

文章编号:1000-582X(2003)11-0070-04

基于人工神经网络的电网谐波监测的方法*

于静¹, 杨永明¹, 华宇²

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 河北科技大学信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050054)

摘要:研究人工神经网络用于波形识别是一个新的研究领域。将神经网络这一新方法引入到电网谐波在线监测中, 并就它在电网谐波在线监测应用中的一系列关键问题进行了较为系统的分析。提出了一种新型电网谐波在线监测系统模型, 通过带通滤波器, 采样存储器以及神经网络的在线监测电路, 取得谐波信号, 最终达到谐波补偿的目的。其在线监测部分主要利用模拟并行测量的基本原理, 构造了一个用于电网谐波在线监测的特殊多层前向神经网络。并对其进行了仿真, 仿真结果表明所提出的基于人工神经网络的电网谐波在线监测的方法是可行的和有效的。

关键词:人工神经网络; 电网谐波; 在线监测

中图分类号:TM935.24

文献标识码:A

随着国民经济的迅猛发展, 整个社会对电力的需求也越来越大。在电力系统向超高压、大电网、大容量、自动化方向发展的同时, 电弧炉、荧光灯和其他的晶闸管换流设备也被广泛应用, 这类负荷的共同特点是它们是非线性负荷, 也就是说这类负荷两端的电压和电流之间的关系是非线性的。非线性负荷两端的电压即使是正弦波, 流过它们的电流也是非正弦的, 也即产生了谐波电流。谐波能够产生很大的危害, 由于供电系统和输电线路具有一定的阻抗, 这个阻抗是随频率变化的, 各次谐波电流流过电网时会产生一定的电压降, 此电压降叠加在供电电压上, 引起电网电压波形畸变, 使电能质量下降, 影响发电供电和用电设备的安全经济的运行, 产生对通信系统的干扰。同时, 电网谐波对各种电气设备, 继电保护、自动装置、计算机测量和计量仪器均有不利影响。目前, 国际上公认谐波“污染”是电网的公害, 因此, 对电力谐波加以监测和限制具有重大意义^[1]。

1 谐波监测的主要方法及谐波补偿

对高次谐波进行测量主要监测内容是: 波形、频谱以及畸变率和相位, 至于频率的测量范围是从基波到大约至 40 次左右的谐波, 也就是说从 50 ~ 2 000 Hz。

国内外的高次谐波测量的主要方法有: 示波器, 用它可以直接地观察谐波源或者某联结点的电压和电流

的波形, 此法虽简单易行, 但精度较低; 波形分析仪, 是一个窄通带的调谐电压表, 可以分别测量各次谐波的量值。用这种方法测量的各次谐波幅值较为准确, 但不能同时测量各次谐波分量, 不能确定各谐波之间的相位关系, 而且分析速度也较慢, 不适合现场作实时的测量; 频谱分析仪, 也叫谐波分析仪, 它可以方便的在仪器频率范围内对所有谐波进行测量, 但只能指示出基波和谐波幅值关系, 而不能对各次谐波的相位进行测量, 因此只能用这种仪器来分析信号, 而不能将分析的结果用于还原显示, 测量速度也较慢; 还有傅立叶分析仪、磁带记录仪、以及改良的具有微型计算机的 FFT 频谱分析仪等。以上各种方法都有各自的优点, 但都很难实现实时在线监测^[2]。

高次谐波电压、电流会产生电网谐波异常现象, 电网产生故障应采取必要的对防止措施及其对谐波进行抑制(或补偿)。因此, 监测到谐波后, 接下来的工作就是对谐波进行抑制, 减小其向电网的流入, 即采用滤波器对谐波进行补偿。用无源功率滤波器或有源滤波器都可以达到滤波(补偿)的效果, 但是如果选择了不好补偿装置, 这些滤波器可能又会形成新的谐波源, 造成新的谐波, 所以要对接入电网的各无源或有源滤波器进行精确的选择和控制^[3-4]。

无源功率滤波器(Passive Power Filters 简称 PF), 通常是利用 LC 电路进行滤波, 主要是用电容器为高

* 收稿日期: 2003-07-10

作者简介: 于静(1977-), 女, 河北石家庄人, 重庆大学硕士, 现工作于河北科技大学, 主要研究方向: 神经网络在电网谐波在线监测中的应用。

次谐波提供低阻抗的分流器。最简单的是单调谐的 LC 滤波器,其电路原理图如图 1 所示:

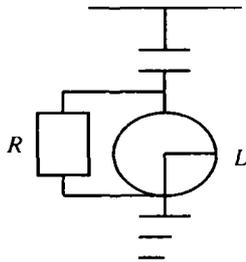


图 1 单调谐的 LC 滤波器电路

单调谐波 LC 滤波器主要用来抑制某一次低次谐波,在该低次谐波频率下串联谐振。因而形成低阻抗旁路,使该次谐波不再流入电网,达到抑制谐波对电网干扰的目的。要滤除若干个低次谐波,就要用若干个单调谐 LC 滤波器(如图 2 所示)并联接到电网。

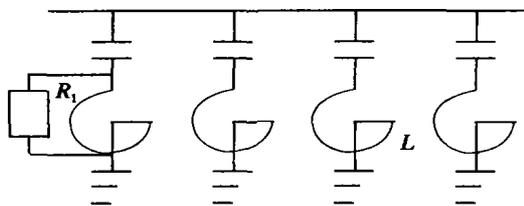


图 2 多个滤波器组合装置

在电抗器(电感)旁并联电阻 R_1 ,以降低品质因数 Q 值。其 $Z-f$ 特性底部比较平缓,在一段频带宽度(称通带)范围内复阻抗 Z 很小,可以将 LC 单调谐器所未能吸收的而又需控制的高次谐波都包含在通带之内,因此可以取得滤除的效果。

当电网电流通过神经网络在线监测电路时,可以监测出超出谐波允许范围的 3, 5, 7 次谐波,然后通过控制装置,将某个单调谐 LC 滤波器接入电网,来滤去该次谐波;或者是在电网中某两个谐波或三个谐波同时存在,可以通过控制装置将它们的并联装置接入电网,就可以把若干个电网中存在的超过允许范围的谐波同时滤去,而不必要将没有用处的某个单调谐 LC 滤波器接入电网,形成新的谐波源,产生新的谐波。从而可以很好的滤波,提高输电质量。

2 新型谐波在线监测系统的模型和构想

笔者利用人工神经网络的模型和学习算法,然后围绕本文的研究目的进行了深入的探讨。通过构造一个特殊的多层前向神经网络,利用模拟并行测量装置的基本原理,建立相应的谐波在线监测电路,以真正实现在线监测。首先通过带通滤波器滤除基波和更高次谐波,然后进行在线采样 20 个模拟量,通过一个模数(A/D)转换器,转换成数字信号,再通过神经网络检

测电路监测是否有电网谐波存在,当监测到电力网系统中有谐波存在时,用开关打开谐波记录仪进行记录(如图 3)。

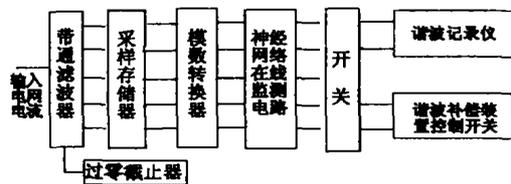


图 3 电网谐波在线监测的总体设计模式

记录的谐波数据可以对电力系统进行监督,从而督促电力系统减小各种谐波,进而提高电力系统的可靠性和稳定性,减少电力系统对其它用电部门的影响,保证供电质量。在记录谐波信号的同时,我们可以用在线监测到的超过电网允许值的谐波信号,来控制谐波补偿装置,从而达到抑制谐波,减小谐波的作用。这样,对电网谐波进行在线监测,保证和提高了电力系统的可靠性。

3 基于神经网络在线监测电路的理论基础

笔者主要是对神经网络在线监测电路进行设计,并利用模拟并行测量的基本原理,构造了一个用于电网谐波在线监测的特殊多层前向神经网络。笔者给出了该神经网络的结构、训练方法及其训练步骤,并研究了该网络的训练样本的形成方法,最后给出了仿真研究的结果。仿真结果表明文中所提出的基于神经网络对电网谐波在线监测的方法是可行的、正确的和有效的。

笔者首先构造 MLFNN 谐波测量电路时,使每一个输出神经元都对应自己的隐层(根据需要也可以是多个隐层,这里研究单个隐层结构),相当于有多个结构类似的 MLFNN 网络。有多少个待测谐波就相应有多少个 MLFNN 网络。因为根据大量的资料以及 Hunt 和 Chen 等人的研究结果表明^[4-5],在隐层神经元足够多时,一般可以实现所需的非线性映射。为了使设计的谐波监测电路既能够准确的监测谐波,又具有结构简单、运算量小的特点,笔者所设计的 MLFNN 网络选的是一个隐层。

4 神经网络在线监测电路的设计程序及步骤

对于神经网络中输入的谐波样本,对谐波的采样频率有一定的要求。笔者对 3, 5, 7 次谐波进行采样,取基波频率为 50 Hz,一个周期采样 20 个点。在确定采样频率时只要考虑到能使 7 次谐波采样后不失真,取采样频率 $f_c > 2f_{o7}$ 就可以满足要求。因为 $f_{o7} = 7 \times 50 = 350$ Hz,若一个周期采样 20 个点,那么采样间隔为 $t =$

$T/20 = 0.02/20 = 0.001$ s, 则采样频率为 $f_c = 1/t = 1000$ Hz, 可以保证 $f_c > 2f_{\sigma}$, 所以我们选择截止频率为 1 kHz 的带通滤波器来对待测值进行预处理。

对于图 2 所示的 MLFNN 的训练采用 BP 算法, 笔者仅列出对应于 3 次谐波的算法公式, 而对应于 5 次谐波、7 次谐波的算法公式与此完全相同。假设被测量信号为一周期性的非正弦电流 i_t 如式(1) 给出的形式, 其中基波幅度可设为 A_1 , 它的 3, 5, 7 次谐波幅值可以设为 A_3, A_5, A_7 , 则待测电流可表示为式(2), 通过带通滤波器滤去更高次谐波和基波, 并通过过零截止器, 使各次谐波的相位角 $\psi_i = 0^\circ (i = 3, 5, 7)$ 如式(3) 所示, 输入的样本是其中的 n (文中取 20) 个采样值。

$$i_t(t) = I_1 \sin(\omega t) + I_3 \sin(3\omega t + \psi_3) + I_5 \sin(5\omega t + \psi_5) + I_7 \sin(7\omega t + \psi_7) + \dots \quad (1)$$

$$i_t(t) = A_1 \sin(\omega t) + A_3 \sin(3\omega t + \psi_3) + A_5 \sin(5\omega t + \psi_5) + A_7 \sin(7\omega t + \psi_7) + \dots \quad (2)$$

$$i_t(t) = A_3 \sin(3\omega t) + A_5 \sin(5\omega t) + A_7 \sin(7\omega t) + \dots \quad (3)$$

通过输出值来判断是否包含谐波, 以及包含几次谐波。输出为 0 就说明待测量中不包含某次谐波, 输出为 1 则表明待测量中含有该次谐波。按照这个原理组成的 MLFNN 谐波监测电路示于图 4, 如果 MLFNN 的结构适当, 算法选择可行, 并且用合理的样本进行充分训练。当 MLFNN 训练好后, 在其输入端加上待测信号 $x_{1i} (i = 1, 2, \dots, 20)$, 那么在输出端就会实时得到待测信号中所含的各次谐波。3 次谐波神经网络其训练步骤如下所示:

$$x_{2h} = f_2\left(\sum w_{2h} x_{1i} + \theta_{2h}\right) \quad h = 1, 2, \dots, n_2 \quad (4)$$

$$x_{3j} = f_3(s_{3j}) = f_3\left(\sum w_{3hj} x_{2h} + \theta_{3j}\right) \quad j = 1 \quad (5)$$

其中 w_{2h} 是输入层和隐层之间的权值; w_{3hj} 是隐层和输出层之间的权值; θ_{2h} 和 θ_{3j} 表示神经元阈值。下标 i, h 和 j 分别代表某一输入节点、隐层节点和输出节点的序号。 $f_2(\cdot)$ 、 $f_3(\cdot)$ 分别是隐层和输出层的神经元激活函数。在本文中, 它们选为 S 型函数, 即为 $f(x) = 1/[1 + \exp(x)]$ 。修正权值和阈值的公式为:

$$\delta_{31} = f'_3(s_{31})(T_3 - x_{3j}) \quad (6)$$

$$w_{3h1}(k+1) = w_{3h1}(k) + \eta \delta_{31} x_{2h} \quad h = 1, 2, \dots, n_2 \quad (7)$$

$$\theta_{31}(k+1) = \theta_{31}(k) + \eta \delta_{31} \quad (8)$$

$$\delta_{2h} = f'_2(s_{2h}) w_{3h1} \delta_{31} \quad (9)$$

$$w_{2h}(k+1) = w_{2h}(k) + \eta \delta_{2h} x_{1i} \quad i = 1, 2, \dots, 20; h = 1, 2, \dots, n_2 \quad (10)$$

$$\theta_{2h}(k+1) = \theta_{2h}(k) + \eta \delta_{2h} \quad h = 1, 2, \dots, n_2 \quad (11)$$

求平均误差公式为

$$ER_0 = \frac{1}{2} (T_3 - x_{3j})^2 \quad j = 1 \quad (12)$$

用上述训练算法训练网络, 输入样本点修改阈值和权值, 训练步骤如下:

- 1) 给阈值和权值分别赋予小的随机初值;
- 2) 逐一把训练样本的输入值加入到在 MLFNN 的输入层, 利用式(4) - 式(5) 计算输出, 并与目标值比较;
- 3) 根据式(6) - 式(11) 修改权值和阈值;
- 4) 对于其他的训练样本对可以返回步骤 2) 重复执行上述各步, 直到学习完所有的训练样本;
- 5) 判断平均误差是否满足要求。如果大于事先设定的误差, 则返回步骤 2) 继续运行, 否则存储权值以备后用。

对于笔者所提出用于谐波在线监测 ANN 的训练方法, 虽然只分析了对非正弦波形中 3, 5, 7 次谐波测量的 MLFNN 训练方法, 但该方法对其它的谐波也同样适用。

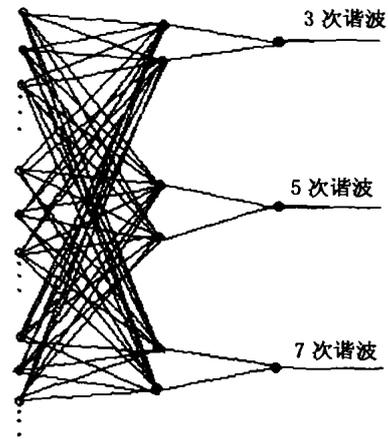


图 4 改进 MLFNN 谐波监测电路

5 仿真训练及其结果

观察训练好的 MLFNN 的推理能力, 即检查它对未训练过的畸变波形的测量精度。也就是说超过最大允许值的谐波电流或电压, 才会对电网的稳定和输电质量, 以及用户用电的安全产生影响^[6]。因此, 在仿真时就应该从大于谐波电流幅值的 1% 以上开始仿真, 检验其对谐波的监测效果。

因此, 3, 5, 7 次谐波的幅度 A_3, A_5, A_7 分别可以取值 (0.01, 0.01, 0.01), (0.01, 0.01, 0.02), ..., (0.50, 0.50, 0.50)。用训练好的 MLFNN 测量式(1) 中当 $\psi_i = 0^\circ (i = 3, 5, 7)$ 时所对应的电流 i_t 的谐波含量, 是否含有各次谐波, 部分仿真结果如表 1 所示。其中 i_3, i_5, i_7 表示电流的输出值。当输出值小于 0.05 时, 可以认为输入信号中不含该次谐波; 当输出值大于 0.95 时, 可以认为输入信号中含有该次谐波。

表 1 神经网络仿真结果

A_3	A_5	A_7	i_3	i_5	i_7
0	0	0.01	0.005 8	0.005 7	0.040 8
0	0	0.02	0.005 8	0.005 7	0.264 2
0	0	0.03	0.005 8	0.005 7	0.755 6
0	0	0.04	0.005 8	0.005 7	0.961 6
0	0	0.05	0.005 8	0.005 7	0.994 4
0	0.01	0	0.005 8	0.038 5	0.005 5
0	0.01	0.01	0.005 8	0.038 5	0.040 8
0	0.01	0.02	0.005 8	0.038 5	0.264 0
0.50	0.42	0.01	1.000 0	1.000 0	0.038 2
0.50	0.42	0.02	1.000 0	1.000 0	0.244 6
0.50	0.42	0.07	1.000 0	1.000 0	0.999 8
0.50	0.42	0.08	1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.50	0.42	0.09	1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.50	0.50	0.49	1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.50	0.50	0.50	1.000 0	1.000 0	1.000 0

由表 1 不难看出,谐波幅值越小,监测结果越不准确,幅值越大,结果越准确,当幅值变化超过 0.08 时,准确度为 100%。对全体样本全部仿真后,总体监测结果显示对 3,5,7 次谐波监测,其准确度可分别达到 97.8%,98.6%,98.9%,可见笔者所设计的 MLFNN 神经网络有较好的逻辑推理能力。

理论上讲,MLFNN 的推理能力与其权数目(网络大小)、隐含问题的复杂程度及训练样本数有关。当训练样本数不变时,一个 MLFNN 有多少权才能获得好的推理能力,缺少严格的理论依据,一般都依赖于经验,影响的因素也太多,因此不易分析出来。当容易获得更多的训练样本时,则应该通过增加训练样本来提

高 MLFNN 的推理能力。遵循这一思想,可以在 MLFNN 的结构大小不变的情况下,让训练样本尽可能的多,使 MLFNN 对隐含问题的表示更好,找到更为准确的映射函数,以提高 MLFNN 的推理能力。

6 结 论

提出了一种新型的电网谐波在线监测方法,重点研究的是神经网络对电网谐波的监测部分。虽然只分析了对非正弦波形中的 3 次、5 次、7 次谐波监测的 MLFNN 训练和训练时的样本组成,但该方法对监测其它的谐波也同样适用。运用论文的训练方法和训练步骤,对图 4 进行训练后,仿真证明该电路能实现实时监测谐波。今后可以把该电网谐波在线监测模式应用于电力系统中,以实现真正意义的电网谐波实时在线监测。

参考文献:

- [1] 林海雪. 电力网中的谐波[M]. 北京: 电力出版社, 1998.
- [2] 陆廷信. 供电系统中的谐波分析测量与抑制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [3] 钱照明. 电磁兼容设计基础及干扰抑制技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [4] SUZUKI Y. Self-Organizing QRS-Wave Recognition in ECG Using Neural Networks[J]. IEEE Trans on NN, 1995, 6: 1469-1477.
- [5] 闻新. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [6] 陈化钢. 电力设备异常运行及事故处理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

Study of Harmonics Monitoring Based on Artificial Neural Network

YU Jing¹, YANG Yong-ming¹, HU Yu²

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Information Science & Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050054, China)

Abstract: Wave recognition by artificial neural network is a new research field. In order to monitor operating status of the power system's harmonics with new method, the neural network (NN) approach is introduced. A new model about measuring harmonics on line is proposed. Through band pass filter, sampling store and the circuit of monitoring on line with artificial neural network (ANN), we can obtain the harmonics signal. The result is to compensate harmonics. Through using the basic principle of analog parallel harmonics measurement and a special multi-layer feedforward neural network, a corresponding harmonics measurement on line is built. And the procedure for simulating the measurement network is given. The simulation results prove the effectiveness and exactness of the presented approach.

Key words: artificial neural network; harmonics measurement; measurement on line

(编辑 李胜春)