

牵引馈线自适应重合闸技术研究

李学武, 吉鹏霄

(郑州铁路职业技术学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 就牵引馈线的自适应重合闸问题展开研究, 提出了应用小波变换与神经网络相结合的方法来识别瞬时性故障与永久性故障, 并应用 Matlab 软件进行了大量的仿真计算, 仿真结果表明, 应用小波变换与神经网络相结合的方法, 故障识别的准确性较高, 且没有误判现象。

关键词: 自适应重合闸; 小波变换; 神经网络; 牵引馈线

Research of the adaptive auto-reclosure technique of tractive feeder

LI Xue-wu, JI Peng-xiao

(Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: This paper analyses adaptive auto-reclosure of tractive feeder. A method based on wavelet transform and artificial neural network is proposed to distinguish transient faults from permanent faults. MATLAB software is employed to put up much simulation calculation. A large number of simulation results show that the accuracy of identification of fault type is relatively high, and there is no wrong judgement with the wavelet transform, artificial neural network with the method based on wavelet transform associated with artificial neural network.

Key words: adaptive auto-reclosure; wavelet transform; artificial neural network tractive feeder

中图分类号: TM762

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)14-0033-05

0 引言

自动重合闸是保证牵引供电系统安全供电的重要举措。统计资料表明, 年百公里电气化铁路的短路跳闸为62次, 其中约2/3由瞬时性故障引起, 可实现重合闸成功^[1]。但是, 由于传统的牵引馈线重合闸都是在不清楚故障性质的情况下盲目进行的, 当重合于永久性故障时, 对系统稳定和电气设备所造成的危害将非常严重。

为了避免重合于永久性故障给系统稳定运行所带来的不利影响, 产生了对于自适应重合闸的研究。80年代初葛耀中教授提出“自适应重合闸”的思想^[2], 他的一系列研究成果奠定了这一领域的研究基础^[3~6]。自适应重合闸的关键在于如何区分与判别瞬时性故障和永久性故障, 如果是瞬时性故障, 则进行重合闸; 如果是永久性故障则闭锁重合闸。

对自适应重合闸这一课题, 大多数研究还没有达到实用阶段, 还有许多尚未解决的问题。另一方面, 神经网络、小波分析等新技术的发展以及微机保护的完善, 为自适应重合闸问题的解决提供了新的技术手段, 所以, 这一课题的研究还会进一

步深入, 特别是对我国电气化铁路来说, 这一研究显得更有实际意义。

1 基于小波神经网络的牵引馈线自适应重合闸研究

1.1 牵引网接地短路的物理过程分析

我们可以将牵引网接地开始到故障点消失划分为三个时间段:

时段 I (从牵引网发生接地短路到馈线断路器跳闸): 在此时段, 瞬时性故障和永久性故障下电弧的变化是不同的, 永久性故障情况下弧光会很快熄灭, 因此可被认为是经过一个线性电阻接地; 瞬时性故障下电弧会经历熄灭、重燃、再熄灭、再重燃等数个周期, 因此, 瞬时性故障必须要用一个非线性电阻来模拟。牵引网接地后, 接地点有无电弧的产生必然在接地牵引网两端的电压和电流波形中产生影响。

对于含有时变电阻的电路, 我们只能采取仿真的手段, 并由仿真结果提出一个基于统计模式识别的基本判据并加以验证。在0.01 s时刻发生单相接地永久性故障和瞬时性故障, 保护安装处故障牵引

网电压波形分别如图1、图2所示。

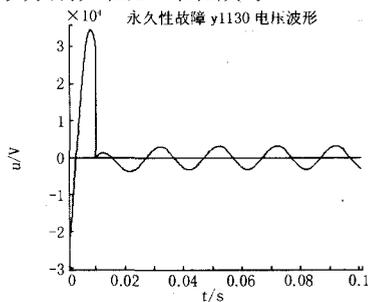


图1 永久性故障时保护安装处电压波形

Fig.1 Voltage waveform of permanent fault at relays place

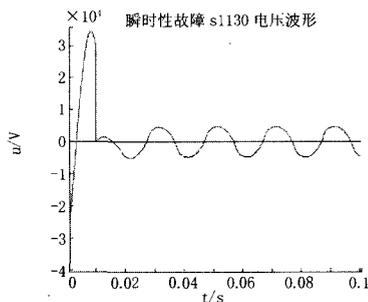


图2 瞬时性故障时保护安装处电压波形

Fig.2 Voltage waveform of temporary fault at relays place

对比图1和图2我们在直观上可以得到一个结论,就是瞬时性故障下故障牵引网电压波形的畸变程度要比永久性故障下故障牵引网电压波形的畸变程度要大,而且由于电弧电阻因素,其畸变所持续的时间要长一些。因此可以由此特性出发设计相关判据来区分这两种故障形式。

时段II(从馈线断路器跳开到瞬时性故障点消失):馈线断路器跳开后,除了开断时故障牵引网上残存电荷建立的直流残压外,相邻牵引网可能通过耦合关系在断开牵引网上建立起一定幅值的电压。根据故障类型的不同,相应的电流电压大小和波形也必然不同,但其幅值会受到线路运行参数的影响。

时段III(瞬时性故障点消失后,或者永久性故障完全稳定后):永久性故障稳定后,故障相与健全相之间只有相间耦合联系,健全相的电压和负载电流分别通过相间静电耦合和电磁耦合在被开断相上产生感应电压。瞬时性故障时,接地处的电弧将消失,线路绝缘恢复,其恢复电压是电容耦合电压和电感耦合电压的相量和;永久性故障时,当接地电阻很小时,可以不考虑电容耦合电压分量,故障相两端的电压主要由电感耦合电压组成。在相邻牵引网同样运行状态下,故障牵引网在瞬时性和永久性两种故障情况下所表现出来的恢复电压必然不同,藉此也可区分瞬时性故障和永久性故障。

综上所述,在故障发生后的三个时段,瞬时性故障与永久性故障的电气参量均有所不同,都可作为区分故障类型的判据。但是,区分电气参量大小的变化需要参考具体线路的边界条件才能明确故障类型,且具有不规则性;而电气参量的波形却体现了不同的短路故障的本质特征,也就是说,大小只是一个量的变化,但波形却代表着一个质的不同。

从时间上来考虑,如果选择时段I就开始检测故障类型,可以有更充足的时间判断故障类型,确定重合与否。要在故障发生后即对故障类型进行判断,必须从故障电压的波形来区分。因此,在时段I通过检测波形的办法判断故障类型是最佳的选择。

1.2 基于小波变换与神经网络的波形检测思路及其优势分析

通过对牵引网瞬时性故障和永久性故障的物理特性分析,直观上我们知道瞬时性故障下故障相电压畸变程度要远远大于永久性故障下的电压畸变程度,仿真波形也验证了该想法,复杂度足以提供用于鉴别的足够特征。由小波分析相关知识也可推知相应的小波变换系数绝对值在某尺度下也将比永久性故障下的小波变换系数绝对值大。

电压幅值判别法都是以故障牵引网在时段II和时段III的电压幅值作为检测量来区分故障类型的,而没有充分利用时段I中故障所提供的信息和时段I的时间。在实际牵引供电系统中,为了躲过电力机车内部故障时其自身保护动作时间(0.06~0.08 s),牵引馈线主保护动作时间一般设置为0.1 s^[7],加上馈线断路器的分闸时间(约0.02 s),这样从故障产生到断路器分闸成功,大概有120 ms的时间没被利用起来,即工频电压6个周期的时间。考察其物理过程可知,故障牵引网在时段I的电压和电流能够充分表达故障类型的信息,因此,我们可以用检测在时段I故障牵引网电压的波形畸变来判别故障类型。

小波变换在时域和频域上同时具有良好的局部化性质,对具有奇异性、突变性的故障信号检测和故障点的定位准确、可靠。小波变换在电力系统状态监视、故障检测、信噪分离、故障信号特征信息的提取等多方面应用前景广阔。而人工神经网络作为智能控制的一个重要分支,能够模拟任意复杂的非线性关系,并具有高度的容错性、很强的鲁棒性、强大的并行处理能力及自适应学习能力,因而被广泛应用于电力系统中的模式识别和模式分类等方面。因此,将小波变换与人工神经网络相结合,应用在自适应重合闸中,利用小波变换在提取故障

电压波形特征信息方面的优势及人工神经网络突出的自适应学习能力, 将会为自适应重合闸技术的改进提供一条新的途径。

1.3 牵引馈线自适应重合闸实现策略

基于小波变换与人工神经网络的牵引馈线自适应重合闸总体实现策略是: 首先进行大量的故障仿真, 然后根据仿真结果, 用小波变换提取特征量, 并以此特征量作为人工神经网络输入, 形成训练样本。网络训练完成后, 就可以根据实时采集的信息, 区分瞬时性故障与永久性故障, 选择是否进行重合闸。

1) 小波变换分析与特征量的获取

由于 Daubechies 小波对不规则信号较灵敏, 因此在电力系统故障分析中得到广泛的应用。同时, db4 小波相对于其他 db 小波, 具有最短的时窗, 因而比其它小波有更好的时间分辨率^[8]。因此, 以 8 000 Hz 的采样频率对发生短路故障之后第二个周期的接触网故障电压波形进行采样, 再通过 db4 小波对采样得到的该周期故障电压信号进行 5 尺度的分解, 分解后得到该周期电压信号的细节系数 cd5。对细节系数 cd5 进行数据归一化处理, 形成神经网络输入量。

2) BP 网络的选择、构建及其训练

表 1 网络参数

Tab.1 Network parameter

网络参数			训练参数		
训练函数	学习函数	性能函数	训练次数	训练目标	学习速率
trainrp	Learngdm	Mse	2000	0.001	0.1

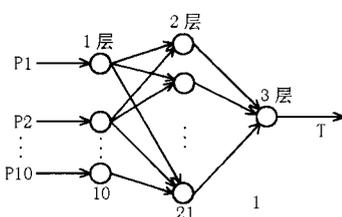


图3 用于牵引馈线自适应重合闸的BP神经网络

Fig.3 BP neural network of self-adaptive reclosure for traction feeder

本文选用三层BP神经网络模型。由于通过db4小波对故障电压信号进行5尺度分解后细节系数cd5为10个, 所以输入层神经元个数选择为10, 隐含层神经元个数为21, 输出层神经元个数为1, 输出层节点取输出为“1”时, 表示瞬时性故障, 允许重合; 输出为“0”时, 表示永久性故障, 则闭锁重合闸。网络结构如图3所示。网络参数、训练参数如表1所示。仿真训练结果表明, 隐含层神经元个数、网络参数、

训练参数的设置是合适的。

2 仿真与分析

2.1 系统仿真模型

本文以某牵引变电所为例, 其牵引供电采用单线直接供电单边供电的方式。该牵引变电所通过 110 kV 高压输电线路从地方电力系统获取三相工频交流电能, 变电所作为一级负荷, 有两路进线电源, 设置两台牵引主变压器固定全备用, 其 110 kV 侧电气主接线采用最常见的双 T 接线, 运行方式为一路电源与一台牵引主变压器运行, 而另一路电源及另一台牵引主变压器备用。作为阶段性工作, 本文未考虑设置在牵引变电所中的并联电容补偿装置, 假定它们处于退出状态。该牵引变电所供电系统示意图如图 4 所示。

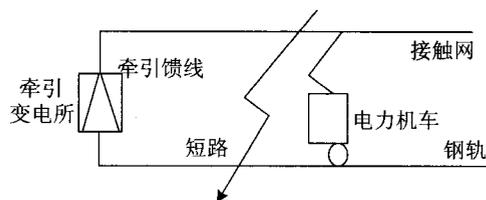


图 4 某牵引变电所供电系统示意图

Fig.4 Power supply system diagram of one traction substation

为简化计算, 只考虑供电臂上有一台电力机车运行, B 相牵引网发生接地故障的情况, 将 B 相作为故障相, 进行接地短路的仿真计算。通过 Matlab 软件中的 SimPowerSystems 所仿真的系统模型如图 5 所示。

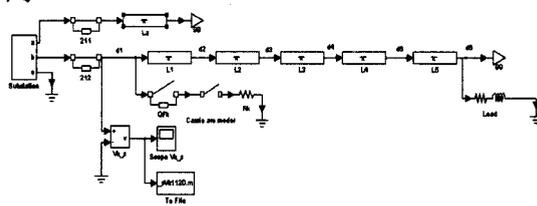


图 5 仿真系统模型

Fig.5 Model of simulation system

2.2 仿真过程与结果分析

为反映各种故障对判据结果造成影响的因素, 本文利用 Matlab 进行了大量的仿真计算, 考虑了以下故障时的情况:

- (1) 2 种故障类型: 瞬时性接地短路、永久性接地短路。
- (2) 6 个短路点位置: d1(首端)、d2(6.76 km)、d3(13.52 km)、d4(20.28 km)、d5(27.04 km)、d6(末端)。
- (3) 4 种过渡电阻: 1 Ω、10 Ω、20 Ω、30 Ω。

(4) 3 种机车负荷情况：无机车负荷、短路点位于变电所与机车之间、短路点位于变电所与机车之外。

特殊情况：首端短路时三种情况：无机车负荷、机车位于 d3、机车位于 d6；末端短路时三种情况：无机车负荷、机车位于 d1、机车位于 d3。

(5) 2 种电源初相位：A 相 0° 、A 相 80° 。

表3 人工神经网络部分训练样本

Tab.3 Some training samples of artificial neural network

故障编号	故障点位置	过渡电阻 / Ω	机车负荷	电源A相初相位 / ($^\circ$)	理想输出
s2111	d2	1	无	80	1
s3320	d3	20	d2	0	1
s4111	d4	1	无	80	1
s5210	d5	10	无	0	1
s6111	d6	1	无	80	1
y2111	d2	1	无	80	0
y3320	d3	20	d2	0	0
y4111	d4	1	无	80	0
y5210	d5	10	无	0	0
y6111	d6	1	无	80	0

表 4 部分网络测试样本及结果

Tab.4 Some samples and results of neural network testing

故障点距首端距离 /km	故障点过电渡电阻 / Ω	机车位置	电源 A 相初相位 / ($^\circ$)	故障类型	理想输出值	实际输出值
0	20	d3	0	永久	0	0.2894
6.76	1	无	80	瞬时	1	1.0275
13.52	10	无	0	永久	0	-0.0840
20.28	10	无	0	瞬时	1	0.9658
27.04	20	d3	0	瞬时	1	1.0056
33.8	20	d3	0	永久	0	0.0507

经过以上五种因素的排列组合，对不同因素下故障电压信号进行小波分解，提取小波系数作为神经网络的输入，形成了具有 288 个样本的训练及测试样本集。将此样本集的 7/8 (252 个) 输入 BP 神经网络，对网络进行训练，将样本集另外的 1/8 (36 个) 用于网络训练结束之后的测试。

图 6~8 列举了部分故障情况下的短路电压仿真波形，表 3 和表 4 列举了部分训练及检验样本和检验结果。测试结果误差曲线如图 9 所示。

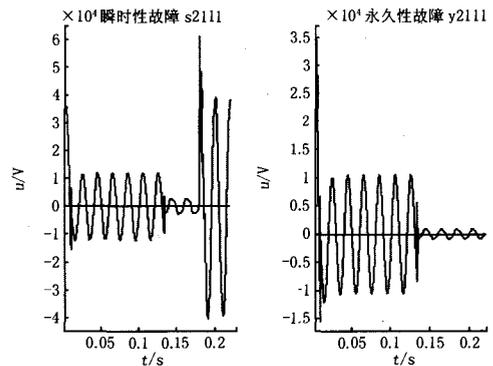


图 6 故障 s2111 与 y2111 的牵引网电压波形比较
Fig.6 Voltage waveform comparison of traction electric network between fault s2111 and fault y2111

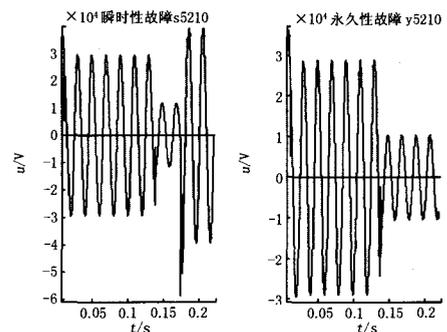


图 7 故障 s5210 与 y5210 的牵引网电压波形比较
Fig.7 Voltage waveform comparison of traction electric network between fault s5210 and fault y5210

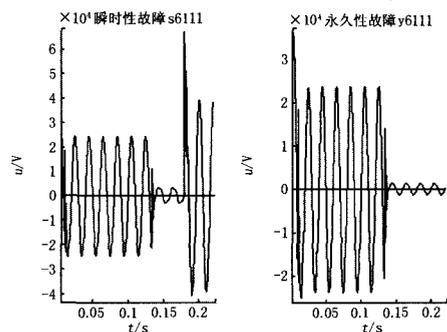


图 8 故障 s6111 与 y6111 的牵引网电压波形比较
Fig.8 Voltage waveform comparison of traction electric network between fault s6111 and fault y6111

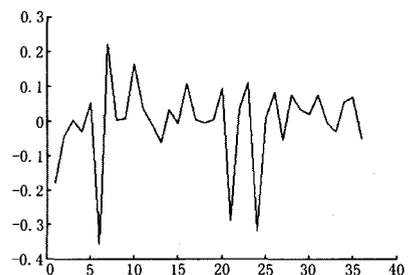


图 9 网络测试结果误差
Fig.9 Error of neural network testing's result

3 结论

本文指出了电压判据及其补偿判据的应用局限。将小波变换与人工神经网络相结合应用于解决自适应单相重合闸中识别瞬时性故障与永久性故障的问题上。利用小波变换提取故障信号的特征信息, 作为神经网络的特征输入量, 神经网络经过训练学习以后学会特定的映射关系, 对牵引网接地故障的性质进行识别。仿真测试结果验证了该方案是切实可行的, 能够准确地识别接地故障的性质。

参考文献

- [1] 刘家军. 牵引变电所自动化馈线测控保护装置的研制(硕士学位论文)[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
LIU Jia-jun. The Research of Traction Feeder Relay Protection in Traction Substation Automation with Measure and Control Set, Thesis[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [2] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996. 352-393.
GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location with Their Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996. 352-393.
- [3] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时和永久故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-31.
GE Yao-zhong. Method of Distinguishing Between Instant and Permanent Fault During Single — Phase Reclosing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(2): 23-31.
- [4] 葛耀中, 索南加乐, 孔繁鹏, 等. 微机式自适应单相重

合闸的判据和算法[J]. 继电器, 1995, 23(2): 7-9.

GE Yao-zhong, SUONAN Jia-le, KONG Fan-peng, et al. The Criterion and Algorithm of Single-phase Adaptive Reclosure Based on Micro-processor[J]. Relay, 1995, 23(2): 7-9.

- [5] GE Yao-zhong, SUI Fong-hai, XIAO Yuan. Prediction Method for Preventing Single-phase Reclosing on Permanent Fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [6] 葛耀中, 肖原. 超高压输电线自适应三相自动重合闸[J]. 电力自动化设备, 1995, 19(2): 10-18.
GE Yao-zhong, XIAO Yuan. Self-adaptive Three-phase Reclosure for EHV Transmission Line[J]. Electric Power Automation Equipment, 1995, 19(2): 10-18.
- [7] 王永康. 继电保护及自动装置[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000. 51-52.
WANG Yong-kang. Relay Protection and Automation Device[M]. Beijing: China Railway Press, 2000. 51-52.
- [8] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
CHENG Zheng-xing. The Algorithm and Application of Wavelet Analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.

收稿日期: 2007-01-15; 修回日期: 2007-03-06

作者简介:

李学武(1972-), 男, 讲师, 在读硕士, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: miyang99@163.com

吉鹏霄(1976-), 男, 讲师, 在读硕士, 主要研究方向为铁道牵引供电。

“继电保护应用技术”研讨会征文通知

继电保护是一门技术含量高、涉及范围广, 对制造、安装、运行和管理工作要求标准非常高的专业。为了推动我国继电保护技术的发展, 提高继电保护设备的研发、制造和运行水平, 加深本专业的广泛交流和深入探讨, 促进与世界先进水平接轨, 《继电器》杂志社与清华大学电机工程与应用电子技术系、华中科技大学电气与电子工程学院、华北电力大学电气与电子工程学院定于2007年四季度召开“继电保护应用技术”研讨会, 征文内容如下:

- (1) 继电保护新技术及其应用;
- (2) 电力系统安全稳定控制;
- (3) 保护及自动装置运行经验与事故分析;
- (4) 继电保护设备的电磁兼容;
- (5) 继电保护标准的制定与应用;
- (6) 继电保护制造技术与工艺;
- (7) 继电保护检测与试验技术。

详情请访问继电器杂志社网站 <http://www.dlwg.net/repress/>