电机励磁系统中的双微机控制[J].电气传动自动化,1999,21(4):50-53.
- [12] 赵涌,杨波,王春燕.励磁调节器的可靠性设计[J].自动化技术与应用,2007,26(2):118-120.
- [13] 杨永滨,于达仁,王建波.多变量PSS励磁控制器的最优容错设计[J].哈尔滨工业大学学报,1997,29(4):9-13.
- [14] 于达仁,毛志伟.基于直接反馈线性化的非线性励磁控制的容错性研究[J].电力系统自动化,1997,21(12):1-5.
- [15] REYES R I, MUDGETT D R, LEE K Y. Power system stabilization via additive multiple adaptive controller[C]//Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control, Honolulu, 1990:3077-3082.
- [16] 李朝晖,王泽龙,宫栗,等.三微机混合冗余容错模式及其在水轮机调速器中的应用[J].大电机技术,1998(1):60-64.
- [17] LI ZHAOHUI, YE LUQING, WEI SHOUPING, et al. Fault tolerance aspects of a highly reliable microprocessor-based water turbine governor[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1992, 7(1): 1-7.
- [18] 肖蕙蕙,刘伟,李山,等.水轮机调速器的智能故障诊断与控制研究[J].微计算机信息,2007,23(5):216-218.
- [19] STEMMLER H, TERENS L, DAHLER P. Redundant, fault tolerant programmable control system for back-to-back ties[J]. Brown Boveri Review, 1985, 72(11):509-515.
- [20] SONG WEN-CHAO, HUANG A Q. Control strategy for fault-tolerant cascaded multilevel converter based statcom[C]//Applied Power Electronics Conference, APEC 2007-Twenty Second Annual, Anaheim CA, 2007:1073-1076.
- [21] WEI QIAO, HARLEY R G, VENAYAGAMOORTHY G K. A faulttolerant p-q decoupled control scheme for static synchronous series compensator[C]//Power Engineering Society General Meeting, Calgary AB, 2006:8-15.
- [22] WEI QIAO, HARLEY R G. Fault-tolerant optimal neurocontrol for a static synchronous series compensator connected to a power network[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2008, 44(1):74-84.
- [23] WEI QIAO, HARLEY R G, VENAYAGAMOORTHY G K. Fault-tolerant control for sssc using neural networks and PSO[C]//Power Systems Conference and Exposition, Latin America, 2006:952-958.
- [24] 张利芬,袁普及.嵌入式冗余计算机的设计与实现[J].计算机工程,2009,35(2):230-232.
- [25] 孙辉,刘前进.一种新型MAS的配电网保护和制方案[J].电力系统保护与控制,2010,38(16):24-29.
- [26] 伦利,王勋,程宏波.用容错技术提高微机保护系统的可靠性[J].华东交通大学学报,2007,24(4):75-78.
- [27] CHENG HONGBO, WANG XUN. Fault detection and tolerance of instrument transformer based on substation integrated automation[C]. The International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE'10), WuHan, 2010:3733-3736.
- [28] 刘海清. 飞控计算机的容错研究与设计[D]. 上海:复旦大学,2009:23-26.

A Survey on Application of Fault Tolerant Control in Power System

Cheng Hongbo, Wu Wenhui, Wang Xun

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

Abstract: The basic ideas of fault-tolerant control have been introduced. Then, the relationship between the methods which have been used already in power system to improve reliability of power system and fault tolerant control has been analyzed. Fianally, the methods of fault-tolerant control used in power system have been reviewed. The problems and the future trend of the development of fault tolerant control used in power system have been discussed.

Key words: power system; fault tolerant control; fault detection; reliability