

智能技术在距离保护中的应用

罗艳娟¹, 曾金²

(1. 长沙电力职业技术学院, 湖南 长沙 410131; 2. 湖南省电力勘测设计院, 湖南 长沙 410007)

摘要: 针对传统的距离保护方法存在许多不足, 提出了一种将 BP 网络与径向基函数网络相结合的距离保护模型。分别采用 BP 网络构建振荡识别子网络, 采用 RBFN 构成的故障检测定位子网络, 并采用附加动量项和自适应学习率等措施增加 BP 算法学习过程的稳定性和收敛速度; 为增加网络训练的确定性, 文中进行了大量的仿真计算, 结果表明, 该方法能够对电力系统的各种故障情况进行正确的识别并且比目前常用的神经网络式距离保护有更高的工作效率。文章最后也分析了神经网络技术在距离保护中存在的确定性, 指出了消除不确定性的措施。

关键词: 智能技术; 距离保护; BP 网络; 径向基函数网络

Intelligent technique application in distance relay protection

LUO Yan-juan¹, ZENG Jin²

(1. Changsha Electric Power Technical College, Changsha 410131, China;

2. Hunan Electric Power Design Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: For the disadvantages of the classic methods of distance relay protection, a distance relay protection mode of combining BP network and radial basis function network (RBFN) is proposed. The BP network is adopted to oscillate identification sub-network, the radial basis function network is used to fault position sub-network, and measures such as additional momentum item and self-adaptive algorithm are employed to increase the certainty of network. The experiment results show that this method is reliably used in the distance protection of power system and has higher work efficiency compared with the method based on commonly artificial neural network. In the end, the uncertainty of the ANN applied in the distance relay protection is analyzed, and the method to avoid the uncertainty is proposed.

Key words: intelligent technique; distance protection; BP network; radial basis function network

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)11-0009-04

0 引言

传统的距离保护是通过测量从保护安装处到故障处的正序阻抗来判断故障是否发生在保护区内。它有许多优点, 如受网络结构和系统运行方式的影响较小等; 但也有许多因素会影响阻抗的测量精度, 如短路点过渡电阻的存在, 使测量阻抗为短路阻抗与附加阻抗之和, 从而会引起误动或拒动。尽管人们已经设计出各种特性的继电器来提高其对过渡电阻的反应能力, 但仍难以满足要求。另外, 系统发生振荡时亦会引起保护的误动作。针对这些不足, 人们提出了许多改进方案, 但任何一种常规的距离保护都仅取系统故障时的一种或两种特征值来进行识别, 因此摆脱不了其先天的不足。

作为传统距离保护的改进, 将智能技术应用于距离保护已经成为一个热点话题。本文尝试采用 BP 网络与径向基函数 RBF (Radial Basis Function) 网

络相结合应用于距离保护的方案。该方案的基本原理就是从系统的各种参数的组合模式来识别故障状态; 从这个意义上说, 其基本原理已与传统保护原理完全不同。它既不用测量阻抗, 也不用规定阻抗继电器的特性。之所以仍称之为距离保护, 是因为它可以实现距离保护的各种功能, 如振荡识别、故障检测等。

1 距离保护模型

人工神经网络 ANN (Artificial Neural Network) 技术在继电保护领域中应用的优势和特点非常明显^[1]。它的并行处理能力能加快保护的计算速度和判别速度; 它的鲁棒性和容错能力可极大地提高数字保护抗干扰的能力和容错能力, 从原理上提高数字保护抗 CT 饱和的能力、适应电力系统故障暂态的能力, 从而提高数字保护整体的安全性、可靠性和稳定性。本文将 ANN 技术应用于距离保护中。

本文采用的距离保护模型由两个独立子网络组成：由 BP 网络构成的振荡识别子网络和由 RBF 网络构成的故障检测定位子网络。振荡识别子网络用来识别系统的振荡状态；故障检测定位子网络用来检测系统中是否发生内部故障及识别故障类型。对于距离保护的任何一个保护段，都需要两个子网络一起作出判断，综合其结果得出结论。来自电流和电压互感器二次侧的电流和电压量经模数转化后由各子网络提取其特征量，加于各输入节点，得出计算结果。由两个子网络输出的结果经过综合判断后，给出系统所处的状态，在保护起动且有区内故障发生时，按故障相别发出保护跳闸命令并给出保护起动、故障相别、系统有无振荡等信号。

1.1 振荡识别子网络模型

1.1.1 电力系统振荡和短路的主要区别：

- 1) 振荡时电流和各点电压幅值的变化速度较慢，而短路时电流是突然增大，电压也突然降低。
- 2) 振荡时电流和各点电压幅值均作周期变化，各点电压与电流之间的相角也作周期变化。
- 3) 振荡时三相完全对称，电力系统中不会出现负序分量；而短路时总要长期（在不对称短路过程中）或瞬间（在三相短路开始时）出现负序分量。

1.1.2 建立振荡识别子网络模型

根据以上电力系统振荡和短路的主要区别，可选取系统三相电流、电压量的幅值及其变化率以及相测量阻抗的变化率作为振荡识别子网络的特征量，将其转换为标幺值并作为振荡识别子网络的输入层节点值。其中，三相电流、电压的幅值以五个周期为计算间隔，连续计算三次，作为同一特征量的三个节点，对应着十八个输入层节点。变化率特征量计算间隔取为一个周期，连续计算三次，对应着二十七个输入层节点。输出层节点一个，当系统处于振荡状态时其值为 1，否则，其值为 0。该模型原理结构图如图 1 所示的三层 BP 网络。

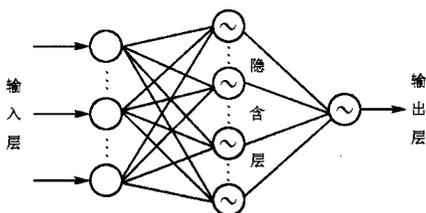


图 1 BP 网络结构示意图

Fig.1 The BP neural network

设有 N 个样本 (x_k, y_k) ($k=1, 2, \dots, N$)，对某一输入 x_k ，网络输出为 y_k 。第 L 层的神经元个数为 N_l ($l=1, 2, 3$)，除输入层以外，各神经元的特性为

Signoid 型，第 L 层第 i 个神经元的输入变量用 $o_{ik}^{(l)}$ 表示，由第 L 层的第 j 个神经元到第 $L+1$ 层的第 i 个神经元的权系数用 $w_{ij}^{(l+1)}$ 表示，第 L 层第 i 个神经元的输出变量用 $net_{ik}^{(l)}$ 表示。设 \hat{y}_k 为网络的实际输出。

代价函数使用平方误差函数：

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N E_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (1)$$

$$net_{ik}^{(l)} = \sum_{j=1}^{N_{l-1}} w_{ij}^{(l)} O_{jk}^{(l-1)} \quad (2)$$

为增加学习过程的稳定性，改进 BP 算法的收敛速度，本文采用附加动量项和自适应学习率等措施，则改进后的权值修正量为

$$\Delta w_{ij}^{(l)}(t+1) = -\eta \frac{\partial E_k}{\partial w_{ij}^{(l)}} + \alpha \Delta w_{ij}^{(l)}(t) \quad (3)$$

其中： η 为增益项， α 为矩参数。

1.2 故障检测定位子网络模型

1.2.1 故障检测定位子网络的基本算法原理

对于故障特征的判别可以利用三种分量，即电流正序、负序和零序值。

- 1) 单相接地短路时的故障边界条件为： $I_{f1}=I_{f2}=I_{f0}$
- 2) 两相短路时的故障边界条件为： $I_{f0}=0, I_{f1}=-I_{f2}$
- 3) 两相短路接地时的故障边界条件为： $I_{f1}+I_{f2}+I_{f0}=0$
- 4) 三相短路故障时的故障边界条件为： $I_{f2}=I_{f0}=0$

1.2.2 建立故障检测定位子网络模型

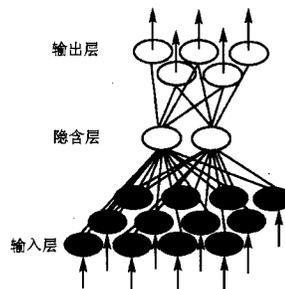


图 2 径向基函数网络结构示意图

Fig.2 The radial basis function network

由于电力系统发生不同故障时的故障边界条件不同，因而我们选取故障处电流、电压向量的实部和虚部以及电流正序、负序和零序值作为故障检测定位子网络的输入特征量，将其标幺值直接加于网

络的输入层节点。为增强网络对输入量的容错能力, 每一个特征量连续计算三个采样点, 这样, 故障检测定位子网络的输入层数目确定为四十五个。其输出层有五个节点。当取其值为 1 时, 分别代表单相接地、两相短路、两相接地短路、三相短路和保护起动。

由于过渡电阻和两侧系统电势夹角的存在, 使得距离保护中的故障定位成为一个非常棘手的问题。因此本文采用径向基函数网络来实现故障检测定位子网络, 该模型原理结构图如图 2 所示。

RBF 网络是一个 3 层网络由径向基函数构成, 同 BP 网络一样, 属于前向神经网络。与 BP 网络不同的是, RBF 网络的输出层节点是线性的, 隐含层节点(亦称 RBF 节点)的传递函数为中心对称的接收场(receptive field), 而输入层节点只是传递输入信号到隐含层。通常 RBF 网络隐含层节点的传递函数取为辐射状作用函数高斯函数, 则第 i 个节点对应的输出为:

$$R_i(x) = \exp \left[- \frac{\left(\sum_{j=1}^N (x_j(t) - c_{ij})^2 \right)}{2\sigma_i^2} \right] \quad (4)$$

$1 \leq i \leq L$

式中: $R_i(x)$ 为第 i 个隐含层节点的输出(即径向基函数); $x_j(t)$ 为第 t 个输入样本中第 j 个输入层节点; c_i 为隐含层中第 i 个节点的变换中心矢量; σ_i 为对应第 i 个中心矢量的控制参数(也称为形状参数)。

RBFN 的输出层节点为简单的线性处理单元, 其第 j 个节点对应的输出为:

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^L w_{ij}(k) R_i(t) + \theta_j(k) \quad (5)$$

$1 \leq j \leq M$

式中: $w_{ij}(k)$ 为输出层第 j 个节点与隐含层第 i 个节点间的第 k 次迭代时的权值; $\theta_j(k)$ 为输出层第 j 个节点第 k 次迭代时的阈值。

RBF 网络的隐含层节点的作用是将输入样本空间映射到高维的径向基函数空间内。对输入信号将在局部产生响应, 也就是说, 当输入信号靠近作用函数的中央范围时, 隐含层节点将产生较大的输出, 因此 RBF 网络有时也被称为局部感知场网络。假设隐含层节点数目和接收场的形状参数都是固定的, 那么, 对于复杂的大规模网络 RBF 网络的训练学习只集中在隐含层到输出层的连接权矢量中, 这

时, 显然 RBF 网络要比 BP 网络训练简单, 具有更快的收敛速度。

2 距离保护模型的训练及检验

对此距离保护模型的训练与检验, 本文是以图 3 所示的一个 500 kV 两端供电的系统为例进行的, 其元件参数如图 3 所示。

第一步首先利用高级程序编写程序对该电力系统可能的各种故障状态进行大量仿真计算, 然后对计算所得到的数据进行不同的特征量提取后, 便可得到各子网络输入层节点的值, 即得到大量的训练、检验样本, 以此进行网络的训练与检验。由于本文提出的距离保护模型的两个子网络是相对独立的, 因此首先分别对它们进行训练, 以得到各自的权值矩阵和阈值矩阵, 然后用一些不同于训练样本的检验样本对他们同时进行检验, 综合判断各子网络的输出结果, 得出最终的测试结果。而每一个子网络的隐含层节点的数目是在训练过程中确定的。表 1、2 分别给出了两个子网络部分测试结果。

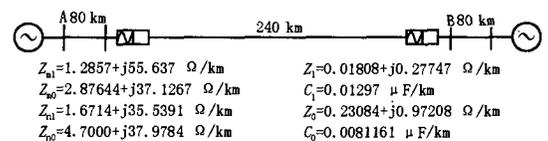


图 3 电力系统仿真模型图

Fig.3 Power system for simulation

表 1 振荡识别子网络测试结果

Tab.1 Results of oscillation identification

故障类型与振荡	实际输出	理想输出
正常状态	0.00076413	0
振荡状态	0.00083506	0
正常时故障	0.99903740	1
振荡时故障	0.99911952	1

表 2 故障检测定位子网络测试结果

Tab.2 Results of fault position

故障类型	实际输出	理想输出
单相故障(83%)	0.9973,0.0001,0.0000,0.0015,0.9996	1,0,0,0,1
两相短路(83%)	0.0000,0.9940,0.0000,0.0001,0.9998	0,1,0,0,1
两相接地短路(83%)	0.0000,0.0051,0.9911,0.0000,1.0000	0,0,1,0,1
三相短路(83%)	0.0023,0.0000,0.0000,0.9965,1.0000	0,0,0,1,1
单相故障(84%)	0.9963,0.0000,0.0000,0.0009,0.9992	1,0,0,0,1
两相短路(84%)	0.0000,0.9930,0.0000,0.0001,1.0000	0,1,0,0,1
两相接地短路(84%)	0.0001,0.0045,0.9904,0.0000,1.0000	0,0,1,0,1
三相短路(84%)	0.0019,0.0000,0.0000,0.9951,1.0000	0,0,0,1,1

从测试结果可以看出, 网络的实际输出与理想

输出非常接近,网络能够正确识别各种情况下的故障,对发生于保护范围以内的,给出跳闸信号,而对保护范围以外的各种故障(区外故障)不动作,从而实现距离保护的自适应。

3 神经网络确定性的讨论

从上面的仿真实验分析可知,由于ANN具有独特的优点,采用ANN模型作为距离保护模型是一种有效的方案。然而ANN在距离保护方面也有其突出的薄弱环节。由于ANN的知识全部储备在网络结构中的权系数中,而这些权系数的获得是通过已知样本的学习后获取的。在电力系统中这种样本空间个数是无限的,不可能全部获取。在距离保护领域中甚至较全面地获取样本都不可能。那么这样的权系数所含有的知识将是有限的。若使用在千变万化的电力系统中,当遇到的情况是未经训练(很有可能),ANN网络只能根据已有知识(权系数)来分析计算,结果就可想而知。在距离保护领域,ANN的实际应用是一项技术难题。因此,在距离保护上迫切需要一种具有“综合”能力的技术,能将各种原理和算法的特点和优势“综合”起来,各尽所能,发挥优势,抑制和消除劣势。

传统的距离保护方式虽然有一些缺点,但应该看到,传统的保护方式在实际应用当中是最多的。数十年的保护理论研究对电力系统的贡献是不可忽视的。因此,将传统的保护方式与ANN相结合,发挥各自的优点,弥补其不足,将大大提高数字保护整体的安全性、可靠性和稳定性。基于此,文献[4]将继电保护的原理和ANN技术有机地结合了起来,充分发挥了继电保护的原理优势和ANN的技术特点,使保护和ANN网寻找到了一个最佳的结合途径。为研制高可靠、高稳定高灵敏度的保护提供了有效的途径。将传统的距离保护原理与ANN相结合,将是改善ANN不确定性的一种有效方法,这将是下一步要进行研究的内容。

4 结论

本文采用的距离保护模型,其中振荡识别子网络由于本身网络结构比较简单,用本文采用的附加

动量项和自适应学习率等措施的改进BP网络就已可以达到我们训练快速与稳定性要求。然而故障检测定位子网络由于网络结构复杂,用BP网络训练时间过长并且易陷于局部极小点,因此本文采用RBF网络来实现故障检测定位子网络,训练和检验结果表明,采用RBF网络来实现故障检测定位子网络时所需的训练时间不足1min,远远小于采用传统的BP网络的训练时间,同时在网络的分类精度上也能满足保护的要求。可见本文采用的距离保护模型是一种可行的、有效的方案。同时,分析了ANN应用于距离保护中存在不确定性的不足,并提出了改进的措施,这也是下一步将要进行的研究内容。

参考文献

- [1] 段玉倩,贺家李.基于人工神经网络的距离保护[J].中国电机工程学报,1999,19(5):67-70.
DUAN Yu-qian, HE Jia-li. Distance Protection Based on Artificial Neural Networks[J]. Proceeding of the CSEE, 2002,22(11):35-40.
- [2] 席晓丽,张举.基于神经网络的距离保护训练算法的研究[J].继电器,2005,33(4):26-30.
XI Xiao-li, ZHANG Ju. Research of Training Algorithm for Distance Protection Based on ANN [J]. Relay,2005,33(4): 26-30.
- [3] 候媛彬,汪梅,王立琦.系统辨识及其MATLAB仿真[M].北京:科学出版社,2004.
HOU Yuan-bin, WANG Mei, WANG Li-qi. System Identification and Its Simulation with Matlab [M]. Beijing: Science Press,2004.
- [4] 陆于平, Lai L L. 陈珩.基于保护原理的神经网络技术研究[J].电网技术,2002, 26(1): 34-39.
LU Yu-ping, L. L. L ai, CHEN Heng. Study on ANN Based Protection Principle [J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 34-39.

收稿日期: 2006-11-27; 修稿日期: 2007-01-27

作者简介:

罗艳娟(1972-),女,学士,高级讲师,从事电力系统教学研究; E-mail:wjx001@sohu.com

曾金(1973-),女,高级工程师,从事电力系统二次设计研究工作。