

汽轮发电机组汽门开度控制器的综合智能化设计方法

于霞¹, 宋凌锋², 陈学允¹

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系 353 信箱, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 清华大学电机工程系, 北京 100084)

摘要: 结合控制系统设计问题的特点, 将遗传算法和再励学习分别引入到模糊神经网络控制器的离线训练和在线应用过程中, 提出了一种综合智能化的控制系统设计思想。将其应用在汽轮发电机组汽门开度控制器设计过程的仿真结果表明, 所设计的综合智能控制器具有良好的控制效果和更高的智能化水平, 设计过程更加合理, 应用简便, 在理论和实践两方面都更具潜力。

关键词: 模糊神经网络; 遗传算法; 再励学习; 汽门开度控制;

中图分类号: TM311

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)08-0006-04

1 引言

汽轮发电机组汽门开度的控制是提高电力系统稳定性的有效手段, 近年来, 随着智能控制理论的发展及其在电力系统中的广泛应用, 采用智能技术来实现汽门的控制也开始得到关注^{[1][2][3]}。在各类智能技术中, 融模糊控制和神经网络二者之长的模糊神经网络控制系统优势突出^[1], 它以网络的形式记忆模糊规则, 同时具有学习推理能力和可读性, 简便实用。但是, 基于 BP 学习方式的模糊神经网络对初始条件及样本数据等仍然具有很强的依赖性, 它们制约了控制器性能的提高。

本文以进一步提高控制器的智能化水平为目标, 提出了一种综合智能化的控制系统设计思想(如图 1 所示)。图中模糊神经网络控制器的结构可以参看文献^[4], 同时, 本文作者在文献^[4]中还比较详细地论述了在这类模糊神经网络控制器的训练中引入遗传算法, 并使它与原有的 BP 学习有机结合的目的、优势及工作方式等。在此基础上, 本文又针对控制系统设计问题的特殊性, 对传统的简单遗传算法进行了改进; 同时为适应控制器在线应用的需要, 提出了一种模糊再励学习算法, 用以跟踪系统状态及环境条件的变化, 获得更好的控制性能并使所得到的控制器更加接近于综合智能化的水平。仿真结果表明, 所设计的综合智能控制器具有良好的控制效果, 并且设计过程更加简便合理, 具有更大的应用潜力。

2 控制器的离线训练——遗传算法的采用

2.1 改进的遗传算法

控制系统的设计问题有着区别于各类优化问题

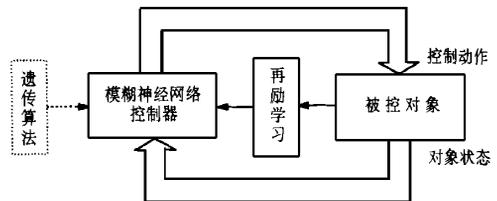


图 1 综合智能控制器总体结构框图

的特殊性。在控制系统的设计中, 算法往往没有明确的目标(最优解不确定, 甚至根本不存在), 在保证算法收敛性的同时, 我们更关注的是系统性能的逐步改善, 此时大范围的盲目搜索更可能的结果是导致训练时间的延长。本文由此出发进行了对简单遗传算法(SGA)的改进, 具体地说, 新算法具有如下的主要特征。

2.1.1 新的选择操作

以个体适应值为标准的选择过程是决定 GA 收敛方向的一个主要因素。在一般的 SGA 中, 通常采用的选择方法是“赌盘选择法”, 这种方法存在随机采样误差, 很容易丢失群体中的优良个体。一种改进方法是所谓的“最优选择法”(elitist), 它通过人为地保存群体中的最优个体而有效地保证了算法的收敛方向。在优选法的基础上, 本文采用一种“人工选择法”, 其进行过程如图 2 所示。

可以看到, 这种选择方式不仅能够使群体中的最优个体得以保存, 并且引入了更多的优良个体的信息, 从而为算法的收敛方向提供了更为有效的保证, 同时并不影响并且有利于种群的进化, 能够更好地适应控制系统设计问题的特点。

2.1.2 自适应变异操作

新算法的另一个特点是忽略了交叉操作而特别强调了变异的作用。交叉操作对遗传算法性能的影响

```

开始(t=0);
{
  初始化群体G(t) (种群规模为N);
  评估G(t);
  若不满足收敛条件则循环执行;
  {
    对G(t)中的每一个体进行自适应变异操作,
    产生G'(t)(规模为N);
    评估G'(t);
    从G(t)和G'(t) (共2N个个体)中选出最优
    的N个个体,形成新一代群体G(t+1);
    评估 G(t+1);
    t=t+1;
  }
}
结束

```

图2 改进的遗传算法结构

响与种群的初始分布即个体间的差异程度有关,在此由于选择力度的强化使个体之间更为接近,交叉操作的作用已不明显,可以将其忽略,而通过适当的变异操作来促进个体的进化,对群体性能的改善将更为有效。

自适应变异概率的具体调整规则如下:

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_m(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} + P, & f > f_{\text{avg}} \\ k_m, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (1)$$

其中 f 为当前群体中每一个体的适应函数值, f_{\max} 为群体的最大适应值, f_{avg} 为群体的平均适应值, k_m 和 P 为常数,分别相当于适应值为 f_{avg} 和 f_{\max} 的个体的变异概率值,由于在此变异的作用更侧重于进化而不是破坏,它们的值都不应取得过大,如可分别取为 0.3 和 0.02。采用 P 的目的是保证当前群体中适应值最大的个体也具有向更优解进化的能力,实际上它更容易进化得到更优的个体。

可以看到,改进后的遗传算法在适应控制系统设计问题的同时,对控制参数的依赖很少,具有很强的自适应性,这也是它的主要优点之一,它减少了遗传算法的盲目性,使它的应用更为简便和有效。

2.2 混合遗传算法

在本文中,遗传算法的采用并非替代原有的 BP 学习,而是与之相结合共同作用,文献^[4]中对此有比较详细的论述,图3是它的原理框图。与BP算法的结合能够很好地克服 GA 收敛结果的随机性,将其调整到附近的更优解,并进一步提高算法的收敛速度。整个算法的执行过程简单有效,能够从收敛速度和精度两个方面满足要求,在较短的时间内得到令人满意的结果。

为使所得到的控制系统具有更强的泛化能力,新算法中还采取了以下措施:在BP算法的进行过程中,采用训练集对个体进行训练,而采用另一个

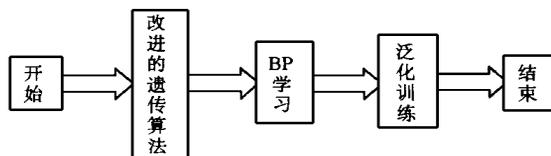


图3 混合遗传算法原理框图

有效数据的检验集对它进行评估;当BP训练结束之后,附加了一个“泛化训练”环节,用包含训练集和检验集全部数据的训练集对最优个体做进一步训练,并以另一个检验集检验其是否满足精度要求,以使所得到的结果更具一般性。

3 控制器的在线应用——模糊再励学习算法的采用

再励学习算法(RL——Reinforcement Learning)^[5]是一种很好的适于在线应用的学习算法。所谓再励,是指如果施加于系统的某种行为有助于得到满意的结果,那么产生这种行为的趋势将被加强。由于目的是在线地对原有网络做进一步的细化调整,而非在线地构造网络,因此本文对RL做了简化,引入模糊规则来规划算法的学习进程,构成一种模糊再励学习算法(FRL),它简便易行,能够更方便地跟踪环境条件的变化,提高系统的鲁棒性,满足控制器在线应用的要求。

设系统所给出的再励信号是一个关于系统状态变化量的非线性函数:

$$r(t) = r[e(t), c(t)] \quad (2)$$

其中 $e(t)$ 为 t 时刻系统的输出误差; $c(t) = \dot{e}(t)$ 为 $e(t)$ 的变化率。

FRL 通过对 e, c 与 r 之间关系的分析,制定模糊规则,决定增强因子的大小及方向,并给出相应参数的修正值,实现对输出控制量的在线调整。在所设计的控制系统中,控制器的结构如文献^[4]中式(1)所示,对它的调整主要针对决定控制输出 f 大小的参量,即模糊规则的后件(结果部分对应的网络权值)进行,而对输入变量的隶属函数则不再调整。因此,调整主要依据下式:

$$l^i(t+1) = l^i(t) + r(t) \cdot O^i \quad (3)$$

式中 $O^i = \frac{\partial f}{\partial l^i} = \frac{c^i}{b}$ 为对应 l^i 的神经元的输入(c^i 及 b 的定义见文献^[4])。

由于本文中决定再励信号的状态量取为两个,所制定的模糊规则可以以如下的规则表的形式给出(表1),表中 $r_0 \sim r_4$ 代表 $r(t)$ 在不同情况下的取值。

表1 模糊再励学习规则表

r	c				
	负大	负小	零	正小	正大
负大	r_4	r_3	r_2	r_1	r_0
负小	r_3	r_2	r_1	r_0	$-r_1$
零	r_2	r_1	r_0	$-r_1$	$-r_2$
正小	r_1	r_0	$-r_1$	$-r_2$	$-r_3$
正大	r_0	$-r_1$	$-r_2$	$-r_3$	$-r_4$

4 汽轮发电机组汽门开度综合智能控制器的设计

系统结构如图4所示,电力系统及调速器的详细模型和参数参见文献^[6]。依前文所述原理设计汽门开度的综合智能控制器。

控制器主体为文献^[4]中所述模糊神经网络控制器(FNNC)。选取发电机的转速偏差及其变化率作为FNNC的输入,输出为汽门控制量的偏差 V_g 。遗传算法中的个体由FNNC的参数编码而成,采用二进制编码方式。

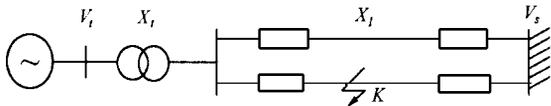


图4 单机无穷大系统

GA中的每一个个体都对应于一个FNNC的设计方案,将与此方案相对应的控制器用于受控发电机,进行数值仿真可得到系统响应,然后依据给定的评估函数对个体进行评估。选取评估函数为控制量及转子角频率与额定值的相对误差之和的ITAE值,如下式(4)所示。

$$J = \int_0^T \left\{ \frac{1}{\omega} |V_g(t) - V_{g0}| + \frac{1}{\omega} |(\dot{\omega}(t) - 0)| \right\} \cdot dt \quad (4)$$

其中 ω 和 $\frac{1}{\omega}$ 为权重因子,可根据需要进行调整。为更全面地评价控制器的性能,可选取几种典型扰动情况进行仿真,将所得到的 J 值加权求和后得到一个综合估计值作为个体的最终评估值。

在仿真过程的最后,记录GA中的优良个体所获得的样本数据,将它们作为不同的训练集和检验集用于随后进行的BP训练及泛化学习的进程中,充分利用所得信息,改善系统的泛化能力。

最后,将训练好的系统投入在线应用,并根据所制定的模糊规则对其结构进行进一步的再励学习,调整其跟踪特性,完善控制器的控制效果。

5 仿真结果

在以下测试条件下,所设计的综合智能控制器的控制效果分别如图5~9所示。

测试1: 0s k 点发生三相短路故障,0.15s故障线路被切除,0.75s线路自动重合闸成功,系统恢复正常运行。考察控制器在系统经受大扰动情况下的控制特性。

图5和图6是故障发生在线性最优控制的设计运行点 $\delta = 70^\circ$ 情况下综合智能控制器的控制效果。图7是在工作点变化时的控制效果(图7(a)中曲线

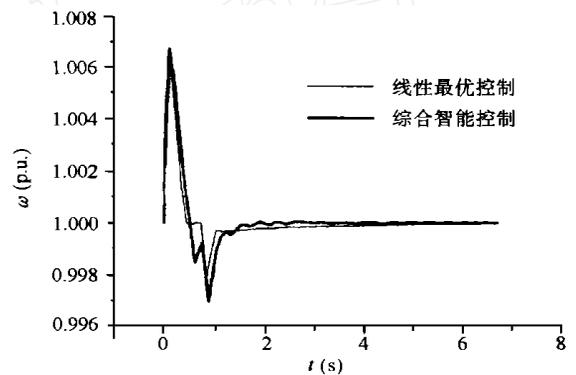


图5 测试1下的转速响应曲线

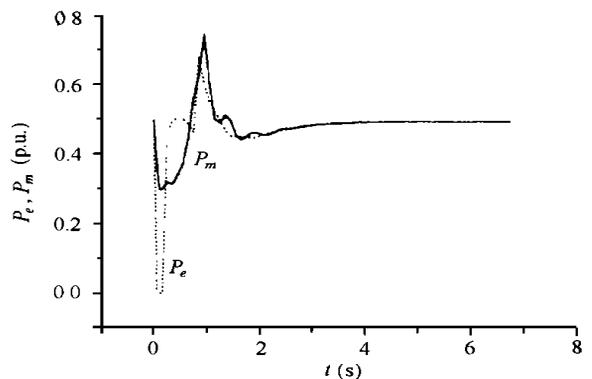


图6 测试1下的功率响应曲线

1、2、3、4是故障分别发生在 $\delta = 70^\circ, 90^\circ, 100^\circ, 105^\circ$ 的情况,它们一一对应图7(b)中箭头所指处从左至右的四条曲线)。可以看到,综合智能控制器的控制作用良好,在线性最优控制的设计运行点,它有着与之相接近的控制效果,更重要的是,它在适应工作点的变化上更具优势,具有更强的鲁棒性。

测试2: 同1,但0.75s重合闸不成功,系统单回线运行。考察控制器在系统经受永久性故障,即系统网络结构发生变化时的鲁棒性。

图8和图9是故障发生在 $\delta = 100^\circ$ 时综合智能控制器的控制效果。图8中的曲线1对应线性最优

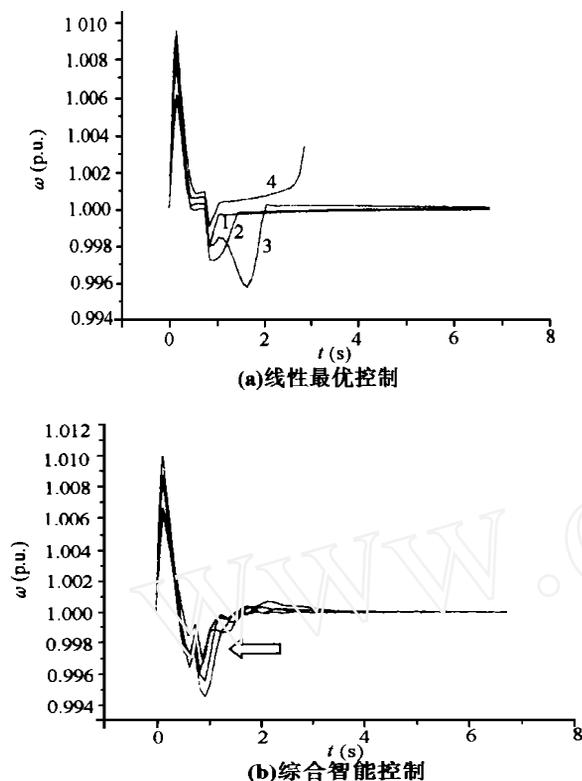


图7 工作点变化时的转速响应曲线

控制;曲线3对应综合智能控制;而曲线2为未加在线跟踪环节的综合智能控制效果。从图中可以看到,即便在此严重故障的情况下,综合智能控制器也能够使系统很快地恢复到原来的运行点,并且具有良好的控制特性。

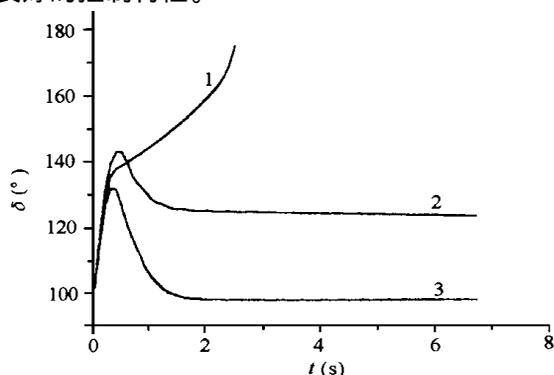


图8 测试2下的功角响应曲线

从以上的仿真结果可以看到,所设计的综合智能控制器具有良好的控制特性,并且虽然事先未做任何假设,但它对汽轮发电机组机械功率的控制(图6及图9)在具体的故障情况下接近于一种固定逻辑,能够很好地满足对汽门控制的要求,而更为智能化的简便合理的设计过程更是它的主要优势所在。

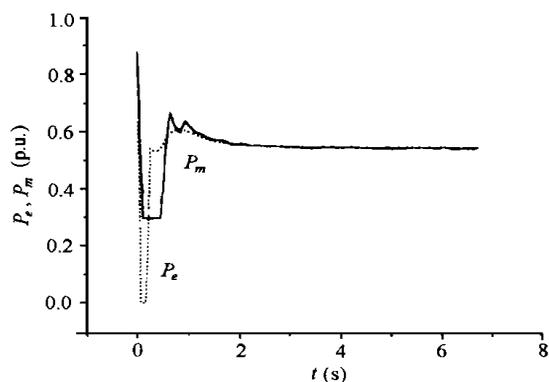


图9 测试2下的功率响应曲线

6 结论

与以往所有基于数学模型的控制方法不同,智能控制所研究的主要目标不再是被控对象,而是控制器本身,这种设计角度的变换使控制器具有对被控对象更广泛的适应性,同时也使其性能的改善更具可行性。本文正是从这样的角度出发,在提高控制器的智能化水平上下功夫,将遗传算法和再励学习与模糊神经网络控制器的应用紧密结合,提出了一种综合智能化的控制器的设计思想,将其应用在汽轮发电机组汽门开度控制器设计过程的仿真结果表明,所设计的综合智能控制器具有良好的控制效果和更高的智能化水平,设计过程更加合理,应用简便,在理论和实践两方面都更具潜力。

参考文献:

- [1] 唐巍,陈学允. 快关汽门控制的模糊神经网络方法. 电力系统自动化,1997,21(10):24~27.
- [2] Han Yingduo, Xiu Lincheng et al. Artificial Neural Networks Controlled Fast Valving in a Power Generation Plant. IEEE Trans on Neural Networks, 1997, 8(2):373~389.
- [3] Wu Q H, Hogg B W, Irwin G W. A Neural Network Regulator for Turbogenerator. IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 3(1):95~100.
- [4] 于霞,宋凌锋,陈学允. 改善模糊神经网络控制器性能的新方法——混合遗传算法. 电机与控制学报,1999,3(2):85~88.
- [5] Hamid R Berenji and Pratap Khedkar. Learning and Tuning Fuzzy Logic Controllers Through Reinforcements. IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 3(5):724~740.
- [6] 卢强,王仲鸿,韩英锋著. 输电系统最优控制. 科学出版社,1982.

(下转第21页)

饱和时差动判据均成立,满足动作条件。为了区分上述情况,首先根据瞬时值电流差动判据识别出“母线内部故障”,以此时刻为基准向前回退几点,如果 $S_p(m)$, $S_n(m)$ 至少有一次为 1,另一个大于或等于 1,则可判为母线外部故障 CT 饱和;如果 $S_p(m)$, $S_n(m)$ 必有一个为零,另一个大于或等于 1,则可判为母线内部故障。

3.3 CT 饱和的处理

检测出 CT 饱和后,差动保护将被闭锁一段时间,以躲过故障的非周期分量。对于 330 ~ 500kV 超高压系统,闭锁时间可整定为 100 ~ 150ms,对于 110 ~ 220kV 高压系统,闭锁时间可整定为 60 ~ 80ms。

4 结论

基于同步识别法的 CT 饱和判据已成功地运用于 WMH 100 型微机母线保护装置中,并有近百套装置投入运行。基于电流比相法的 CT 饱和判据也已成功地

运用于 WMH 100A 型微机母线保护装置中,并在我国某 500kV 变电站中投入运行。理论及实践证明,这两种方法是可行的。

参考文献:

- [1] 程利军. 广东茂名 500kV 变电站 220kV 微机母线保护装置的研究. 继电器, 2000, (2).
- [2] 程利军等. 自适应式微机母线保护装置的研究. 电网技术, 1996, (9).

收稿日期: 2000-01-04 改回日期: 2000-02-18

作者简介: 程利军(1966-),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为计算机在电力系统继电保护及自动控制中的应用; 龙翔(1965-),男,工程师,硕士,主要从事电力系统自动化的研究与设计工作; 杨奇逊(1937-),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事电力系统继电保护与自动化的研究开发与教学工作。

The research of the sampling method for CT saturation in numeric busbar protection

CHENGLi-jun, LONG Xiang, YANG Qi-xun

(North China Electric Power University, Beijing 100085, China)

Abstract: It is very important for busbar protection that when CT saturated, the reliability of busbar protection has influenced the safe and stable operation of electric power system. Analyzed the criteria of busbar protection, the sampling CT saturation arithmetic used for numeric busbar protection is presented in this paper. Combined with the sampling arithmetic for differential current protection, the high speed for operation and stability for CT saturation of busbar protection is satisfied. Hundred of protections using the theory have been served in electric power system.

Keywords: numeric busbar protection; sampling arithmetic; CT saturation check

(上接第 9 页)

收稿日期: 2000-01-23

作者简介: 于霞(1972-),女,博士研究生,研究方向为综合智

能技术及其在电力系统控制中的应用; 宋凌锋(1970-),男,博士后,研究方向为电机驱动及智能控制技术等; 陈学允(1934-),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,主要研究方向为电力系统分析与控制、智能技术在电力系统中的应用等。

Design a valve controller of turbogenerator with an integrated intelligent method

YU Xia¹, SONG Ling-feng², CHEN Xue-yun¹

(1. P. O. Box 353, Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Concerning the speciality of control system design problems, this paper presents an integrated intelligent method by introducing an improved genetic algorithm and a fuzzy-based reinforcement learning respectively into the offline and online development parts of a fuzzy neural network controller. Simulation results of its application on the valving control of steam turbine show that it has favorable control performance and simplified design process, it has higher intelligent levels and is potential in both theory and practice.

Keywords: fuzzy neural networks; genetic algorithm; reinforcement learning; valving control