

模糊神经网络及其在电力系统中的应用研究

叶其革¹, 王晨皓², 吴捷¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东邮电职业技术学院, 广东 广州 510630)

摘要: 阐述了神经网络、模糊理论、模糊神经网络、遗传算法等分支的技术发展, 优、缺点及它们相互之间的结合, 接着论述了模糊神经网络在电力系统中电厂的过程控制、电力系统稳定器、励磁控制、重合闸、继电保护及灵活交流输电系统等领域的应用研究的现状及前景。

关键词: 遗传算法; 模糊神经网络; 电力系统

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)11-0071-07

0 引言

智能模拟^[1]就是用一个智能工程系统来模拟人或高级动物的智能行为。研究智能及智能模拟的目的在于制造出一种“智能”机器, 让“智能”机器完成需要由人类智能完成的工作, 纵观智能模拟的研究历史, 智能模拟的研究一开始就分为两个学派: 心理学派、生理学派。心理学派侧重研究心理模式: 心理模式是从认知心理学和行为心理学出发, 通过宏观剖析人脑的记忆功能与思维机制, 然后建立起对人类智能行为的模拟模式; 而生理学派侧重研究生理模式: 生理模式是从神经生理学、脑科学的角度出发, 通过微观剖析人脑神经网络的结构和功能, 从而构造人工智能的模拟模式。生理学派集中在对神经网络、模糊技术及遗传算法的研究。

1 模糊神经网络

1.1 人工神经网络技术

1943年心理学家 W. McCulloch 和数学家 W. Pitts 提出形式化神经元模式, 开创了神经网络理论的研究时代, 十年后 Rosenblatt 提出具有简单学习能力的层状网络——感知器, 掀起对人工神经网络的研究热潮, 目前已出现一百多种的神经网络模式, 其构造方法是多种多样的, 有出于热力学、数学等方法, 也有出于模糊推理、统计学等方法, 但是工程技术研究人员的兴趣更侧重于有规则的网络结构的神经网络: 如 Rosenblatt 提出的感知器 (Perceptron); Rumelhart 等人提出的多层非线性网络模型 (BP); Ivakhnenko 提出的 GMDH 模型; Powell 提出的 RBF 网络; Hopfield 提出的 Hopfield 反馈网络; Cohen 和 Grossberg 提出的 CG 网络模型; Anderson 等人提出的盒中脑网络 (BSB); B. Kosko 提出的双向联想记忆网

络 (BAM); Pineda 等提出的回归 BP 网络; G. E. Hinton 等提出的 Boltzmann 机网络; T. Kohonen 提出的自组织神经网络; Albus 提出的小脑模型关节控制器 (CMAC)。目前神经网络理论及技术^[4,5,10]的研究正如如火如荼地进行着, 这将给生理模式学派带来生机与活力。

1.2 模糊理论

1965年, 美国加州大学柏克莱分校教授 L. A. Zadeh 发表了开创性论文《Fuzzy Set》, 首次提出模糊集合的基本概念及基本理论后, 一门新学科——模糊理论应生活与科学的需要而诞生。之后人们将其模糊集理论推向人工智能方面的应用。1974年 E. H. Mandani 将模糊逻辑应用到蒸汽发电机的压力和速度控制, 从而开创模糊理论应用研究的先河, 接着模糊理论在工业、电力、航天、经济等领域的研究纷纷展开。

1.3 模糊神经网络

在神经网络理论及模糊理论的研究日渐向上时, 神经网络及模糊理论的各自缺点也暴露出来。神经网络虽有学习能力、自适应能力、自组织能力、容错能力和修正能力等优点, 但很难实现逻辑思维, 无法把形象思维转化为语言表达; 模糊理论虽以模糊逻辑为基础, 能实现人类思维的模糊性, 但无学习能力, 由此看来只有把具有学习能力和容错能力的神经网络技术与具有形象思维和逻辑推理的模糊理论结合起来, 才能给生理学派的研究带来更大的收获, 而这一结合势必产生一种新的研究方向——模糊神经网络。1974年, S. C. Lee 和 E. T. Lee 在 Cybernetics 杂志上发表了“Fuzzy sets and neural networks”一文, 首次把模糊集和神经网络联系起来; 1975年, 他们在 Math. Biosci 杂志上发表了“Fuzzy neural networks”一文, 展开对模糊神经网络的研究。1985年,

J. M. Keller 和 D. Huut 提出把模糊隶属函数和感知器算法相结合,突破感知器无法实现复杂逻辑的局限。之后随着人们对神经网络与模糊系统的互补性的深入了解,模糊神经网络的研究如雨后春笋般出现,今天,我们可以看到许多有关模糊神经网络理论及其应用研究成果的报道^[32],如 1989 年 T. Yamakawa 提出了具有模糊权系数且输入信号为实数的初始模糊神经元,1992 年, T. Yamakawa 又提出了新的模糊神经元,其每个输入端是模糊权系数和实权系数串联的集合;同年, K. Nakamura 和 M. Tokunaga 也分别提出了与 T. Yamakawa 的新模糊神经元类同的模糊神经元; D. Nauck 和 R. Kruse 提出用单一模糊权系数的模糊神经元进行模糊控制; H. R. Nerenji 提出基于模糊神经网络的控制器; H. Bersini 提出自适应模糊神经网络控制器; C. T. Lin 提出模糊神经网络决策系统; L. X. Wan 提出模糊 BP 网络等; I. Requena 和 M. Delgado 提出了具有实数权系数,模糊阈值和模糊输入的模糊神经元; 1990 年到 1992 年期间, M. M. Gupta 提出了多种模糊神经元模型,其中有类同上面的模糊神经元模型,也有含模糊权系数并可以输入模糊量的模糊神经元。现在模糊神经网络^[2,3,6,8,9,11,12,40]在人工智能、自动控制、计算机科学、信息处理、机器人、模式识别等方面的应用研究已全面铺开,留给研究人员广阔的研究空间。

2 遗传算法

遗传算法^[32] (Genetic Algorithm, GA) 是根据生物进化(生物通过选择淘汰、突然变异、基因遗传等规律产生适应环境变化的优良物种的优化过程)思想启发而得出的一种全局优化算法,是模仿 Darwin 的适者生存原理进化论和 Mendel 的基因遗传原理遗传学说而产生。其本质是一种不依赖具体问题的直接搜索方法,其工作过程是根据个体对环境的适应度,采用再生(Reproduction)、交叉(Crossover)、变异(Mutation)等来繁殖下一代的个体,从而实现全局最优收敛(Convergence to the global optimum)目的。遗传算法最早是由 J. D. Bagley 在 1967 年提出的。1975 年 J. H. Holland 开始对遗传算法的理论和方法展开系统性研究,其目的在于尝试说明自然和人工系统的自适应过程。之后人们对遗传算法及应用进行了大量研究工作。到 20 世纪 90 年代,研究人员开始尝试把遗传算法、模糊逻辑、神经网络结合起来,期待给智能研究带来突破性的成果。文献[33]把模糊神经网络及遗传算法应用到智能机器人的控

制,取得良好的效果。文献[34]采用自校正调节器、神经网络、遗传算法设计具有在线辨识的自适应控制器,取得满意的结果。文献[35]采用神经网络、遗传算法来设计飞行控制器,该控制器具有较佳的轨迹控制效果及较强的鲁棒性。文献[36]把遗传算法与多层的感知器相结合,应用于带有统一潮流控制器的高压输电网络的故障分析,该算法具有较快的学习速度及优良的准确性。

目前遗传算法与自适应系统、细胞自动机、混沌理论、人工智能被认为是对今后十年的计算技术有重大影响的关键技术。遗传算法在模式识别、图像处理、工业优化控制、自适应控制、神经网络、机器学习、生物科学和社会科学等多种领域都已有成功的应用,展示了其巨大的潜力和广阔的应用研究前景。遗传算法在传统的神经网络中的应用主要体现在网络的学习、网络的结构设计和网络的分析。遗传算法的应用研究的关键问题在于串的编码方式、适应函数的确定和遗传算法自身参数设定。那么遗传算法与模糊神经网络相结合,其应用效果又会怎样,有待进一步研究。

综上所述,智能模拟的需要、模糊技术、神经网络技术及遗传算法的发展推动了模糊神经网络的深入研究。目前模糊神经网络及基于遗传算法的模糊神经网络的研究只是一个开始,以后还将继续深入发展。

3 模糊神经网络在电力系统的应用

3.1 在电厂过程控制中的应用

在电厂过程控制中,PID 控制是历史最悠久、生命力最强的控制方式,占据了非常重要的位置,然而当工况发生变化时,需要重新整定 PID 控制器的参数不仅数量多,而且难于确保在线安全调整,于是人们开始探讨自适应控制技术在电厂过程控制的应用。文献[46]提出控制量在一定条件约束下的自校正调节器设计方法,仿真表明该方法能改善在输入约束下的跟踪与调节性能。文献[42]介绍了根据用户期望的调节性能来设计自适应 PID 控制器的方法,具有简单、通用的特点。文献[43]采用 Smith 预估器直接辨识滞后时间常数,并与基于最小二乘法的自适应控制相结合的方法来设计适用于时变时滞系统的自适应 PID 控制器。自适应控制技术尽管解决 PID 控制器因工况变化而使控制性能变差的缺点,但是计算时间较长限制了其在快速变化生产过程中使用,于是人们又开始探讨神经网络、模糊控制

在电厂过程控制中的应用,文献[44]把神经网络、模糊控制与PID调节器结合起来,采用基于BP神经网络的自适应模糊PID控制器的设计方法,该控制器具有模糊控制的简单及非线性、神经网络的学习及自适应能力、PID控制器较强的鲁棒性等特点。文献[45]阐述采用一个或多个神经网络与增量形式的PID控制结合的方法来设计多变量、自整定PID控制器,这种控制器适用于多变量耦合作用的控制,用于电厂的温度控制。文献[7]把基于B样条神经网络自适应模糊控制器用于锅炉蒸汽温度的串级控制系统,实验表明该系统与传统的串级控制系统相比,具有低幅衰减振荡及较快的调节性能。由此可见,模糊神经网络在电厂过程控制中的应用是新的研究方向之一。

3.2 在电力系统稳定器的应用

1966年第一台抑制电力系统低频功率振荡的电力系统稳定器投入工业试验,由于该电力系统稳定器设计简单,能有效抑制低频功率振荡,后来便成为中国、美国、日本、加拿大、澳大利亚、巴西、德国、法国、英国、丹麦、瑞典等国普遍使用的控制器,多年的运行经验表明:电力系统稳定器在抑制低频功率振荡、维持发电机端的电压能力等方面取得了显著的成果。但过去几十年中,研究最多的而且在目前仍广泛使用的电力系统稳定器设计方法是极点配置法、相位补偿法、根轨迹法等传统控制技术^[13]。这些稳定器具有电路简单、调试方便、控制效果良好,但存在一些缺陷:必须基于被控对象精确的数学模型,但对于复杂的、非线性的电力系统来说,求取精确的数学模型有一定困难;这些稳定器多数是定参数,且在不同运行工况下,有可能出现电力系统稳定器的控制性能变差,甚至加剧电力系统中的低频振荡。于是人们开始采用自适应控制技术来设计电力系统稳定器^[18~23],这些稳定器能在线辨识电力系统的数学模型,有效解决因需精确数学模型而造成难于设计的问题,同样这些稳定器能适应电力系统不同的运行工况,有效地抑制电力系统中发生的低频振荡,具有良好的阻尼效果和稳定性。但是由于自适应控制需在线辨识电力系统的数学模型,因此计算量大,计算耗时,对于采样周期短的快速系统,实现时有一定的困难。另外,自校正电力系统稳定器的估计器数学模型采用对象的线性模型,这对具有非线性性质的电力系统来说,显然会带来固有的计算误差,从这一角度来看,也会影响电力系统稳定器的控制性能。20世纪90年代研究人员采用模糊技

术来设计电力系统稳定器^[24~28],这些稳定器不依赖被控对象的精确数学模型,因此有效地克服了传统电力系统稳定器设计过程中过分依赖精确数学模型或自适应电力系统稳定器中数学模型辨识耗时的缺点。模糊电力系统稳定器具有适应非线性电力系统、鲁棒性强、算法简单、计算省时、易于实现等优点,但是现有的模糊控制的设计方法大多数凭借经验或采用试凑的方法来确定模糊规则和调整控制器的参数,这给设计带来一定的困难和盲目性,另外,尽管模糊系统采用类似人类思维的模糊推理,但不具有学习能力,致使模糊电力系统稳定器无法完善自己的控制性能。后来研究人员也尝试采用单一人工神经网络来设计电力系统稳定器^[31],终究未能实现学习能力与推理的统一,以完善控制性能。近年来研究人员开拓了一种新的研究方向:把神经网络与模糊系统结合起来设计电力系统稳定器^[29,30],这样既克服了神经网络内表达方法不清楚和单纯模糊控制系统无学习能力的缺点,又可在一定先知经验的基础上,通过学习自动调整参数或模糊逻辑规则,有效地克服了模糊系统设计过程的盲目性,这种基于模糊神经网络的电力系统稳定器具有适应电力系统的非线性特点,不依赖电力系统的数学模型,具有良好的控制性能和较强的鲁棒性;具有学习能力,能在线调整模糊逻辑规则;具有并行计算能力,计算省时,更适合采样周期短的快速控制系统。可以看出,基于模糊神经网络的电力系统稳定器是一种具有较多优点的设计方法,又是一种新颖的研究方向。

3.3 在励磁控制器的应用

随着电力系统的发展,发电机的单机容量不断增加,电网越来越大,越来越复杂,对励磁系统的要求也日益提高,要求励磁装置能维持发电机端电压且对电力系统静态和暂态起作用。因此,研究人员采用单输入、单输出的PID,多输入、多输出的线性控制、非线性控制、自适应控制和模糊技术来设计励磁控制器^[47~51],尽管这些控制器在某些方面具有较好的性能,但是各自的缺点限制了它们的广泛使用。于是研究人员开始探索采用自适应控制策略及模糊技术结合的方法来设计能随系统运行工况的变化而变化,具有较高的控制性能的励磁控制器,文献[50]采用自适应控制策略与模糊控制相结合的方法,实现自适应励磁模糊控制器。文献[51]在线性最优控制的基础上,提出了一种模糊自适应励磁控制器,由模糊推理机能根据发电机实测功率和电压不断修改控制器的反馈增益,仿真表明能跟踪电力

系统的运行工况。近年来,学者开始采用神经网络、模糊技术来设计励磁控制器,体现了励磁控制器研究的新动向。文献[52]采用神经网络对电力系统中被控对象的数学模型进行精确在线辨识,并在此基础上用模型跟踪自校正控制策略实现发电机励磁调节,仿真表明该调节器具有良好的稳定性及较强的鲁棒性。文献[53]设计出基于神经网络、模糊逻辑的励磁控制器,仿真表明其控制性能优于模糊 PI 励磁控制器。

3.4 在自动重合闸的应用

当继电保护装置因电力传输线路故障而断开线路断路器时,传统重合闸装置将重合一次断路器,如果线路发生瞬时性故障时,重合闸使电力系统恢复供电;如果线路发生永久性故障时,则线路重合闸后仍将由继电保护装置加速再断开线路断路器,这样会对汽轮发电机轴系产生较大的瞬态扭应力,严重影响发电机组的设备寿命,同时会给电力系统带来很大的冲击,甚至有可能危及电力系统的稳定。解决上述问题最好的方法就是在重合之前能够辨别线路故障的类型,然后再决定是否重合闸。鉴于上述指导思想,文献[56]提出在每一相重合闸之前进行故障类型(瞬时性故障或永久性故障)判别的重合闸首合闸判据,解决自适应重合闸存在的不能避免首次重合于永久性故障的问题。文献[54]采用三层感知器实现自适应单相重合闸,这种神经网络在分辨出线路的瞬时性故障和永久性故障后,准确发出重合闸指令实现自动重合闸,同时该神经网络准确确定灭弧时间。文献[55]介绍了采用人工神经网络实现自适应单相重合闸,提出用过流开关的跳闸故障数据来训练神经网络的特殊方法,仿真表明经过训练后自适应单相重合闸能准确进行重合闸。显然,神经网络的辨识能力及模糊推理能力在自动重合闸功能的应用上具有极大的优点。

3.5 在继电保护中的应用

近年来,研究人员把神经网络、模糊逻辑、遗传算法等技术应用于继电保护领域的研究。通常采用大量故障样本来训练神经网络,使继电保护装置能准确辨别故障类型及测定故障距离,并准确快速地切开故障。文献[57]用 BP 神经网络原理来设计高压输电线路的方向保护,利用 BP 神经网络的学习及辨识能力实现准确、快速地判别出线路故障的方向。文献[58]采用神经网络对交直流混合输电系统的故障类型进行识别。文献[59]采用神经网络实现电流保护,该保护能识别故障情况,解决电流保护的

灵敏度补偿和故障方向识别问题。文献[60]设计了一种基于人工神经网络的电力系统故障诊断系统,该系统利用电力系统中运行状态信息来进行故障范围的估计。可见神经网络、模糊逻辑、遗传算法等技术将给传统继电保护的研究注入新的活力。

3.6 在灵活交流输电系统 (FACTS) 中的应用

灵活交流输电系统 (FACTS) 是 20 世纪 80 年代后期提出的新技术,其是电力电子技术与现代控制技术相结合的结晶,它有效地对电力系统电压、线路阻抗、相位角、功率潮流等实现连续调节控制,从而大幅度地提高输电线路输送能力及电力系统稳定水平,降低输电损耗,能充分利用现有电网资源和实现电能的高效利用,它将给电力输送和分配带来重大变革。

统一潮流控制器 (Unified Power flow Controller, UPFC) 是一种有效的 FACTS 设备,能有效地调节电力系统的有功功率、无功功率、节点电压,提高长距离输电线路的输送功率及电力系统的暂态稳定。目前大部分 UPFC 控制器的研究文献主要集中于 UPFC 数学建模问题^[37~39]、UPFC 对电力系统稳定性的影响^[41]及传统控制技术在 UPFC 的应用^[38,39],其中文献[39]将 PID 控制技术用于 UPFC 控制器,文献[38]将电流预测控制策略及模糊控制策略用于 UPFC 控制器,文献[41]研究 UPFC 对电力系统稳定性的影响。而模糊神经网络在统一潮流控制器的应用又是如何,这是一个崭新的研究课题。

3.7 在电力系统其它方面的应用

由于神经网络具有分布式存储信息、并行处理、自组织、自学习等特点,模糊系统具有逻辑推理的特点,遗传算法具有全局优化的特点,这将给电力系统的串联电容的控制器、静止无功补偿、直流输电控制系统控制器和负荷预测^[61,62]等领域注入新的技术及指明新的研究方向。

4 结束语

模糊技术、神经网络的自身发展及基于学科交叉的模糊神经网络理论的研究扩大了智能控制的适用范围,完善了智能控制理论体系,为智能控制在电力系统的应用研究提供了基础,目前模糊神经网络理论在电力系统的应用相当少,有待电力研究开发人员去研究、开发适用于电力系统的模糊神经网络控制器、自动安全装置或保护装置,提高电力系统的控制性能、运行的稳定性、安全性。

参考文献:

- [1] 李士勇,夏承光(LI Shi-yong, XIA Cheng-guang). 模糊控制和智能控制理论与应用(Theory and Application of Fuzzy Control and Intelligent Control)[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社(Harbin: Harbin Institute of Technology Press),1990.
- [2] 刘增良,刘有才(LIU Zeng-liang, LIU You-cai). 模糊逻辑与神经网络——理论研究与探索(Fuzzy Logic and Fuzzy Neural Network——Theory Research and Exploration)[M]. 北京:北京航空航天大学出版社(Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press),1996.
- [3] 邓志东,孙增圻,张再兴(DENG Zhi-dong, SUN Zeng-qi, ZHANG Zai-xing). 一种模糊CMAC神经网络(A Fuzzy CMAC Neural Network)[J]. 自动化学报(Acta Automatica Sinica), 1995, 21(3): 288-293.
- [4] Cui X Z, Shin K G. Direct Control and Coordination Using Neural Networks[J]. IEEE Trans on System Measure and Cybernetics, 1993, 23(3): 686-697.
- [5] Sbarbaro hofer D, Neumelkel D, Hunt K. Neural Control of a Steel Rolling Mill [J]. IEEE Control System Magazine, 1993, 13(3): 69-75.
- [6] CHEN Yie-chien, TENG Ching-cheng. A Model Reference Control Structure Using a Fuzzy Neural Network[J]. Fuzzy Sets and System, 1995, 73(3): 291-312.
- [7] 濮卫兴,陈来九(PU Wei-xing, CHEN Lai-jiu). 用B样条神经网络设计自适应模糊控制器(An Adaptive Fuzzy Controller Based on a B-spline Neural Network)[J]. 控制理论与应用(Control Theory & Application), 1996, 13(4): 448-454.
- [8] Lin C T, Georlee C S. Neural-network-based-fuzzy Logic Control and Decision Systems[J]. IEEE Trans on Computer, 1991, 40(12): 1320-1336.
- [9] Lin C T, Georlee C S. Reinforcement Structure/ Parameter Learning for Neural-network-based-fuzzy Logic Control and Systems[J]. IEEE Trans on System, 1994, 2(1): 46-63.
- [10] Walsh M P, O Malley M J. Augmented Hopfield Network for Unit Commitment and Economic Dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1765-1774.
- [11] 赵振宇,徐用懋(ZHAO Zhen-yu, XU Yong-mao). 模糊理论和神经网络的基础与应用(Basis and Application of Fuzzy Theory and Fuzzy Network)[M]. 北京:清华大学出版社与广西科学技术出版社(Beijing: Tingshua University Press and Guangxi Science and Technology Press), 1997.
- [12] Juang C F, Lin C T. A Self-organizing Neural Fuzzy Inference Network for Identification and Control [J]. Journal of Control Systems and Technology, 1996, 4(4): 269-280.
- [13] Lin C T. A Neural Fuzzy Control Systems with Structure and Parameter Learning[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 70: 183-212.
- [14] deMello F D, Concordia C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control [J]. IEEE Trans on PAS, 1969, 88: 316-329.
- [15] deMello F D, Nolan P J, Laskowski T F, et al. Coordinated Application of Stabilizer in Multimachine Power Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1980, 99: 892-901.
- [16] deMello F D, Hannett L N, Parkinson D W, et al. A Power System Stabilizer Design Using Digital Control [J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101: 2860-2868.
- [17] Yuan Yih Hsu. Design of a Proportional-Integral Power System Stabilizer [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, PWRS-1(2): 46-53.
- [18] 方思立,朱方(FANG Si-li, ZHU Fang). 电力系统稳定器的原理与应用(The Theory and Application of Power System Stabilizer). 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1996.
- [19] Ghosh A, Ledwich G, Malik O P, et al. Power System Stabilizer Based on Adaptive Control Techniques[J]. IEEE Trans on PAS, 1984, 103: 1983-1988.
- [20] Cheng S J, Chow Y S, Malilik Q P, et al. An Adaptive Synchronous Machine Stabilizer [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, PWRS-1(3): 101-109.
- [21] Gu W, Bollinger K E. A Self-tuning Power System Stabilizer for Wide Range Synchronous Generator Operation for Wide Operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(3): 191-199.
- [22] Fan J Y, Ortmeier T H, Mukundan R. Power System Stability Improvement with Multivariable Self-tuning Control [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 227-234.
- [23] Traudnowski D J, Pierre D A, Swith J R, et al. Coordination of Multiple Adaptive PSS Units Using a Decentralized Control Scheme [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 294-300.
- [24] Wen C, Gbbard M J. Conventional Power System Stabilizer with Auxiliary Self-tuning / Fixed Parameter Controller [J]. Electrical Power and Energy Systems, 1995, 17(1): 39-49.
- [25] Hiyama T. Application of Rule-based Stabilizing Controller to Electrical Power System [J]. IEE Proceed C, 1989, 136(3): 175-181.
- [26] Hyama T. Ruled Based Stabilizer for Multimachine Power System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 403-411.
- [27] Hsu Y, Cheng C. Design of Fuzzy Power System Stabilizer for Multimachine Power System [J]. IEE Proceed C, 1990, 137(3): 233-238.
- [28] Hassan M A M, Malik O P, Hope G S. A Fuzzy Logic Based Stabilizer for a Synchronous Machine [J]. IEEE Trans

- on Conversion, 1991, 6(3): 407-413.
- [29] Junya M, Takao O, Koji S. Experimental Approach to Optimal Setting of Parameters in Fuzzy Control Algorithm for Power Stabilization[J]. IECON 93, 273-278.
- [30] 高峰,秦冀鸿(GAO Feng, QIN Ji-hong). 基于模糊神经网络的模糊控制综合优化设计. 模糊电力系统稳定器(Synthetic Optimum Design of Fuzzy Controller Using Fuzzy Neural Network, Part 1: Fuzzy P S S)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1996, 20(12): 6-9.
- [31] 管霖,程时杰,陈德树(GUAN Lin, CHENG Shi-jie, CHEN De-shu). 神经网络电力系统稳定器的设计与实现(Design and Realization Fuzzy Neural Network Power System Stabilizer)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1996, 16(6): 384-387.
- [32] 数字神经网络系统(Digital Neural Network System)[DB/OL]. <http://www.jgchina.com>.
- [33] Toshio F, Koji S, Takanori S. Fuzzy Network and Genetic Algorithm Based Control System[J]. IEEE, 1994: 1220-1225.
- [34] Pham D T, Karaboga D. Design of an Adaptive Fuzzy Logic Controller[J]. IEEE, 1994: 437-442.
- [35] Langley A M, Barton S A, Markov A B. Simulated Flight Control Using a Hybrid Neural Network[J]. Genetic Algorithm Architecture, 1995: 150-154.
- [36] Song Y H, Johns A T, Xuan Q Y, et al. Genetic Algorithm Based Neural Network Applied to Fault Classification for EHV Transmission Lines with a UPFC[A]. IEE, Development in Power System Protection, 1997. 278-281.
- [37] Menniti D, Pinnarlli A, DeMartinis U, et al. Modelling of Unified Power Flow Controller into Controller into Power Systems Using P-Spice[A]. IPST 2001 Conference Papers.
- [38] 鞠儒生,陈宝贤,邱晓刚(JU Ru-sheng, CHEN Bao-xian, QIU Xiao-gang). UPFC控制方法研究(Basic Control of Unified Power Flow Controller)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2003, 23(6): 60-65.
- [39] 章良栋,岑文辉,刘为(ZHANG Liang-dong, CEN Wen-hui, LIU Wei). UPFC的模型及控制器设计研究(A Design and Study on the Model and Controller of UPFC)[A]. 第十三届全国高等学校电力系统及其自动化专业学术论文集(Proceeding of the 13th CUS-EPISA). 1997. 193-200.
- [40] 叶其革,吴捷(YE Qi-ge, Wu-jie). 一种自组织模糊神经网络控制器(A Self-organizing Fuzzy Neural Network Controller)[J]. 控制与决策(Control and Decision), 1998, 13(11): 694-699.
- [41] 王涛,于继来,鲁保春,等(WANG Tao, YU Ji-lai, LU Bao-chun, et al). 统一潮流控制器(UPFC)在电力系统中稳态调控范围分析(The Steady Control Range Analysis Application UPFC to Power System Stabilizer)[A]. 第十三届全国高等学校电力系统及其自动化专业学术论文集(Proceeding of the 13th CUS-EPISA), 1997. 224-229.
- [42] 权刚,田伟(QUAN Gang, TIAN Wei). 基于响应特性匹配的自适应PID控制器(An Adaptive PID Controller Based on Response Characteristics Matching)[J]. 控制与决策(Control and Decision), 1996, 11(2): 320-324.
- [43] 杨志远,吕跃刚(YANG Zhi-yuan, Lü Yue-gang). 时变时滞系统的参数辨识及自适应控制方法(Parameter Identification and Adaptive Control of Time-delay)[J]. 信息与控制(Information and Control), 1993, 22(2): 76-81.
- [44] 李卓,萧德云,何世忠(LI Zhuo, XIAO De-yun, HE Shi-zhong). 基于神经网络的模糊自适应PID控制方法(Fuzzy Adaptive PID Control Based on Neural Network)[J]. 控制与决策(Control and Decision), 1996, 11(3): 340-345.
- [45] 胡泽新,周金荣,黄道(HU Ze-xin, ZHOU Jin-rong, HUANG Dao). 多变量非线性自整定PID控制器(Self-setting Multivariable Nonlinear PID Controller)[J]. 控制理论与应用(Control Theory & Applications), 1996, 13(2): 268-272.
- [46] 彭辉,等(PENG Hui, et al). 具有控制量约束的组合自校正控制器(The Combined Self-tuning Regulator of Control Variable Restricting)[J]. 控制与决策(Control and Decision), 1996, 11(3): 613-615.
- [47] LU Qing, WANG Zhong-hong, HAN Ying-duo. Optimal Control of Power Transmission Systems[Z]. 1982.
- [48] LU Qing, SUN Yuan-zhang. Power Systems Nonlinear Control[Z]. 1993.
- [49] Hsu Y Y, Cheng C H. A Fuzzy Controller for Generator Excitation Control[J]. IEEE Trans on Systems, Math and Cybernetics, 1993, 123(2): 532-539.
- [50] 李晓晴,秦冀鸿(LI Xiao-qing, QIN Ji-hong). 参数自调整励磁模糊控制器的设计研究(The Design and Research of Self-tuning Parameter Fuzzy Excitation Controller)[A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十二届学术论文集(Proceeding of the 12th CUS-EPISA). 1996. 335-339.
- [51] 高峰,秦冀鸿,徐国禹(GAO Feng, QIN Ji-hong, XU Guo-yu). 一种实用的Fuzzy自适应控制方法(A Method of Applied Fuzzy Adaptive Control)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1994, 18(11): 27-33.
- [52] 李鹏,刘明波(LI Peng, LIU Ming-bo). 基于神经网络的模型跟踪自校正励磁控制研究(Research on Model Reference Self-tuning Excitation Controller Based on Neural Network)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(1): 36-38.
- [53] Karnavas Y L, Paradopoulos D P. Excitation Control of a Power Generating System Based on Fuzzy Logic and Neural Networks[J]. ETEP, 2000, 10(4): 233-235.
- [54] Aggarwal R K, et al. Neural Network Based Adaptive Single

- pole Autoreclosure Technique for EHV Transmission Systems[J]. IEEE Proceeding-C,1994,141(2):155-160.
- [55] Fitton D S, Dunn R W, Aggarwal R K. Design and Implementation of an Adaptive Single-pole Autoreclosure Technique for Transmission Lines Using Artificial Neural Networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1996,11(2):748-755.
- [56] 房鑫炎,郁惟镛,王曼(FANG Xin-yan, YU Wei-yong, WANG Man). 自适应重合闸中首相判据的探讨(The Research on First-phase Criterion of Adaptive Reclosure)[A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十二届学术论文集(Proceeding of the 12th CUS-EPISA). 1996.905-910.
- [57] Sidhu T S, Sing H H, Sachdev M S. Design Implementation and Testing of an Artificial Neural Network Based Fault Direction Discriminator for Protecting Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Systems,1995,10(2):1002-1009.
- [58] Kandi L N, Sood V K, Khorasan I K, et al. Fault identification an AC/DC Transmission System Using Neural Networks [J]. IEEE Trans on Power Systems,1992,7(2):812-819.
- [59] 房鑫炎,钟聪,沈芳良(FANG Xin-yan, ZHONG Cong, SHEN Fang-liang). 基于人工神经网络自适应电流保护(Adaptive Circuit Protection Based on Neural Network)[J]. 继电器(Relay),2000,28(5):16-19.
- [60] Yang H T, Chang W Y, Huang C L. A New Neural Networks Approach to On-line Fault Section Estimation Using Information of Protective Relays and Circuit Breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1994,9(1):220-230.
- [61] Mhannmed O, Park D, Merchant R, et al. Practical Experiences with an Adaptive Neural Network Short-term Load Forecasting System[J]. IEEE Trans on Power Systems,1995,10(1):254-264.
- [62] K, et al. A Fuzzy Adaptive Correction Scheme for Short-term Load Forecasting Using Fuzzy Layered Neural Network [A]. Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems. 1993. 432-437.

收稿日期: 2003-12-29; 修回日期: 2003-02-18

作者简介:

叶其革(1969-),男,工程师,博士研究生,从事电力工程电气部分的施工和设计,主要研究方向为控制理论及控制工程,电力系统控制技术;

王晨皓(1971-),女,讲师,主要研究方向为高频开关电源;

吴捷(1937-),男,博士生导师,主要从事自适应控制、电力系统运行监测与控制、电机控制、生物电子学等研究工作。

Fuzzy neural network and its application in power system

YE Qi-ge¹, WANG Chen-hao², WU Jie¹

- (1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510075, China;
2. Guangdong Post and Telecommunication Vocational Technology Institute, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The technology, merits and shortcomings of neural network, fuzzy control theory, fuzzy neural network and genetic algorithm, and their combination are discussed in the paper, and then applications of fuzzy neural networks in power plant process control, power system stabilizer, excitation control, auto-reclosure, relay protection, and FACTS in power system are introduced. Its application in the future is prospected.

Key words: genetic algorithm; fuzzy neural networks; power system

书讯——《交直流电力系统动态行为分析》

由浙江大学徐政教授撰写,机械工业出版社高水平著作出版基金资助的《交直流电力系统动态行为分析》一书近期已由机械工业出版社出版。本书在交直流混合电力系统的框架下阐述了交直流电力系统之间的相互作用特性及其动态行为的分析理论和仿真方法。主要内容包括直流输电系统及其控制器的数学模型,交流输电系统与直流输电系统的输送能力分析,直流输电系统的动态过电压、频率变换关系及谐波稳定性,交直流电力系统的潮流计算、机电暂态仿真、电磁暂态仿真和次同步振荡分析。本书的一大特点是十分注重已有理论的适用范围分析及其工程应用的可操作性,适合于从事交直流电力系统科研、规划、设计和运行的工程师以及高等学校电力系统专业的教师和研究生阅读。本书为16开本,202页,33万字,定价29元。购书联系电话:010-68990188; Email: online@cnipbook.com; 网址:www.cnipbook.com