

[文章编号] 1003—4684(2019)05-0042-04

# 一种新型谐波电流检测策略

涂玲英<sup>1</sup>, 陈 健<sup>1</sup>, 夏耀威<sup>1</sup>, 张 灿<sup>1</sup>, 张宸偲<sup>2</sup>

(1 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068; 2 国网钟祥市供电公司, 湖北 钟祥 431900)

[摘 要] 针对传统 ip-iq 算法结构复杂、延时长、抗干扰能力差的问题,利用人工神经网络具有强大的自适应性以及对任意非线性逼近能力的特点,提出一种基于 BP 神经网络的谐波电流检测方法,在神经网络的输入端增加一附加量,将检测到的三相负载电流和虚拟磁链空间位置角作为神经网络系统输入,以改善神经网络的检测性能,提高检测的准确性。最后根据这种检测方法建立仿真模型,仿真结果验证了其优越性。

[关键词] 谐波检测; 神经网络; 虚拟磁链

[中图分类号] O413

[文献标识码] A

电力电子技术的蓬勃发展间接导致了日益严重的谐波污染问题,严重威胁到电力系统的安全性和稳定性<sup>[1]</sup>。随着人工智能技术的高速发展,人工神经网络技术也被不断完善补充,应用面涉及各个领域。谐波检测作为衡量电能质量的一项重要环节,也处于人工神经网络的应用范围之内,慢慢从理论走向实际应用。以 ip-iq 算法为例,神经网络谐波检测算法相较于传统算法,省去了锁相环、滤波等环节,抗干扰能力强,从而大大降低了系统的复杂性。不需要繁琐的计算,从而降低了系统延迟,提高了系统的检测性能。文献[1]提出的(6-41-3)结构的神经网络中,将 BP 神经网络与锁相环结合起来,以三相负载电流和一个周期内的最大电流作为系统输入,得到单位幅值电流。然而其放大结构过于复杂,并且由于加入了锁相环,系统的抗干扰性降低。文献[2]提出的(4-9-3)结构神经网络则精简了许多。其将三相负载电流作为系统输入,并引入 A 相电压作为输入的附加量。但因没有考虑到电压畸变问题,当系统电压失真时,A 相电压的引入也有可能导导致系统检测精度下降。针对文献[2]的问题,文献[3]提出一种(4-10-3)结构的神经网络,使用程序产生的模拟 A 相电压旋转角来替代 A 相电压作为系统输入,提高了系统的抗干扰性能。只是由于通过软件编程,操作上会有些繁琐。本文提出一种三层结构的神经网络,在附加量上选择了虚拟磁链定向

角,可以准确标记电流,提高系统检测的准确性。

## 1 谐波补偿原理

有源电力滤波器作为一种当今普遍使用的滤波装置,可控性强,便于操作,适用面较为广泛<sup>[2]</sup>。有源电力滤波器种类较多,以并联型为例,在谐波检测环节,利用谐波检测算法,检测出与期望补偿电流大小相等方向相反的谐波电流,检测出的电流与实际电流做差得到误差信号,到此完成检测环节。在电流跟踪控制环节,通过电流跟踪控制算法以及驱动调制电路将跟踪控制律转化为高频脉冲信号,来使 IGBT 逆变器产生相应的补偿电流。因此谐波检测环节与电流跟踪控制环节是检测并联有源电力滤波器性能两个重要指标<sup>[3]</sup>。

## 2 BP 神经网络

### 2.1 BP 网络结构

BP 神经网络属于一种结构较为完善,适用面较广的一种人工神经网络。由于其反馈机制,可以完全逼近任意复杂的非线性关系,在学习和自适应未知系统的同时,整理定量、定性知识与相关信息。并且凭借强大的鲁棒性、容错性,使用并行分布的处理方法可以快速执行大量操作<sup>[4-5]</sup>。BP 神经网络具有三层结构:输入层、输出层和位于两者之间的隐含层<sup>[6]</sup>。网络的基本构造如图 1 所示,其中的隐含层

[收稿日期] 2019-07-08

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601399)

[第一作者] 涂玲英(1963—),女,湖北武汉人,湖北工业大学教授,研究方向为电子信息及嵌入式技术

[通信作者] 陈 健(1995—),男,湖北黄冈人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为电气工程

用来处理各种非线性关系,从而实现输入到输出的转换,保证了神经网络在处理各类问题时的多样性。

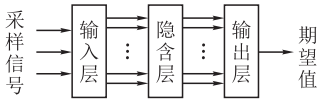


图 1 BP 神经网络结构图

BP 神经网络的工作流程为:当外界的刺激信号通过输入端传递到神经网络中时,刺激信号通过输入层进入隐含层,之后再通过隐含层处理后进入输出层,最后通过期望信号和输出信号计算出误差。根据不同情况会规定一个固定的误差阈值<sup>[7]</sup>。如果计算出的误差小于或等于阈值,那么计算到此结束,得到的输出为最终结果。如果误差大于系统规定阈值,则需要返回调整各层权向量,然后继续计算输出,直到误差达到规定阈值为止<sup>[8-9]</sup>。

2.2 BP 网络学习算法

在  $m$  层的 BP 网络结构中,设定输入层有  $N_1$  层,其中  $N_1$  小于  $m$ 。神经网络输入为  $X$ ,神经网络的期望输出为  $R$ ,神经网络的实际输出为  $S$ ,第  $i$  层有  $N_i$  个神经元, $\theta_j^i$  表示第  $i$  层到第  $j$  个神经元阈值; $I_j^i$  表示第  $i$  层第  $j$  个神经元总输入;最后取  $f$  作为激活函数<sup>[10]</sup>。各个变量的关系如下:

$$I_j^i = \sum_{k=1}^{N_{i-1}} n_{jk}^{i-1} S_k^{i-1}$$

激活函数

$$S_k^{i-1} = f(I_j^i) = \frac{1}{1 + \exp[-(u_j^i - \theta_j^i)]}$$

神经元  $j$  在权值修正过程中来积累周围的刺激,如下式:

$$X_j = \sum_i y_i n_{ij}$$

神经元通过激活函数将刺激传递到下一级,进而得到最终结果。若用  $d_j$  代表得出的最终结果, $E$  为误差,则得出的权重误差

$$\frac{\partial E_j}{\partial n_{ij}} = y_i (1 - y_i) (y_i - d_j) y_i$$

反向传递,每一层的修正量

$$\frac{\partial E_j}{\partial y_j} = \frac{\partial E_j}{\partial y_i} \times \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \times \frac{\partial x_j}{\partial y_j} = (y_j - d_j) y_i (1 - y_j) n_{ij}$$

最终修正量  $\Delta N = -I \frac{\partial E}{\partial n}$ ,其中  $I$  为学习率,在  $(0,1)$  之间。

3 基于 BP 神经网络的谐波检测

由于有源滤波器的机制是整体补偿各次谐波,所以只要检测出负载电流中的基波分量,就能通过从负载电流里减去基波分量来得到谐波电流分量<sup>[11]</sup>。当 BP 神经网络在检测谐波时,大多选择三相负载电流作为输入端输入,但使用本文方法来检

测谐波所需要的期望输出为三相基波电流。由于基波电流与负载电流之间的函数关系较为复杂,若神经网络引入的输入端只有三相负载电流,会导致得出的实际结果跟期望值误差过大,无法进行准确的检测。针对该问题,本文在网络输入端引入附加量,该附加量负责对电流进行标记<sup>[12]</sup>。考虑到输入的三相负载电流是周期变化的,因此附加量也应具有周期性。为了进一步简化操作步骤,实验中放弃锁相环节,采用虚拟磁链定向技术,得到电网虚拟磁链矢量空间位置角  $\theta$ ,将  $\theta$  作为引入的附加量。

以三相负载电流以及电网虚拟磁链矢量  $\varphi$  的空间位置角  $\theta$  作为 BP 神经网络的输入(图 2),通过  $\varphi$  与电压矢量  $e$  关系:  $\varphi = \int e dt$ ,得出  $\alpha\beta$  坐标系中磁链为:

$$\begin{cases} \varphi_\alpha = \int e_\alpha dt \\ \varphi_\beta = \int e_\beta dt \end{cases}$$

式中  $e_\alpha, e_\beta$  为三相电网电压矢量在  $\alpha, \beta$  轴上的分量,  $\varphi_\alpha, \varphi_\beta$  分别为虚拟磁链矢量的  $\alpha, \beta$  轴的分量<sup>[13]</sup>。则可得:

$$\begin{cases} \sin \theta = \varphi_\beta / \sqrt{\varphi_\alpha^2 + \varphi_\beta^2} \\ \cos \theta = \varphi_\alpha / \sqrt{\varphi_\alpha^2 + \varphi_\beta^2} \end{cases}$$

则空间位置角

$$\theta = \arctan \frac{\varphi_\beta}{\varphi_\alpha}$$

图 2 网络采用三层网络结构,第一层为输入层,输入层的个数取决于待检测信号的节点数<sup>[14]</sup>,因此共有 4 个神经元,其中  $i_{La}(t), i_{Lb}(t), i_{Lc}(t)$  分别对应于三相电网电流的当前采样值,  $\theta$  为虚拟磁链定向角,第二层为隐含层,隐含层节点数取决于隐含层传输函数的卷积计算结果;最后为输出层,即为输出结果,三个神经元分别对应三相基波电流。

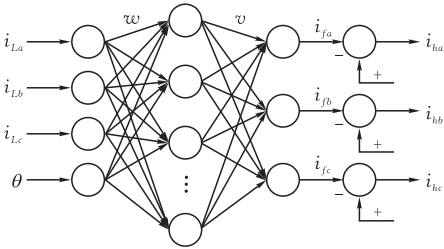


图 2 BP 网络结构示意图

4 基于 BP 神经网络的谐波检测仿真实例分析

为验证该方法的有效性,本文建立了 matlab 仿真模型(图 3)。

仿真实验条件:三相电源带整流负载,负载电阻

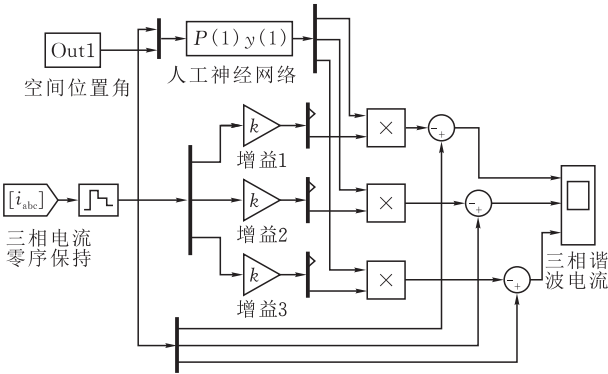


图3 本文谐波检测方法的 MATLAB 模型

$R=15\ \Omega$ ,负载电感 $L=0.020\ \text{H}$ 。当系统稳定运行4个基波周期后,将采集到的1个基波周期的三相负载电流和虚拟磁链空间位置角 $\theta$ 作为BP神经网络输入,网络输出为经过FFT理论计算出的基波电流幅值,训练数据设为5000组。

利用Matlab提供的BP神经网络函数建立4-10-3三层BP神经网络(图2)。训练函数采用L-M算法,用于输入端的A相负载电流波形如图4所示。

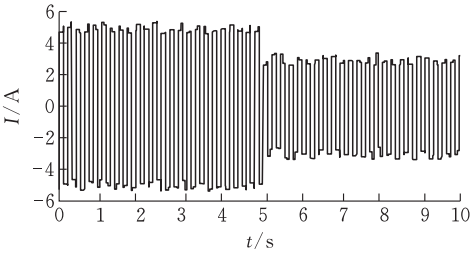


图4 A相负载电流波形

图5波形是通过训练过的神经网络系统检测出的三相基波电流。图6为使用ip-iq算法检测出的三相基波电流,从波形图中可以看出使用磁链定向角作为输入后,基波电流波形十分稳定,便于得出结论,与实际的误差较小。使用ip-iq算法检测出的波形,波形不够稳定还有一定的延迟,与实际误差较大,很难得出准确的结论,不利于研究。根据两个检测结果,本文方法在准确性上的优势较大。

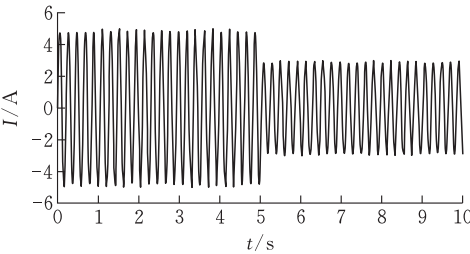


图5 本文检测出的基波电流

最终使用本文谐波检测方法所得到的谐波电流波形如图7所示。

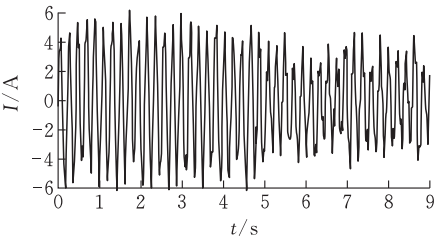


图6 ip-iq检测出的基波电流

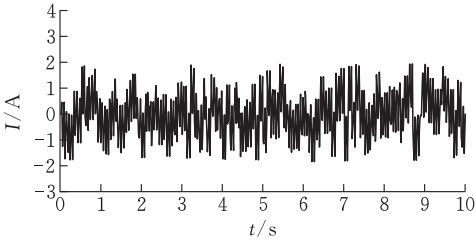


图7 本文检测出的谐波电流波形

5 结论

针对传统ip-iq算法结构复杂、延时长、抗干扰能力差的问题,通过构建BP神经网络模型来检测谐波,在神经网络的输入端除了用三相负载电流作为输入,还引入了一项附加量来保证系统的稳定性和检测的稳定性,利用虚拟磁链空间位置角代替之前的锁相环节,使检测环节更加精简,最后的仿真结果也证实了该方法在检测的准确性上超过了传统的ip-iq算法。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 马立新,肖川,林家隽,等.神经网络与锁相环相结合的谐波检测方法[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(3):24-29.

[2] 岳明道,郭焕银,李文艺.一种基于神经网络的电力谐波检测方法[J].仪表技术,2010(12):1-4.

[3] 单冬红,蔡琪,鲁书喜.基于BP神经网络的谐波电流检测方法研究[J].电子设计工程,2016,24(10):42-44.

[4] 崔小白.基于BP神经网络的新型电力谐波检测方法[J].电工电气,2016(11):11-15.

[5] 张培远,吴璇,吴应华,等.新型虚拟磁链定向的Hopfield神经网络谐波电流检测[J].电测与仪表,2017,54(11):76-83.

[6] 张越,王金梅,朱鹏,等.基于虚拟磁链的三相光伏并网逆变器控制策略研究[J].电测与仪表,2015,52(9):41-45,107.

[7] Wang S, Lv Y, Qiang G, et al. Dynamic compensation strategy for the unbalanced three-phase reactive power system based on TSC device[C]// Power Electronics & Motion Control Conference, 2012.

[8] Sedraoui K, Fnaiech F, Al-Haddad K. Application

of the Instantaneous Power With the symmetrical components theory to Control Unbalanced and Non-Sinusoidal Three Phase Power System[C]// Power Engineering Society General Meeting. IEEE, 2007.

[9] 王胡. 混合有源电力滤波器拓扑结构及电流跟踪控制研究[D].武汉:湖北工业大学,2018.

[10] 杨磊. 基于神经网络的电力系统谐波检测[D].成都:西南交通大学,2015.

[11] 商红桃.三相不平衡电网谐波电流检测方法的研究[J].自动化技术与应用,2013,32(12):74-77.

[12] 王凯亮,曾江,王克英.一种基于 BP 神经网络的谐波检测方案[J].电力系统保护与控制,2013,41(17):44-48.

[13] 王好娜,毕志周,付志红,等.基于 BP 神经网络和线性神经网络的间谐波分析方法[J].高压电器,2013,49(2):19-24.

[14] 边海龙,陈光,杜天军.基于小波神经网络的时变谐波信号检测[J].中国电机工程学报,2008(7):104-109.

## A New Harmonic Current Detection Method

TU Lingying<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, XIA Yaowei<sup>1</sup>, ZHANG Chan<sup>1</sup>, ZHANG Chencai<sup>2</sup>

(1 School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;  
2 State Grid Zhongxiang Power Supply Company, Zhongxiang 431900, China)

**Abstract:** Harmonic detection is an important index to evaluate the harmonic control performance of active power filter. Considering the problems of complex structure, time delay, and poor anti-interference in traditional ip-iq algorithm, and making use of the strong adaptability and the ability to approximate arbitrary nonlinear characteristics of artificial neural network, a harmonic current detection method based on BP neural network is proposed. An additional amount is added to the neural network input, and the detected three-phase load current and virtual flux linkage space position angle are taken as input neural network system, in order to improve the detection performance of the neural network and the accuracy of detection. Finally, a simulation model is established based on this method, whose results prove its superiority.

**Keywords:** harmonic detection; neural network; virtual flux linkage

[责任编辑:张岩芳]

(上接第 27 页)

## Design and Application of Flexible Automatic Bolt Tightening Machine

ZHOU Fei<sup>1</sup>, WANGg Tao<sup>2</sup>, YAO Wang<sup>2</sup>, HU Xiaofeng<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068,China;  
2 Hubei Electrical and Mechanical College Equipment Manufacturing Co., Ltd., Wuhan 430000,China)

**Abstract:** The multi variety and smallbatch production of auto parts pose higher requirements for the tightening quality of bolts. A new set of bolt tightening system is thus developed. This equipment is mainly composed of cross positioning system and tightening system, which is used to tighten single bolt of fan engine support M10 and driver assembly 8 M10 bolt. Fast changing fixture is adopted to realize quick replacement of fixture of different products. Tightening position and tightening sequence of bolts are controlled by programmable control system. A quick changing connecting rod is provided between the tightening shaft and the sleeve, which can be utilized to switch the size of the sleeve and calibrate the sensor. The operation of the equipment not only solves the problem of multi variety and small batch mixed production in enterprises, but also improves the assembly quality of bolts, which has guiding significance for enterprises to realize flexible production.

**Keywords:** tightening the bolts; multi variety; variable batch; flexible production

[责任编辑:张 众]