

神经网络在电力系统自适应单相重合闸中的应用

唐蕾,陈维荣

(西南交通大学电气化自动化研究所,四川 成都 610031)

摘要: 根据现代控制技术中电力系统继电保护的要求,把人工神经网络理论应用于自适应单相重合闸中,并分析了原理实现的可行性,为牵引供电系统中自适应重合闸提供了一条新的思路和途径。

关键词: 神经网络; 继电保护; 自适应重合闸

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2003)08-0026-04

1 引言

电力系统继电保护是保证供电系统安全运行和提高供电质量的重要工具。根据我国铁路牵引供电系统的实际情况,包括牵引变电所高压进线、主变压器、牵引网及动力供电等各方面的保护^[1]。随着电力系统和牵引供电系统的发展,国内外对电力系统继电保护的研究也高潮迭起,取得了巨大的成果。

自动重合闸作为保证电力系统安全供电的有效措施之一,在电力系统中得到了广泛的应用。在电力系统故障中,有70%~80%的线路故障为单相接地故障,到目前为止,对于单相接地故障时的自动重合闸,均采用只跳开故障相并进行自动重合的措施。在采用重合闸时,若重合于瞬时性故障,固然可以提高供电的可靠性及系统的稳定性;但若重合于永久性故障时,则会带来一些不利的影 响,使电力系统又一次受到故障的冲击,断路器的工作条件变得更加恶劣^[2]。为了防止重合于永久性故障,产生了自适应重合闸,即在重合闸之前,预测线路的故障是瞬时性还是永久性的。

本文就继电保护中的自适应单相重合闸问题,将人工神经网络用于其中,提出了基于神经网络的自适应单相重合闸方案,为牵引供电系统继电保护和复杂故障的检测提供了一条新的思路和途径,它的研制成功将对延长供电设备寿命、减小故障发生率、提高供电质量等产生深远的影响。

2 现有重合闸方法及缺陷

自动重合闸广泛地用于电力系统中,电力系统的架空输电线路及接触网的短路故障大多是瞬时自消性的,如将线路重新合闸,就能恢复正常供电。但对于有些故障来说,它是永久性的,如果断路器合在永久性故障上,就会对系统设备造成不必要的冲击。

目前已经提出的判别永久性故障及瞬时性故障的方法有电压判别法和电压补偿判别法。这两种方法简洁、明了,对部分线路能够作出判断,但由于它们没有综合考虑系统参数的影响,对一些特殊工况,如长线路,它们有误判的可能,需要完善。以电压判别法为例,高压输电线路具有分布参数的特征,并且各相中存在耦合电容,单相故障时故障相被断开后,该相仍残存电压,可以以此来判别故障是瞬时性的还是永久性的。

2.1 故障时的端电压值分析

瞬时性故障线路模型见图1,此时故障相断开,系统进入两相运行,端电压由电容耦合电压和电感耦合电压合成。

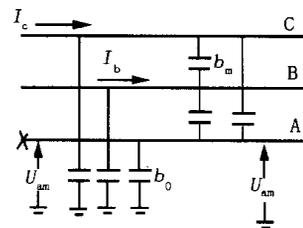


图1 单相接地故障跳开后系统的运行状态

Fig. 1 System's operation state after the single-phase earth fault is cleared

$$\text{电容耦合电压为: } U_y = \frac{b_1 - b_0}{2b_1 + b_0} U_a$$

式中: b_1 、 b_0 为单位线路的正、零序导纳; U_a 为正常相电压。

故障相上的互感电压为:

$$U_{xl} = \frac{1}{3} (I_b + I_c) Z_m = I_0 (Z_0 - Z_1) L$$

式中: Z_m 、 Z_1 、 Z_0 分别为线路单位长度的互感抗和正、零序感抗; I_0 为故障相上流过的零序电流; L 为线路长度。

此时,故障相端电压可用图2的等值电路分析。

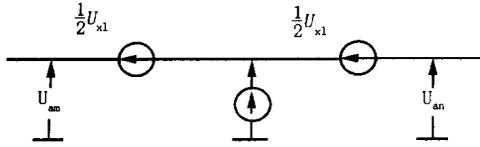


图2 T型等值电路

Fig. 2 T-type equivalent circuit

此时两处端电压为:

$$|U_{an}| = \sqrt{U_y^2 + \left(\frac{1}{2}U_{xl}\right)^2 - U_y U_{xl} \cos(90^\circ + \theta)}$$

$$|U_{am}| = \sqrt{U_y^2 + \left(\frac{1}{2}U_{xl}\right)^2 - U_y U_{xl} \cos(90^\circ - \theta)}$$

为功率因数角,当 $\theta = 0$ 时有:

$$|U_{am}| = |U_{an}| = \sqrt{U_y^2 + \frac{1}{4}U_{xl}^2}$$

线路发生永久性接地故障时,对地分布电容稳定放电,导致 $U_y = 0$,故障相两端电压由电感耦合电压和接地点的位置决定,当故障点离 m 端为 kL ($0 < k < 1$) 时:

$$U_{am} = kU_{xl}, \quad U_{an} = (1 - k)U_{xl}$$

2.2 电压判据算法

当线路发生瞬时性故障时,故障相的端电压由电容耦合电压 U_y 和电感耦合电压 U_{xl} 两部分合成。当线路发生永久性故障时,对地电容稳定放电,故 $U_y = 0$ 或较小,故障相电压仅由电感耦合电压决定。

从以上分析可见,瞬时性故障时故障相的端电压要大于永久性故障时故障相的端电压。自适应重合闸的电压判据算法就是基于上述两种情况时的电压提出的。电压判据算法可表示为:

$$C_v = \left| \frac{U}{U_{xl}} \right| = \left| \frac{U}{I_0(Z_0 - Z_1)L} \right|$$

其中: U 为故障相断开后故障相两端的电压。

判据的动作条件为:当 $C_v \geq 1$ 时,判定为瞬时性故障,允许重合;当 $C_v < 1$ 时,判定为永久性故障,闭锁重合。

一般情况下,电压判据都能正确判断,当 m 端口发生永久性接地短路时, $U_{am} = 0$, $U_{an} = U_{xl}$ 。由于电网参数、电压与电流测量值、计算值都有一定的误差,有可能造成 $U_{an} > U_{xl}$,此时,采用电压法判据将判定为瞬时故障,予以重合。可见,线路任一端口附近发生永久性单相接地短路时,对端保护可能存在一小段的误判区,将永久性故障判为瞬时故障。

电压补偿判别法的原理和缺陷与电压法判据相类似。其总体缺陷体现在对长距离动作,现有的判

据会将瞬时故障误判为永久故障,以致瞬时故障不重合,扩大了事故范围;在端口附近发生永久性短路时,对端可能存在一小段的误判区,重合于永久故障,造成对系统的冲击。为解决这个问题,有人提出用数学分析方法如小波变换对故障情况下的端电压进行分析;也有人利用图形分析方法,通过故障录波将断路器跳闸后的线路首端电压波形录制下来,利用图形模糊分析技术判定故障情况^[6]。

本文提出将神经网络用于自适应控制中,正确区分故障信息。

3 BP神经网络在自适应重合闸中的应用

神经网络是基于模仿生物大脑结构和功能而构成的一种信息处理系统,分为生物神经网络(Biological NN, BNN)和人工神经网络(Artificial NN, ANN)。在信号、信息处理机制上,人工神经网络与传统的数字计算机有着根本的不同,它具有(对模拟量或离散量进行)大规模并行处理和集体运算的特点,信息的存贮体现在神经元互连的分布上,它具有很强的鲁棒性和容错能力、自适应和学习能力^[5]。

神经网络具有分布式存储知识的结构,它不仅可以存储大量信息,而且连接权与连接结构都可以通过学习和训练得到。因此,不管电力系统发生多大的变化,如果系统可以仿真,那么只要事先利用仿真结构(或运行经验数据)对神经网络进行训练,使其产生所要求的响应(如对于重合闸故障判断中,永久性故障时取0,瞬时性故障取1),便可具备区分故障的能力。在运行中,若加入神经网络的信号是训练过的,那么一定会产生正确的输出;若加入的信号未经过训练,那么神经网络也能在已存储的知识中找到与输入信号匹配最好的知识为其解,据此将输入信号归并分类为已存知识中的某一类,产生相应的输出,从而正确地推断出系统的状态。由于神经网络在对输入信号分类的过程中依据了大量的知识(存储在权中的知识),所以它正确区分故障能力很强,可靠性很高。

目前在电力系统中广泛采取的 ANN 模型是一种无反馈多层前向网络—BP网络^[3]。1989年,Robert Hecht-Nielson证明了对于闭区间内的任何一个连续函数都可以用一个隐层的BP网络来逼近,因而一个三层的BP网可以完成任意的 n 维到 m 维的映射,这实际上已经给出了一个基本设计BP网络的原则。增加层数可以降低误差,提高精度,但同时会使网络复杂化,从而增加了网络权值的训练时间。

前向神经网络由输入层、隐含层、输出层组成,如图 3 所示(以三层为例)。

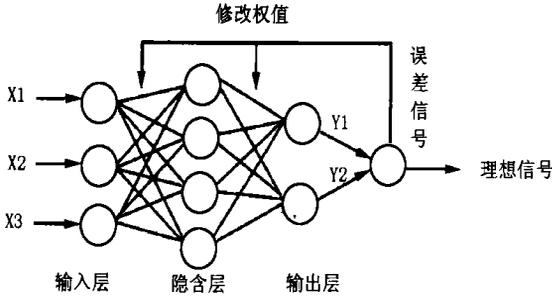


图 3 BP 网络结构
Fig 3. BP network structure

BP 网可以有多个层,理论分析表明三层 BP 网可以模拟任意的非线性映射, BP 网络中每个神经元可有任意多个输入,但只有一个输出,而输出可以耦合到任意多个其它神经元的输入,并且第 i 层神经元输入只能是第 $i-1$ 层神经元的输出。它的学习过程及原理见文献[3]。

自适应重合闸从研究范畴上说是属于模式分类的内容,故障发生后,对系统的运行状态进行分类,判断是瞬时性还是永久性故障,重合闸的最终目的是根据系统状态获得一个重合脉冲或不发脉冲,可设想将系统状态量及外部量值作为神经网络的输入,使神经网络经过训练学习后学会特定的映射关系,当实际系统参数输入网络后,网络可以根据内部处理结果输出是否合闸的信号。本文采用三层 BP 网络,输入层与输出层的神经元数目根据实际情况确定,隐含层的节点数在训练过程中确定。

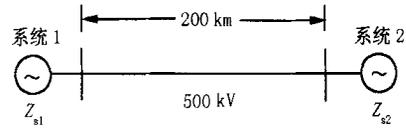
从简化仿真训练角度来考虑,由于系统三相对称,只考虑一相(设为 B 相)接地故障。故障相 B 相被切断后,系统进入非全相运行状态,此时非故障相 A 和 C 相的电压将发生变化,从而影响负荷电流的大小,进而影响故障相端电压的大小,另外, A 相和 C 相的电流直接影响到电感耦合电压。

BP 网络在电力系统的应用中,特征输入量的选取是一个关键的问题,最好是所选取的特征输入量能够反映瞬时性故障与永久性故障之间的不同,若特征量取得过少,会影响精确性;取得过多,会影响 BP 网络的收敛速度。当 B 相出现故障时,电压的暂态分量包含有各种不同频率的分量,可以考虑通过对电压作频域分解形成输入量。在此选取故障相 B 中的基波分量、直流分量以及高次谐波作为输入量,原因在于:瞬时性故障时断路器两端的基波电压差值较小,而永久性故障时差值较大;直流分量的幅值

和衰减时间也随故障不同而不同;对于不同性质的故障,线路分布电容产生的高次谐波不同。这样就可以根据故障后故障相侧断路器两端的电压波形分成若干周期,对每一个周期采用滤波技术获取三个分量作为 BP 网络的特征输入量。

输入层节点数为 3,输出层的节点数取为 1,隐含层定为 4,当发生单相瞬时性故障时,节点值取为 1;永久性故障时取为 0。

选取图 4 所示的 500 kV 双侧电源系统作为研究对象,输电线路具体参数根据实际情况及经验取得,如图所示。其中,电源参数用集中参数表示,线路参数用分布参数表示。



$$R_1=0.0256 \text{ } \Omega/\text{km}; X_1=0.2804 \text{ } \Omega/\text{km}; R_0=0.2780 \text{ } \Omega/\text{km}; X_0=0.881 \text{ } \Omega/\text{km};$$

$$Z_{s1}=j0.5373 \text{ } \Omega; Z_{s2}=j0.1690 \text{ } \Omega; C_1=0.0132 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}; C_0=0.0090 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$$

图 4 电力系统接线示意图

Fig. 4 Connection sketch of electric power system

为了反映各种因素对判别结果造成的影响,仿真过程中从两侧系统的相对阻抗角、不同故障地点和不同故障类型取得直流分量、基波分量和三次谐波三种输入的近似值,对 BP 网络进行训练,表 1 列出了部分样本及结果,实际结果与理论结果非常接近。将神经网络用于故障状态的判别中效果很好,当线路发生故障时,可以克服自适应重合闸中误判的缺点。

表 1 部分样本及结果

Tab. 1 Parts of samples and output

直流分量	基波分量	三次谐波	故障地点	故障类型	实际输出	理想输出
786.25	487962.54	879.318	线路全	瞬时性	0.9768	1
			长 15 %	永久性	0.0015	0
175.782	314729.01	269.258	线路全	瞬时性	0.0089	0
			长 65 %	永久性	0.9172	1
1869.06	453678.24	3087.42	线路全	瞬时性	0.99987	1
			长 85 %	永久性	0.00892	0

4 结论

将人工智能技术引入继电保护在线应用是一项开创性的工作^[5]。本文将神经网络理论引入继电保护自适应重合闸原理中,通过理论分析证明对于判断永久性故障或瞬时性故障有很好的效果。但由于文中所用 BP 网络本身的一些缺陷^[3],如它按梯度下降来调节权值,存在局部极值的问题,以及它对学习

样本质量的要求等,使得它在具体应用中还存在一定的误判缺陷,有待完善。

重合闸过程中的不确定性可以用模糊理论来解决,并已有相关文献研究模糊决策用于自动重合闸^[4]。模糊逻辑系统与神经网络都只需要根据输入、输出样本来建立输入与输出之间的非线性映射关系,但又各有优缺点,实际应用中可以将两者结合起来,各取所长,构成模糊神经网络,解决两者各自带来的问题。

参考文献:

- [1] 潘启敬. 牵引供电系统继电保护[M]. 北京:中国铁道出版社,1996.
- [2] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
- [3] 靳蕃. 神经计算智能基础原理·方法[M]. 成都:西南交

通大学出版社,2000.

- [4] 林湘宁,朱海昱,刘沛. 基于模糊综合决策的自动重合闸优化判据的研究[J]. 电力系统自动化,1997,(9):31-34.
- [5] 张秀峰. 神经网络在继电保护中的应用[J]. 西南交通大学学报,1995,(12):694-700.
- [6] 龚顺利. 牵引变电所自适应重合闸的探讨[J]. 电气化铁道,2002,(1):20-21.

收稿日期: 2002-11-19; 修回日期: 2002-12-31

作者简介:

唐蕾(1978-),女,博士研究生,研究方向为变电站综合自动化;

陈维荣(1965-),男,教授,博士生导师,副所长,研究领域为变电站综合自动化及神经网络与小波理论在电力系统中的应用。

Neural network's application in adaptive single-phase reclosing of electric power system

TANG Lei, CHEN Weirong

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: According to the requirement of relay protection of power system in modern control technology, an artificial neural network is applied to adaptive single-phase reclosing. The feasibility of this method is analyzed. This paper provides a new idea and approach for adaptive reclosing in traction supply system.

Key words: neural network; relay protection; adaptive reclosing

继往开来 再攀高峰

——《继电器》将从2004年起

由月刊改为半月刊

《继电器》遵循“关注学科发展,理论联系实际,面向应用,为科研、生产一线服务”的宗旨,为广大业内人士提供了一个活跃的学术交流园地。

《继电器》从1973年创刊以来,已取得了一系列令人瞩目的成就:多次被列为全国中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊,荣获“中国期刊方阵”双效期刊奖,并于2002年被国际著名检索机构——英国科学文摘(SA)和俄罗斯文摘杂志(AJ)收录,同时被国内知名的期刊网站中国期刊网、万方数据库等收录,在业界产生了很大的影响。

为了更及时、有效地反映学科发展,紧跟时代步伐,服务于科研、生产一线,进一步拓展国内外的交流与合作,《继电器》将从2004年起由月刊改为半月刊。

欢迎大家积极投稿、订阅、刊登广告,一如继往地支持《继电器》!