

基于 GPS 同步量测量的模糊神经网络用于暂态稳定预测研究

苏建设¹, 廖培金², 周佃民²

(1. 上海交通大学电力系, 上海 200240; 2. 西安交通大学电力系, 陕西 西安 710049)

摘要: 利用 GPS 同步时钟获得系统各机组的功角或系统内最大摇摆角, 然后通过模糊神经网络进行暂态稳定性预测, 充分利用了模糊系统和神经网络的优点, 一方面考虑了专家的经验, 另一方面又通过样本集进行学习, 能自动提取模糊规则、优化隶属函数等, 因此具有较高的模式分类正确率和函数逼近精度。对 6 机 22 节点的算例表明, 所提方法是有效的。

关键词: 电力系统; GPS; 预测; 暂态稳定; 模糊神经网络

中图分类号: TM712, TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)02-0013-03

1 引言

当前, 随着电力运营模式由传统的发、输、配统一管理 and 运行机制, 逐步向发、输、配分别作为独立实体参与竞争的电力市场运行机制转化, 电力系统运行更加复杂化。运行方式的多变性, 要求更加快速有效的稳定控制手段。因此, 防止系统暂态稳定破坏仍然将是电力系统中极为迫切的任务。

电力系统安全稳定装置可以在系统丧失同步稳定运行之前, 预测失步的出现, 并能及早采取一定的控制措施避免失步事故的发生, 也可以在事故状态下紧急投入控制措施, 防止事故扩大。目前如何在大范围内使用最有效的控制决策已成为电网暂态稳定控制技术进步的关键, 而在实施决策过程中最为重要的是需准确快速地进行暂态稳定预测。预测结果的准确与否, 直接关系到控制决策的实施。

对电力系统暂态稳定进行预测目前已经提出过多种方法, 如: 数值积分方法, Lyapunov 直接法以及人工智能方法等。近年来, 随着计算机技术和通信技术的发展, 智能控制和利用 GPS 同步时钟的新一代动态安全监测系统已经成为现代电力系统运行与控制研究的又一热点, 同时也为电力系统暂态稳定

预测和控制提供了一个新的思路 and 手段。如文献^[1]提出用模糊神经网络基于同步相量测量装置进行电力系统暂态稳定模式分类。文献^{[2][3]}则主要是利用基于 GPS 同步时钟的相量测量单元 (PMU) 来获得暂态过程中各节点电压相位或各发电机的转子角度, 进而预测系统的未来摇摆情况, 并施加相应的控制措施。而且还有文献提出一些其它暂态稳定预测方法, 如文献^{[4][5]}提出用扰后功角观测值是否存在极值点或其多项式特征方程是否存在正实根来预测系统暂态稳定性等。但所有上述方法, 其算法还有待改进, 精度也有待提高。由于 GPS 为同步测量相量提供了可能, 故本文利用 GPS 同步时钟来测量各发电机组的转子角度, 并通过模糊神经网络对电力系统暂态稳定性进行预测。

2 模糊神经网络简介

模糊系统中, “模糊化” “模糊推理” “模糊判决” 是构成模糊系统或模糊控制器的最基本模块。将模糊系统表达成联结主义方式的网络结构, 就可以得到模糊神经网络 (Fuzzy Neural Network)。这种 FNN 在输入输出端口上与模糊系统完全等效, 而内部权值和节点参数可以通过学习加以修正。该 FNN

Research of the main protection scheme of internal faults for No.1 generator in the Three Gorges power station

GUI Lin¹, WANG Xiang-heng¹, WANG Wei-jian¹, ZHANG Xue-shen²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

Abstract: Based on the simulation of internal faults of No. 1 generator in the Three Gorges Power Station, the sensitivities and non-operation number of four main protection schemes and their combination are calculated. Then the type of non-operation faults is analyzed. Therefore, the main protection scheme of internal faults for this generator is proposed.

Key words: Generator; internal faults; main protection schemes and their combination; advantages complement

一般为多层前馈网络,分为前层、中层、后层。前层完成隶属函数功能以实现模糊化,中层构成所谓联结主义推理机,后层完成模糊判决。每个节点层的节点数和权值可根据模糊系统所采用的具体模块形式而预置,并通过一定的学习算法自动产生隶属函数的合适形状以及模糊规则。

本文采用极大—极小模糊神经网络进行模式分类和 Modular 模糊神经网络用于函数逼近,其详细结构与算法可参考文献^[6]。

3 模糊神经网络输入与输出量的选取

对于用智能方法进行电力系统暂态稳定性预测,其最大困难一般在于如何准确而有效地确定能充分反映系统状况的特征量。特征量选择的好坏直接影响结果的正确性。本文试图应用 PMU 获得故障发生时刻(t_0)系统的最大摇摆功角 θ_0 、故障中间时刻($\frac{1}{2}t_c$)系统的最大摇摆功角 θ_1 、故障切除时刻(t_c)系统的最大摇摆功角 θ_2 作为输入量,故障切除后某一适当时段(如暂态稳定第一摆)内的系统最大相对摇摆角 θ_{max} 作为输出,利用模糊神经网络来实现暂态稳定性问题的分类和函数逼近任务。

目前电力通信系统的波特率一般可达 4800 ~ 9600bps,在美国邦纳维尔电力局,实际已运行的 PMU 到控制中心间的通讯线路每秒可传送 30 个相量信息^[7]。而保护一般在故障后 0.1s 左右动作,因此在实际应用中,采样周期取为 0.05s,上述三个特征输入量就可以在控制中心由安装在各发电机节点的 PMU 传来的测量信息通过简单计算而获得。

4 函数逼近与分类功能相结合的思想与实现

电力系统暂态稳定性预测问题既可以处理为模式分类问题,其输出分为稳定和不稳定两种模式;也可以处理为数学映射的逼近问题,其输出为度量稳定性的某一连续量。这两种处理方法对于训练样本集的要求、模糊神经网络的结构以及训练方法有很大的差别。

实际上,只要输出量 θ_{max} 在包含稳定与不稳定的临界值 θ_{cr} 在内的某一适当区间 $m = [\theta_{cr} + \theta_{err}, \theta_{cr} - \theta_{err}]$ 内保证一定的精度,便足以满足暂态稳定预测的要求,而且使问题大大简化。因为在此区间外,输出量可以允许有一定的误差,同时,离此区间越远,允许的误差可以越大。根据一般做法, θ_{cr} 通

常可取为 180° , θ_{err} 可在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 间取一适当数值,而且对模糊神经网络输出的误差进行加权处理,采用“远小近大”的原则,也即输出量与 θ_{cr} 的距离越远,权值越小;输出量与 θ_{cr} 的距离越近,权值越大。这就相当于把暂态稳定性预测问题处理为函数逼近与模式分类的结合。

4.1 样本集的获取

当采用模式分类与函数逼近相结合的原则来描述电力系统暂态稳定性问题时,样本的获取是至关重要的一步。对于一个具体的电力系统,需要针对各种实际可能的稳态运行情况,包括不同的负荷水平、各发电厂不同的开机方式、发电机间不同的功率分配,再针对需要考虑的故障类型和不同的故障位置,进行适当的组合;然后,分别对它们进行暂态稳定数值计算,从而得出各种输入量下相应的输出量,这样便得到各个样本。应该指出,对于暂态稳定计算可根据实际需要采用适当的数学模型。

另外,在组合各种样本时,特别应注意的一个问题是,在训练样本集中应有足够数量的样本,这些样本的输出量 θ_{max} 处于稳定与不稳定的临界值 θ_{cr} 附近。因为预测结果的正确率和精确度很大程度上决定于模糊神经网络对这类样本的学习。

4.2 所用网络与算法

经过上述方法选择训练样本集后,各个样本的输出 θ_{max} 将覆盖很大的范围。例如,在稳定性较好的某些运行方式或故障情况下,最大摇摆角 θ_{max} 可能远小于临界值 θ_{cr} ,而在相反的情况下,则可能远大于 θ_{cr} ,有时甚至为数百度或上千度。为此,可先采用一个网络进行预分类;而对输出值在临界值 θ_{cr} 附近的样本则进行函数逼近,若要再进行准确分类,可另采用网络进行模式识别。

本文进行预分类的网络采用极大—极小模糊神经网络,而函数逼近则应用 Modular 模糊神经网络。其训练算法采用混合学习算法,即用竞争学习算法来提取模糊规则,用 BP 算法优化隶属函数。

5 算例及结果分析

本文以 1983 年水利电力部电力科学研究院电力系统计算程序约定考核题给出的 6 机 22 节点系统为例来说明所提出的方法。

线路 11 - 12 是该系统的关键性线路。因此,作为典型情况,这里研究 0s 在线路 11 - 12 两端或中间发生三相短路、单相短路、两相直接短路或两相接地短路时,0.1s 切除故障线路 11 - 12,系统在正常

运行情况和重负荷运行情况下机组不同出力水平组合时系统的暂态稳定性。

表1 训练 FNN 与 ANN 时所采用的参数

FNN 制定模糊规则数	6	BP 网络学习因子	0.3
FNN 中专家网络学习误差	0.001	BP 网络层数	3
FNN 中隶属函数学习误差	0.0001	BP 网络输入节点数	3
FNN 学习率	0.1	BP 网络输出节点数	1
FNN 模糊变量数	4	BP 网络隐层节点数	8
FNN 训练时间	4h32m	BP 网络训练时间	6h53m

在产生样本集时,假定各发电机节点均为 PV 节点,6号调相机有功出力不变,1号发电机组取为平衡机。只考虑正常负荷水平,2~5号机的有功出力分别取自各自额定功率的120%,100%,80%,再考虑四种不同的故障类别和三个不同的故障位置,这样组合方式共有972种,其中1种状态潮流解不收敛,因此实际存在960个模式。考虑负荷水平为130%,115%,85%,70%,各发电机组按比例分配出力,在线路11-12不同位置发生不同故障类型时的样本模式为48个。这样整个仿真样本模式共1008个。随机取456个作为训练样本,全部样本作为测试样本。

对于输出量 $_{max}$ 远离临界值 $_{cr}$ 的样本,事先可把输入量进行模糊化处理,并制定相应的模糊规则,然后利用极大-极小模糊神经网络进行模式分类;而对于输出量 $_{max}$ 在临界值 $_{cr}$ 附近的样本,可应用函数逼近方法来处理。

同时,对上述样本本文采用普通 BP 网络也进行了训练。表1列出了训练模糊神经网络与普通 BP 网络时所采用的参数;表2则列出了训练好的模糊神经网络与普通 BP 网络对上述样本集测试的结果。出于篇幅考虑,对于 m 中的测试样本由于较多,不再列出。

表2 训练出的 FNN 与 ANN 对测试样本的统计结果

比较项目与类型	FNN	ANN	比较项目与类型	FNN	ANN
m 中的平均绝对误差(度)	8.64782	14.06209	m 中的相对误差绝对值的平均值(%)	4.0755	7.2661
对稳定样本的误判个数	9	16	对不稳定样本的误判个数	4	8
对稳定样本的误判率	0.892857	1.587302	对不稳定样本的误判率	0.39683	0.832054

由仿真结果可看出,在进行同样样本集的训练时,模糊神经网络要比一般的 BP 网络所需的训

练时间短。学习后的模糊神经网络对系统稳定与否进行判别正确率相当高,达到了分类的目的;而且对 m 中的样本其估计精度也相当高,实现了对映射的有效逼近。同时,由于模糊神经网络具有能够考虑专家经验,并能自学习提取模糊规则、优化隶属函数等一些优点,因此,其分类正确率和函数逼近精度要比 BP 网络高。从而说明,本文所选特征量以及所用网络和方法能较好地反映系统的实际情况。

6 结论

本文利用模糊神经网络进行电力系统暂态稳定预测,充分利用了模糊系统和神经网络的优点,因而,具有较高的模式分类正确率和函数逼近精度。仿真示例表明,把通过 PMU 或其它方法获取的不同时刻系统最大摇摆角作为模糊神经网络的输入,而把故障切除后系统第一摆时段内的最大摇摆角作为模糊神经网络的输出,能够充分反映系统首摆暂态稳定情况。同时,采用模糊神经网络进行暂态稳定预测,比单独用神经网络分类正确率较高,而且函数逼近精度较好。但应指出,对于复杂电力系统,还需做进一步的研究。

参考文献:

- [1] Chih - Wen Liu, et al. Application of a Novel Fuzzy Neural Network to Real - time Transient Stability Swings Prediction Based on Synchronized Phasor Measurements. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 685 ~ 692.
- [2] Stewart E Stanton, et al. Application of Phasor Measurements and Partial Energy Analysis in Stabilizing Large Disturbances. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 297 ~ 306.
- [3] Steven Rovnyak, et al. Predicting Future Behavior of Transient Events Rapidly Enough to Evaluate Remedial Control Options in Real - Time. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1195 ~ 1203.
- [4] 孙建华. 一种电力系统暂态稳定性快速实时预测方法. 中国电机工程学报, 1993, 13(6).
- [5] Haque M H, Rahim A H. Determination of First Swing Limit of Multimachine Power Systems through Taylor Series. IEE Proceedings - C, 1989, 136(3): 373 ~ 379.
- [6] 王士同. 神经模糊系统及其应用. 北京:北京航空航天大学出版社, 1998.
- [7] Burnett R O. Synchronized Phasor Measurement of a Power System Event. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1643 ~ 1650.

(下转第19页)

对象特性,减少了与传统系统在知识库设计上的差异,以往的规则编制经验可得到更好利用。

(3) 结合开发实例,全面阐述了面向对象知识表示中封装、继承、消息发送、多态、推理等特性的实现,对研究面向对象知识表示的同行具有参考价值。

参考文献:

- [1] 朱永利,盛四清,等.一种新的电网自动接线分析方法.华北电力大学学报,1998,25(3):1~7.
- [2] 翟学明,谢萍,等.电网调度操作票专家系统中的知识表示方法.华北电力大学学报,1998,25(3):98~102.
- [3] 段振国,高曙,等.电网结构知识表示方法研究与管理软件开发.中国电力,1998,32(2):34~37.
- [4] 张学军,王建新.用于电网结构知识表示的框架网络法.电网技术,1998,22(8):18~19.
- [5] 刘青,彭晓兰,等.面向对象的电力系统专家系统设计.电力系统自动化,1997,21(5):33~36.
- [6] 谢萍,王翠茹,等.电网故障诊断知识的面向对象表示法.中国电力,1997,30(2):41~43.

- [7] 陶维青,鲍道良,等.面向对象的发电厂网络开关操作票专家系统.电力系统自动化,1997,21(12):65~67.
- [8] 尤钟晓,卢章辉,等.面向对象的电力系统调度操作专家系统.电力自动化设备,1999,19(1):28~31.
- [9] Forgy C L, Shepard S J, Rete: A Fast Match Algorithm. AI Expert, 1987.
- [10] 张沛超,郁惟镛,等.基于开放结构的网调继电保护日常运行管理专家系统的研究.电网技术,1998,22(12):24~26,30.
- [11] 邵维忠,杨芙清.面向对象的系统分析.北京:清华大学出版社,1998,12.

收稿日期: 2000-06-17

基金项目: 上海市教育委员会重点学科项目;上海交通大学青年基金资助项目。

作者简介: 张沛超(1970-),男,硕士,讲师,主要从事专家系统在电力系统中的应用研究; 胡炎,男,硕士,研究方向为专家系统在继电保护中的应用; 郁惟镛(1940-),男,教授,博士生导师,现从事电力系统及其自动化的教学和科研工作。

The object-oriented knowledge representation paradigm in protection expert system

ZHANG Pei-chao, HU Yan, YU Wei-yong

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Some common used knowledge representation paradigms are compared and why object-oriented knowledge representation(OOKR) is the advanced paradigm is discussed in this paper which is suitable for power system. A new OOKR paradigm with the characteristic of separating knowledge base from inference engine is introduced. Detailed examples from a real protection expert system are given to demonstrate the techniques like encapsulation, inheritance, polymorphism, message-sending and rule-inference in the preferred paradigm.

Key words: object-oriented; knowledge representation; expert system; protective relay

(上接第 15 页)

收稿日期: 2000-05-25; 改回日期: 2000-09-27

作者简介: 苏建设(1972-),男,博士研究生,从事电力系统

安全稳定分析和无功补偿方面的研究; 周佃民(1974-),男,博士研究生,从事电力系统经济调度及电力市场方面的研究; 廖培金(1946-),男,副教授,从事电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中的应用等方面的教学和研究。

Power systems transient stability prediction by using fuzzy neural network based on GPS synchronized measurements

SU Jian-she¹, LIAO Pei-jin², ZHOU Dian-min²

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper presents a transient stability prediction method in which a fuzzy neural network can, on the basis of GPS synchronized generator angles, predict whether the power systems is stable or not after large disturbances. This approach has fully exploited the advantages of fuzzy logic and neural network, i. e., integrating the expert's experience, learning from the sample set, extracting automatically the fuzzy rules and optimizing the membership functions, etc. Therefore, it has high accuracy of pattern recognition and function approximation. The simulation indicates the validity of the proposed method of transient stability prediction.

Key words: power systems; GPS; prediction; transient stability; fuzzy neural network