

容错控制在电力系统中的应用研究综述

李江^{1,2}, 李国庆²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 对容错控制在电力系统中的应用研究进行了综述, 简要回顾了容错控制的发展历程, 阐述了电力系统中容错控制研究的意义和价值, 分析了电力系统中应用容错控制的特点, 较全面地介绍了其在励磁系统、调速系统、高压直流输电系统、监控系统、FACTS 装置和继电保护装置中的应用研究现状。根据电力系统的特点和要求, 指出了容错控制研究目前存在的问题和未来发展方向。

关键词: 电力系统; 故障诊断; 容错控制; 可靠性

A survey on application of fault tolerant control in power system

LI Jiang^{1,2}, LI Guo-qing²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: This paper introduces the academic research of fault tolerant control(FTC) applied to power systems. Firstly, the survey of birth and development of FTC is stated. Then the works found in the literatures about FTC used in power systems are summarized, which is studied in excitation systems, governor systems, high voltage direct current (HVDC) transmission systems, supervisory and control systems, flexible AC transmission system (FACTS) devices and relay protection devices. Finally, considering the characteristics of complexity and requirements of power systems, both some existing problems and several important aspects needing further research are presented.

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

中图分类号: TM764.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0140-07

0 引言

容错控制是具有冗余能力的控制, 即某些部件发生故障后, 系统仍能按原定性能指标或性能指标略有降低的情况下安全地完成任任务^[1]。1971 年, Niederlinski 提出完整性控制的概念标志着容错控制思想的产生。1986 年, 在美国 Santa Clara 大学召开的自动控制国际会议上, 50 多位知名专家在“关于控制的挑战”的集体研究报告中, 容错控制被列为当今和未来的七个挑战性课题之一。容错控制作为一门新兴交叉学科, 和故障检测与诊断、鲁棒控制、自适应控制、智能技术、计算机技术、通信技术等有关。经过 30 多年的发展, 容错控制在航空、航天、化工、核能等领域的应用研究中取得了丰硕成果^[2-4]。

随着电力系统规模的不断扩大, 各种新设备的不断投入与使用, 使得系统的复杂程度明显增加。为提高电力系统运行的安全性与可靠性, 自 90 年代中期以来, 容错控制逐渐成为电力系统中重要的研

究内容。

电力系统中所有的设备是相互关联的一个整体, 传感器、执行器、通信网络以及电网自身都可能发生故障, 这些故障若不加以正确处理将可能导致更严重故障的发生, 甚至危及整个系统。因此, 在这样一个广域系统中对各环节采用必要的容错控制技术将是提高整个电力系统可靠性的有效途径。

1 电力系统中容错控制的特点

研究容错控制必然涉及到故障诊断, 这是因为故障诊断是容错控制的基础。目前, 这两个方面都已成为了引人入胜的研究热点^[2]。

电力系统是一个复杂的广域系统, 时间及空间分布广泛, 其故障诊断和容错控制具有与其他独立控制系统不同的特点:

(1) 故障的范畴宽

传统的电力系统故障诊断指通过利用有关电力系统及其保护装置的知识 and 信息来识别故障的位置和类型, 其中故障元件的识别是关键问题^[5]。文献

[5]总结了电力系统故障的智能诊断方法,文中的故障只涉及传统意义上的电网故障。而随着计算机技术和网络技术的广泛应用,计算软件和网络传输故障引起电网故障的漏判和错判现象也时有发生^[6-7]。针对这种情况,文献[8]研究了在电力系统状态估计过程中,可能会出现计算机硬件故障(暂时和永久故障)和软件故障(缓冲器溢出等)引起的错误,提出将容错算法(Algorithm Based Fault Tolerant, ABFT)应用于高斯消去法的系数矩阵中,通过误差分析推出舍入误差的上界,校正计算过程中的不变量,避免软件故障引起误报警。文献[9]将容错算法应用在电力系统潮流计算的LU分解算法中,用累加和方法检测潮流计算中出现的软件故障。潮流计算和状态估计是电力系统稳定和控制的重要基础性数据,这类软件故障必须予以考虑,否则后果严重。因此,考虑到系统的复杂性,容错控制研究的故障应该包括硬件故障和软件故障,这扩展了传统电力系统故障的范畴。从这个意义上说,容错控制所研究的故障主要有:传感器故障、操作机构故障、电网故障、计算机故障和软件故障等。

(2)控制对象间的相互影响复杂

电力系统是一个开放的复杂系统,具有结构上多层、空间上高维及运动方式上层间交互作用的特点^[10]。电网中的故障一般始于局部而作用于整体,这使得控制对象不仅仅是局部还必须考虑整个系统。这种复杂性、非线性、时变性和不确定性使得某些机理至今还不能被人们所了解。因此,获得系统全部信息,达到安全稳定控制几乎是不可能的,这也是电力系统同其它独立小系统(如飞机、机器人等)的显著区别。

2 电力系统中容错控制的研究现状

目前,容错控制基本形成了两类方法:被动容错控制和主动容错控制。被动容错控制在设计控制器时预先考虑了一些部件故障情况,不需要在线故障诊断信息,主要是利用鲁棒控制技术使得闭环控制系统对某些故障不敏感,不需要在线调整控制律和控制器参数。与被动容错控制系统不同,主动容错控制系统在故障发生后,能够主动对故障做出反应,通过对控制器参数的调整,改变控制器结构等对控制律进行重构,从而维持整个系统的性能。控制律重构的目标是使重构后的系统在性能上尽量接近原系统,其基本要求是原系统本身要具有一定的冗余性^[2]。由于主动容错系统比被动容错控制系统更具设计弹性且更有应用价值,因此前者研究较

多^[2,11-12],后者研究较少^[13]。

以下将分六部分对容错控制在电力系统中的研究现状进行介绍。

(1)励磁系统的容错控制

现代大型同步发电机组励磁控制的主要目标包括:调节机端电压,提供振荡阻尼,提高系统稳定性和调节无功功率等。从励磁系统的发展来看,从50年代的自动电压调节器(Automatic Voltage Regulator, AVR)励磁控制方式到60年代的“AVR+PSS”励磁控制方式,到70年代末的线性最优励磁控制,再到80年代基于微分几何理论的非线性最优励磁控制方法的提出和成功应用,使得励磁控制研究随着自动控制理论的发展而发展,而容错控制则是这些控制方法的进一步深入。

励磁控制设计一般包括两方面:一是励磁电压控制设计,二是PSS设计。其中,励磁电压控制是电力系统暂态稳定控制中最有效、最经济的手段,长期以来都是各种控制理论和方法在电力系统中应用的“试金石”。容错控制在励磁控制方面也取得了一些成果,文献[11]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;文献[14]从保证脉冲的可靠触发和提高抗干扰能力等方面着手,介绍了在单机励磁系统的硬件电路中采取的一些技术措施与效果;文献[15]提出引入附加反馈量 P_t 、 ω 和 V_t 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;文献[16]通过分析测量信号的传感器故障对励磁系统稳定性的分析,提出增加 δ 和 Q_e 传感器的容错控制策略;文献[17]则系统地提出了一种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。

(2)调速系统的容错控制

原动机水/汽门开度控制又称为调速控制,其主要任务是:当电力系统内各发电机组的转速出现偏差时,通过水/汽门开度调节器相应地改变原动机的输出功率,使原动机与发电机之间的力矩达到平衡,以维持发电机转速(或频率)在一定安全范围内。

调速器对电力系统频率稳定和安全运行都具有重要作用。调速器的研究经历了从模拟式到微机式的转变,80年代初设计的微机式调速器还只是考虑了控制性能设计,到80年代中后期,调速器的容错性设计被逐渐采用。文献[18]采用一种可用于微机调速器的容错频率测量方法;文献[19]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;文献[20]采用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。

(3) 高压直流输电 (HVDC) 的容错控制

高压直流输电由于具有稳定性强、损耗小、长距离线路成本低等优点已被许多国家采用。文献[21]综合比较了高压直流输电与高压交流输电的多项性能指标,综述了其在各国的应用情况。文献[22]运用神经网络方法对高压直流输电各种系统故障的检测和分类方法进行了仿真研究;文献[23]报告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[24]则对高压直流输电系统可靠性的评估方法进行了综述。

(4) 监控系统的容错控制

大型发电厂在电力系统稳定运行中具有重要作用,由于电厂现场环境复杂,很容易发生信号通道的断路、短路或传感器失效等故障,因此电厂的监控系统都要求具有一定的容错控制功能。文献[25]对水电站 2N 和 (N+M) 容错模型的可靠性和经济性进行了综合比较,指出 (N+M) 模型的优越性,最后给出了确定控制器数目的优化方法;文献[26]介绍西门子公司生产的一套具有容错功能的发电厂计算机监控系统;文献[27]在热控设计中引入容错逻辑方法提高了热控保护系统的可靠性;文献[28]基于多模型自适应滤波技术和线性二次型最优控制提出电厂锅炉汽机协调控制系统的故障诊断和容错控制方案;针对发电厂高可靠性的要求,国内外学者还应用容错技术开发出了高可靠性的工业微机系统^[29-31]。实践表明,大量的事故其实也是可以通过容错技术避免的^[27,32],当大量信号涌入系统中,将容错控制策略应用于监控系统的各个层面,可以提高电厂运行的可靠性。

从整体来看,电力系统除了一个庞大的电网络系统之外,还有一个复杂的通信网络控制系统,它对系统性能的影响也举足轻重。这是因为,调度部门的控制指令(如自动发电控制系统)必须依赖通信网络传递,从而形成了网络控制系统。目前网络控制系统的研究包括两个部分:一是先进控制策略的设计与性能分析;二是设计有效的网络调度策略。先进控制策略就是需要发展适用于异步的、基于信包的控制系统控制理论与技术,保证系统良好,而有效的网络调度策略能够提高通信质量,减少网络延迟、数据丢包、误码以及错序等现象对网络控制系统的影响,从而进一步提高控制系统的性能。

在设计网络化控制策略方面,文献[33]将网络化控制系统基于数学模型的故障诊断问题转化为一类特定的时延系统故障诊断问题;文献[34]利用策

略表和表决机制保证控制系统的容错性;文献[35-36]则对负荷频率控制的容错控制进行了深入研究。

在设计网络调度策略方面,文献[37]建议采用 SCADA 的热备用方式提高通信系统的可靠性;文献[38]建立了广义的电力系统多代理信息模型,通过“信息群发和转发”将多代理系统自治、智能、交互的特点和信息学理论相融合,以实现后紧急控制系统容错功能,通过信息量损失最小决策原理对信息进行辨识决策以满足信息容错的要求,同时通过各个代理之间的交互协议内容的定制和解析以满足信道容错的要求;文献[39]通过分析 1979 年北美电力可靠性委员会报道的 162 次扰动事件,为克服现有通信网络的缺点提出了多通道的网络体系;文献[40]针对美加电网的通信网络提出了具有容错功能的网络拓扑结构。

(5) FACTS 装置的容错控制

FACTS 装置包括: SVC、STATCOM、SSSC、TCSC 和 UPFC 装置等^[41]。经过多年发展,这些装置已经在提高系统暂态稳定性方面发挥了重要作用。文献[42]采用层叠式多级逆变器结构实现 STATCOM 的容错控制策略;文献[43]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[44-45]则将神经网络和粒子群相结合实现容错控制;文献[46]研究了故障条件下 UPFC 的特性,文献[47]进一步仿真了 UPFC 在故障恢复模式中的容错控制策略和控制效果;还有一些学者对有源滤波器和桥电路重构的容错控制进行了深入研究^[48-49]。

(6) 继电保护装置的容错控制

装设继电保护装置的目的就是当系统发生故障时,切除故障部分,并满足选择性、灵敏性、快速性和可靠性的“四性”要求。但是,继电保护装置本身不可避免的也会发生误动和拒动现象。针对这种情况,文献[50]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相结合,实现微机保护传感器故障的容错控制。其主要思想是: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一定控制性能。国外学者在继电保护的容错控制方面也取得了一些类似的研究成果^[51-52]。

值得一提的是,一些大的停电事故表明局部故障常会导致许多继电保护装置相继动作,继而引起

一系列线路和电源的连锁反应跳闸,并最终发展为系统的解列、频率或电压崩溃^[10]。而利用智能容错控制方法对故障正确诊断与隔离,避免大量继电保护装置连锁故障将是防止大停电事故的重要措施。

3 电力系统的容错控制研究存在的问题和发展方向

3.1 目前存在的问题

虽然容错控制已经有 30 多年的发展历史,但在电力系统的应用研究中仍存在很多问题需要解决,主要包括:

1) 异类故障解耦研究不足

目前,对于故障诊断的研究,传感器与执行器是分开考虑的。传感器故障诊断的前提是假设执行器和电网处于完好的状态,但实际运行中,这种假设有很大的局限性。传感器、执行器和电网故障如何解耦有待于深入研究。

2) 智能化水平不均衡

目前,对于电力系统故障诊断的研究比较充分,而对于传感器和执行器故障诊断的研究不足。故障诊断是容错控制的前提,现有的电力系统一次故障的诊断技术/方法主要有专家系统、人工神经网络、优化技术、Petri 网络、模糊集理论、粗糙集理论、多代理技术等^[5]。而针对传感器和执行器的故障诊断方法从目前的资料来看只有人工神经网络和专家系统,在智能方法使用的广度和深度上远不及电力系统一次故障诊断的研究。而多类型故障的故障诊断方法研究不足限制了容错控制的应用。

3) 协调控制水平不高

局部故障需要电网支援的资源越多越好,但目前电网的协调控制研究不足,限制了容错控制的发展。有理由相信,电网各部分装置若利用智能方法协调控制将有效减少装置的误动和连锁事故的发生,从而阻止发生大面积停电事故。

4) 优化算法的应用受到限制

电力系统作为一个复杂的非线性被控对象,故障诊断需要复杂的智能算法,这占用了计算机的大量资源,留给容错控制算法的资源不多,而计算精度与优化的容错控制存在着巨大矛盾,这需要多学科交叉共同予以解决。

5) 网络化控制策略研究不足

在对广域系统实施网络化控制中,必须要考虑到容错控制方法的应用,否则可能产生严重后果^[53],文献[54-55]研究了数据包丢失,网络延时,采样不同步等诸多网络容错控制方法,但距离实际

应用还有一段距离。

3.2 未来的发展方向

目前,电力系统的容错控制研究尚处于起步阶段,未来的发展主要有以下几个方面:

1) 电力系统作为一个复杂的大系统,针对不同类型故障采用不同智能方法是提高故障诊断和容错控制水平的有效手段。

2) 研究基于容错控制的继电保护装置和协调控制策略将减少发生连锁性事故的机率。

3) 软件算法越来越复杂,算法的可靠性应该成为能否实际应用的重要指标^[56]。

4) 通信网络在带来方便的同时也会带来新问题,建立可靠的网络结构以及与之适应的网络化控制策略将是亟待解决的现实问题。

4 结束语

电力系统是一个复杂的大系统,传感器、执行器、通信网络和电网本身都可能发生故障,对故障进行检测、诊断和隔离,实施容错控制是提高电力系统可靠性的有效途径。目前,电力系统的容错控制研究已经取得了一些成果,也遇到了许多理论性问题,距离实际应用还有许多工作要做,有些问题可以借鉴其他领域的方法予以解决^[57-58],有些问题还需要进一步深入研究。有理由相信,随着研究的深入,容错控制这种智能方法将会被大量应用到电力系统中,为建设更具弹性的坚强电网发挥重要作用。

参考文献

- [1] 齐俊桐,韩建达. 旋翼飞行器机器人故障诊断与容错控制技术综述[J]. 智能系统学报, 2007, 2(2): 31-39.
QI Jun-tong, HAN Jian-da. Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control of Rotorcraft Flying Robots: a Survey[J]. CAAI Trans on Intelligent Systems, 2007, 2(2): 31-39.
- [2] 胡寿松,刘亚. 复杂工程系统的可靠控制[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(2): 34-40.
HU Shou-song, LIU Ya. Reliable Control for Complex System[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(2): 34-40.
- [3] Stengel R F. Intelligent Failure-tolerant Control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1991, 11: 14-23.
- [4] Patton R J. Fault-tolerant Control: the 1997 Situation[A]. in: IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision, Safety for Technical Processes[C]. 1997. 1033-1055.
- [5] 郭创新,朱传柏,曹一家,等. 电力系统故障诊断的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8):

- 98-103.
GUO Chuang-xin, ZHU Chuan-bai, CAO Yi-jia, et al. State of Arts of Fault Diagnosis of Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 90-103.
- [6] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-6.
XUE Yu-sheng. The Way from a Simple Contingency to System-wide Disaster——Lessons from Eastern Interconnection Blackout in 2003 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-6.
- [7] 李再华, 白晓民, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 1-4.
LI Zai-hua, BAI Xiao-min, DING Jian, et al. Analysis of the Western Europe Blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 1-4.
- [8] Mishra A, Mili L, Phadke A G. Algorithm Based Fault Tolerant State Estimation of Power Systems[A]. in: 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems[C]. 2004. 174-179.
- [9] Chen Y, Han J Y. Algorithm-based Fault Tolerance in Computation of Power Flow[A]. in: Proceedings of the 33rd Midwest Symposium on Circuits and Systems[C]. 1990. 151-154.
- [10] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 电力系统灾变防治研究中的一些问题[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 7-12.
YANG Wei-dong, XU Zheng, HAN Zhen-xiang. Some Problems in the Research of Power Systems of Collapse Prevention[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 7-12.
- [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.
LI Shan-kui, DENG Si-min. The Double Micro-computer Controlling in Dynamo Magnetizing System[J]. Electrical Drive Automation, 1999, 21(4): 50-53.
- [12] El-Skarkawi M A, Marks II R J. Missing Sensors Restoration for System Control and Diagnostics[A]. in: The 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives[C]. 2003. 338-341.
- [13] 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.
YU Da-ren, YANG Yong-bin, CUI Tao, et al. Optimal Robust Fault-tolerance Fast Valving Control System Design via Large-scale Linearization[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 25-29.
- [14] 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.
ZHAO Yong, YANG Bo, WANG Chun-yan. Reliability Design for Excitation Regulators[J]. Techniques of Automation and Applications, 2007, 26(2): 118-120.
- [15] 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.
YANG Yong-bin, YU Da-ren, WANG Jian-bo. The Optimal Fault-tolerant Design of Multivariable PSS Excitation Controller[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(4): 9-13.
- [16] 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.
YU Da-ren, MAO Zhi-wei. A Study of Fault Tolerance of Nonlinear Excitation Control Based on the Direct Feedback Linearization[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12): 1-5.
- [17] Reyes R I, Mudgett D R, Lee K Y. Power System Stabilization via Additive Multiple Adaptive Controller[A]. in: Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control[C]. 1990. 3077-3082.
- [18] Malik O P, Hope G S, Hancock G C, et al. Frequency Measurement for Use with a Microprocessor-based Water Turbine Governor[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 6(3): 361-366.
- [19] LI Zhao-hui, YE Lu-qing, WEI Shou-ping, 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.
- [20] 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.
XIAO Hui-hui, LIU Wei, LI Shan, et al. The Fault Diagnosis and Control Study of Hydrogovernor[J]. Control & Automation, 2007, 23(5): 216-218.
- [21] Rudervall R, Charpentier J P, Sharma R. High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper[J]. Energy Week, 2000.
- [22] Narendra K G, Sood V K, Khorasani K, et al. Application of a Radial Basis Function (RBF) Neural Network for Fault Diagnosis in a HVDC System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1): 177-183.
- [23] 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.
- [24] Sotr us J, Bertling L. Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems[A]. in: Proceedings 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)[C]. 2008. 1-8.
- [25] YE Lu-qing, WANG Sheng-tie, BING Feng-shan, et al.

- Control/ Maintenance Strategy Fault Tolerant Mode and Reliability Analysis for Hydro Power Stations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 340-345.
- [26] 张英, 赵晓安, 高建民. 基于西门子 S7-400 有容错功能的发电厂计算机监控系统[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(1): 26-27.
ZHANG Ying, ZHAO Xiao-an, GAO Jian-min. Siemens S7-400-based Fault Tolerant Computer Monitoring and Control System for Power Plants[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2006, 30(1): 26-27.
- [27] 朱北恒, 尹峰, 孙耘, 等. 火电厂开关量控制系统的逻辑优化[J]. 中国电力, 2007, 40(10): 60-62.
ZHU Bei-heng, YIN Feng, SUN Yun, et al. The Logic Optimization for On-off Control System in Thermal Power Plant[J]. Electric Power, 2007, 40(10): 60-62.
- [28] 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.
ZHANG Jian-hua, SHI Yun-tao, HOU Guo-lian, et al. Research on Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control of the Coordinate Control System in Coal-fired Power Plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 175-179(in Chinese).
- [29] 刘果. 汽轮发电机计算机容错控制系统的设计[J]. 测控技术, 1996, 15(6): 47-51.
LIU Guo. A Turbine Control System with Fault Tolerant Microprocessor Based Controller[J]. Measurement & Control Technology, 1996, 15(6): 47-51(in Chinese).
- [30] 李朝晖, 郝后堂, 吴祚滨, 等. 巨型机组工业微机励磁调节器多通道混合冗余容错技术的研究[J]. 大电机技术, 2001, 1: 60-64.
LI Zhao-hui, HAO Hou-tang, WU Zuo-bin, et al. A Industrial Microcomputer-based Multi-channel Hybrid Redundant Fault-tolerant Excitation Regulator for Synchronous Electric Generator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001, 1: 60-64(in Chinese).
- [31] Wensley J H. Fault Tolerant Techniques for Power Plant Computers[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(1): 100-106.
- [32] 王东风, 韩璞, 曾德良. 单元机组协调控制系统发展和现状[J]. 中国电力, 2002, 35(11): 69-73.
WANG Dong-feng, HAN Pu, ZENG De-liang. Development and Present Status of Unit Coordinated Control System[J]. Electric Power, 2002, 35(11): 69-73(in Chinese).
- [33] 方华京, 章红英, 谢林柏, 等. 网络化控制系统的故障诊断与容错控制[J]. 控制工程, 2005, 12(S1): 167-170.
FANG Hua-jing, ZHANG Hong-ying, XIE Lin-bo, et al. Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control for Networked Control System[J]. Control Engineering of China, 2005, 12(S1): 167-170(in Chinese).
- [34] 牟宏, 邱夕兆, 马志波. 山东 500 kV 电网安全稳定控制系统[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 45-47.
MOU Hong, QIU Xi-zhao, MA Zhi-bo. Security and Stability Control System of Shangdong 500kV Power Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 45-47(in Chinese).
- [35] Casavola A, Franze G, Sorbara M. Fault Tolerance Aspects in Networked Multi-area Power Systems[A]. in: Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA '06)[C]. 2006. 695-702.
- [36] Alessandro C, Giuseppe F, Michela S. A Supervisory Control Strategy for Fault Tolerance Enhancement in Networked Power Systems[A]. in: American Control Conference[C]. 2007. 4762-4767.
- [37] Ge P, Li X, Xu W, Tang G. Mutual Fault-tolerant and Standby SCADA System Based on MAS for Multi-area Centralized Control Centers[A]. in: 2006 International Conference on Power System Technology[C]. 2006. 1-5.
- [38] 陈中, 杜文娟, 王海风, 等. 后紧急控制多代理信息系统容错技术[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 17-21.
CHEN Zhong, DU Wen-juan, WANG Hai-feng, et al. Fault Tolerance Technology of Multi-agent Information System in Post-emergency Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 17-21(in Chinese).
- [39] Xie Z, Manimaran G, Vittal V, et al. An Information Architecture for Future Power Systems and Its Reliability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 857-863.
- [40] Al-Ammar E, Fisher J. Resiliency Assessment of the Power System Network to Cyber and Physical Attacks[A]. in: Power Engineering Society General Meeting, IEEE[C]. 2006. 1-7.
- [41] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. Modern Power System Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003(in Chinese).
- [42] SONG Wen-chao, Huang A Q. Control Strategy for Fault-tolerant Cascaded Multilevel Converter Based STATCOM[A]. in: Applied Power Electronics Conference, APEC 2007-Twenty Second Annual[C]. 2007. 1073-1076.
- [43] WEI Qiao, Harley R G, Venayagamoorthy G K. A Fault-tolerant P-Q Decoupled Control Scheme for Static Synchronous Series Compensator[A]. in: Power Engineering Society General Meeting[C]. 2006. 8-15.
- [44] 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.
- [45] Wei Qiao, Harley R G, Venayagamoorthy G K. Fault-tolerant Control for SSSC Using Neural Networks and PSO[A]. in: Power Systems Conference and Exposition[C]. 2006. 952-958.
- [46] Deepak K, Ilango G S, Nagamani C, et al. Performance of UPFC on System Behavior Under Fault Conditions[A]. in: INDICON, 2005 Annual IEEE[C]. 2005. 505-509.
- [47] Dejvies J, Green T C. Control of a Unified Power Flow Controller in Fault Recovery and with Harmonic Filter[A]. in: Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives[C]. 2000. 530-535.
- [48] 王旭, 臧义, 徐彬, 等. 基于开关管的级联 H 桥逆变器故障处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 76-82.
- WANG Xu, ZANG Yi, XU Bin, et al. Research on Switch-based Control Method for Cascaded H-Bridge Inverter Failures[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 76-82(in Chinese).
- [49] Ribeiro R L A, Profumo F, Jacobina C B, et al. Two Fault Tolerant Control Strategies for Shunt Active Power Filter Systems[A]. in: IECON'02[C]. 2002. 792-797.
- [50] 程宏波, 王勋, 伦利. 微机保护传感器故障的一种容错控制方法[J]. 继电器, 2007, 35(19): 1-5.
- CHENG Hong-bo, WANG Xun, LUN Li. Sensors' Fault Tolerant Control of Microcomputer-based Relay Protection[J]. Relay, 2007, 35(19): 1-5.
- [51] Ferrero A, Ottoboni R. Towards Fault-tolerant Relaying Digital Power System Protection[J]. Energia Elettrica, 1992, 69(4): 153-158.
- [52] Waikar D L. Design of Fault Tolerant Logic for Digital Relaying[A]. in: International Power Engineering Conference[C]. 1993. 590-595.
- [53] 刘维烈. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- LIU Wei-lie. Frequency Regulation and AGC in Power Systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [54] 孙德辉. 网络化控制系统-理论、技术及工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- SUN De-hui. Networked Control Systems-theory, Technology and Application[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2008(in Chinese).
- [55] 岳东, 彭晨, HAN Qing-dong. 网络控制系统的分析与综合[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- YUE Dong, PENG Chen, HAN Qing-dong. Analysis and Synthesis of Networked Control Systems[M]. Beijing: Science Press, 2007(in Chinese).
- [56] Su Sheng, Chung C Y, Wong K P, et al. Fault Tolerant Differential Evolution Based Optimal Reactive Power Flow[A]. in: Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics[C]. 2006. 4083-4088.
- [57] 张兰红, 胡育文, 黄文新. 采用瞬时转矩控制策略的异步发电系统的容错研究[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 567-573.
- ZHANG Lan-hong, HU Yu-wen, HUANG Wen-xin. Tolerant Research of the Induction Generation System Based on ITC Strategy[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 567-573.
- [58] Gudea D D, Barany F. Fault Tolerant Power Controller[A]. in: IECEC-89[C]. 1989. 231-237.

收稿日期: 2009-03-03

作者简介:

李江(1979-), 男, 博士研究生, 助教, 研究方向为饱和系统的分析与控制; E-mail: lijiaang@mail.nedu.edu.cn

李国庆(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统安全性分析与控制、配电系统自动化等领域的理论与应用研究工作。

许继集团荣获国家科技进步一等奖

2010年1月11日上午,在北京人民大会堂隆重举行了2009年度国家科学技术奖励大会。会上,许继集团参与研制的“超高压直流输电重大成套技术装备开发及产业化”项目荣获国家科学技术进步一等奖。

“超高压直流输电重大成套技术装备开发及产业化”项目是国家科技攻关、国家重大技术装备成套设备研制和国家产业化重大科技项目,属于国际电工行业的前沿技术。该技术的研究和应用,对我国直流输电成套设备技术升级,打破国外公司市场垄断和技术壁垒,实施国家电力资源优化配置、保障国家电力安全,促进社会和经济的发展具有重要意义。通过参与“超高压直流输电重大成套技术装备开发及产业化”项目,国内企业成功研发出超高压直流输电关键技术,打破了外国垄断,建立起国家直流输电成套设备技术标准体系。

在国家科技部、发改委及省政府、省科技厅等相关机构的大力支持下,许继集团承担了超高压直流输电控制保护和换流阀设备的研制任务,组建了上百人的专业团队,耗资2亿多元资金,历时5年,研制的超高压直流输电控制保护设备先后在“灵宝背靠背”、“贵广二回”、“高岭背靠背”等超高压直流工程中成功运行,不仅有效提高了我国直流工程的国产化率和技术水平,还降低了工程造价,保障了国家经济命脉的安全运行。

“超高压直流输电重大成套技术装备开发及产业化”是拥有完全自主知识产权的项目,我国同类项目从此可以完全摆脱进口,实现国产化,大大提升企业核心竞争力,国家工程投资项目从此可节省50%。