

一种神经元自适应谐波电流检测方法的数字仿真

李自成, 孙玉坤

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 基于单个神经元的有源电力滤波器单相电路自适应谐波电流检测方法的性能与一个周期内的采样个数、输入量个数、学习率和惯性系数有关。数字仿真发现: 一个周期内的采样个数和学习率对该方法的检测精度和动态响应时间影响较大, 它们既不能太大也不能太小, 应选择适中; 输入量的个数对该方法的检测精度影响较大, 而对该方法的动态响应时间影响不大, 它越小越好, 建议取1; 惯性系数对该方法的性能影响很小, 建议取0。

关键词: 有源电力滤波器; 非线性负载电流; 基波有功电流; 基波无功电流; 谐波电流; 傅立叶级数; 神经元; 自适应能力

Digital simulation of an adaptive harmonic current detection method based on a neuron

LI Zi-cheng, SUN Yu-kun

(College of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The performance of the adaptive harmonic current detection method based on a neuron for single-phase's active power filter is relative to the sample number in a cycle, the number of input, learning rate and inertial coefficient. Digital simulation finds that both the sample number in a cycle and learning rate have biggish influence to its detection precision and dynamic responding time, they should be neither too big nor too small, and they should be mezzo. the number of input has biggish influence to its detection precision, but it has not great influence to its dynamic responding time, the smaller it is, the better it is, and recommend that it is equal to 1, inertial coefficient has very small influence to its performance, and recommend that it is equal to 0.

Key words: active power filter; non-linear load current; fundamental active current; fundamental reactive current; harmonic current; Fourier series; neuron; adaptive ability

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)05-0001-05

0 引言

随着各种半导体变流装置在电力系统中的应用, 谐波干扰和无功增加的问题日益严重, 电力谐波治理已经成为一个广泛关注的课题。电力滤波分为无源和有源两种, 它们的工作原理完全不同。有源电力滤波器具有能够实现动态连续实时补偿、不受电网元件影响等特点; 在抑制谐波, 提高电能质量方面显示了强大的生命力。其性能的好坏与它所采用的谐波电流检测方法有很大的关系。因此, 如何实时准确地检测出非线性负载电流中的谐波及无功电流是有源电力滤波器的关键技术。

1984年, 日本学者 H Akagi 等提出了著名的三相电路瞬时无功功率理论^[1], 此后, 这一理论被不断完善^[2, 3]。现在, 基于三相电路瞬时无功功率理

论的三相电路谐波电流检测方法是得到公认的较为成熟的方法, 但也存在一些问题。而对于单相电路, 至今还没有一种公认的较为成熟的方法。因此, 有源电力滤波器谐波电流检测方法(特别是单相电路谐波电流检测方法)的研究一直是国内外众多学者关注的一个热点。其中, 基于自适应噪声对消法原理的一类有源电力滤波器自适应谐波电流检测方法的研究^[4-15]特别引人注目。研究人员强调基于自适应噪声对消法原理的检测方法具有自适应能力; 又由于人工神经网络(ANN)具有自学习和自适应能力, 因而其中的许多方法采用 ANN 来实现。

文献[5]根据自适应噪声对消法原理, 提出了一种基于单个神经元的有源电力滤波器单相电路自适应谐波电流检测方法, 它是众多基于神经网络的自适应谐波电流检测方法中的一种具有代表性的典型方法。文献[9]和[10]研究了该方法的模拟电路实现; 文献[11]和[12]将该方法应用于有源电力滤波器三相电路谐波电流检测。本文对该方法进行了详尽的

基金项目: 江苏省高校研究生科技创新计划项目(1221140004)和江苏大学高级人才专项基金资助项目(1283000064)

数字仿真。

1 一种神经元自适应谐波电流检测方法

1.1 自适应噪声对消法原理

自适应噪声对消法^[16]是 Widrow 提出的一种信号检测方法,其原理如图 1 所示。有效信号和噪声的总和 $s+n_0$ 为原始输入,噪声信号 n_1 为参考输入,其中, s 和 n_0 是不相关的, s 和 n_1 也是不相关的,而 n_1 和 n_0 是相关的。系统输出 y 同时作为误差信号 e 来自动调节自适应滤波器的参数,使 n_1 经过自适应滤波器得到 n_0 的近似值 n_0^* 。因此,在系统输出中, n_0 被消除了。

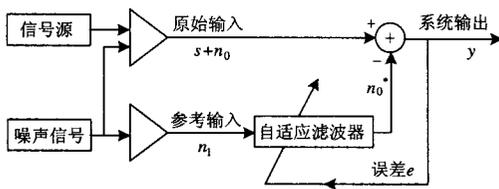


图 1 自适应干扰对消法原理

Fig.1 Principle of adaptive interference canceling

根据傅立叶级数,非线性负载电流 $i_L(t)$ 可表示为:

$$i_L(t) = a \sin(\omega t) + [b \cos(\omega t) + a_2 \sin(2\omega t) + b_2 \cos(2\omega t) + a_3 \sin(3\omega t) + \dots] = i_{ip}(t) + i_c(t) \quad (1)$$

其中: $i_{ip}(t)$ 为基波电流的有功分量; $i_c(t)$ 为需要补偿的谐波与无功电流之和,称为补偿电流或者畸变电流。

$i_{ip}(t)$ 是与电源电压 $u_s(t)$ 同频同相的正弦信号。可以证明 $i_{ip}(t)$ 与 $u_s(t)$ 是相关的, $i_L(t)$ 与 $i_{ip}(t)$ 是不相关的, $i_L(t)$ 与 $u_s(t)$ 也是不相关的。将 $i_L(t)$ 作为原始输入, $u_s(t)$ 作为参考输入, $i_{ip}(t)$ 看作噪声, $i_c(t)$ 看作需要检测出来的信号,则满足自适应噪声对消法原理。

1.2 一种神经元自适应谐波电流检测方法

根据自适应噪声对消法原理,文献[5]提出了一种基于单个神经元的有源电力滤波器单相电路自适应谐波电流检测方法,其自适应谐波电流检测电路如图 2 所示。参考输入由幅度减小后的电源电压

$e_s(t)$ 和它在现在时刻以前的若干个时刻的值组成,它们构成的输入矢量为:

$$X(t) = [e_s(t), e_s(t-1), \dots, e_s(t-n+1)]^T \quad (2)$$

神经元的净输入为:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n w_i(t)x_i(t) + \theta(t) \quad (3)$$

神经元的输出为:

$$i_r(t) = f(s(t)) \quad (4)$$

式中: w_i 为神经元的权值, θ 为神经元的阈值, $f(x)$ 为激活函数。

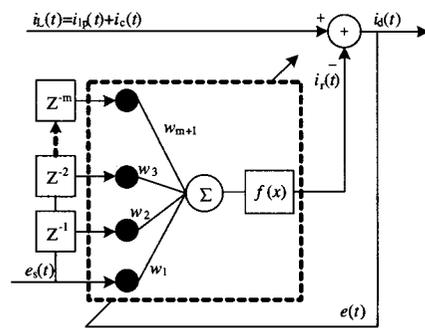


图 2 自适应谐波电流检测电路

Fig.2 Adaptive detection circuit for harmonic current

取 $f(x) = x$, 则神经元的输出为:

$$i_r(t) = \sum_{i=1}^n w_i(t)x_i(t) + \theta(t) \quad (5)$$

神经元的学习采用有监督的 delta 学习规则,通过 $e(t)$ 来调节权值和阈值。相应的修正公式为:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \eta e(t)x_i(t) + \alpha[w_i(t) - w_i(t-1)] \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, n+1$$

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \eta e(t) + \alpha[\theta(t) - \theta(t-1)] \quad (7)$$

式中: η 为学习率 ($0 < \eta \leq 1$), α 为惯性系数。

使用此算法经过若干次迭代, $e^2(t)$ 逐渐趋于最小值,权值接近最佳值,此时神经元的输出 $i_r(t)$ 逼近非线性负载电流中的基波有功电流 $i_{ip}(t)$,从而自适应谐波电流检测电路的输出 $i_d(t)$ 逼近非线性负载电流中的谐波与无功电流之和 $i_c(t)$,完成谐波电流的检测。

文献[5]只对 $n=1$ 即 $x(t) = e_s(t)$, $\eta = 0.15$, $\alpha = 0.01$ 做了仿真。但是:容易看出:该方法的性

能与一个周期内的采样个数 N 、输入量的个数 n 、学习率 η ，惯性系数 α 都有关系。为了弄清楚 N 、 n 、 η 和 α 变化对该方法性能的影响，下面对该方法进行数字仿真。

2 数字仿真

仿真时初始权值都取 $-1.0 \sim +1.0$ 之间的随机数，初始阈值都取 0。负载电流幅值从 0.5 A 突然增大为 1 A 时的仿真波形如图 3~图 9 所示。其中， e_s 为与电源电压同频同相的单位正弦信号， i_L 为负载电流； i_r 、 i_d 分别为该方法计算出的基波有功电流和补偿电流； i_{err} 为误差曲线（ i_d 减去理论上的补偿电流 i_c ）。

比较图 3、图 4 和图 5 可知：在 n 、 η 和 α 不变的情况下， $N=14$ 比 $N=20$ 的检测精度高， $N=20$ 比 $N=40$ 的检测精度高； $N=14$ 的动态响应时间（略为 2 个周期）比 $N=20$ 的动态响应时间（略为 1.5 个周期）长， $N=20$ 的动态响应时间（略为 1.5 个周期）比 $N=40$ 的动态响应时间（略为 1 个周期）长。可见：在一定的范围内， N 越小，则该方法的检测精度越高，而其动态响应时间越长。所以， N 对该方法的检测精度和动态响应时间影响较大，它既不能太大也不能太小，应选择适中。

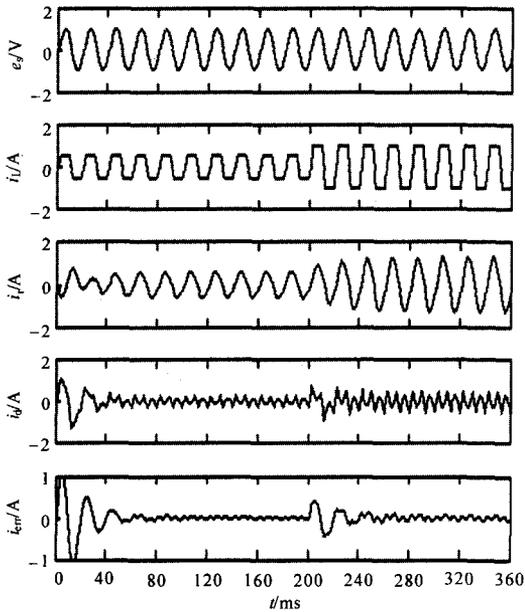


图 3 $N=14, n=1, \eta=0.15, \alpha=0.01$ 时的仿真波形
Fig.3 Simulation waveforms when
 $N=14, n=1, \eta=0.15, \alpha=0.01$

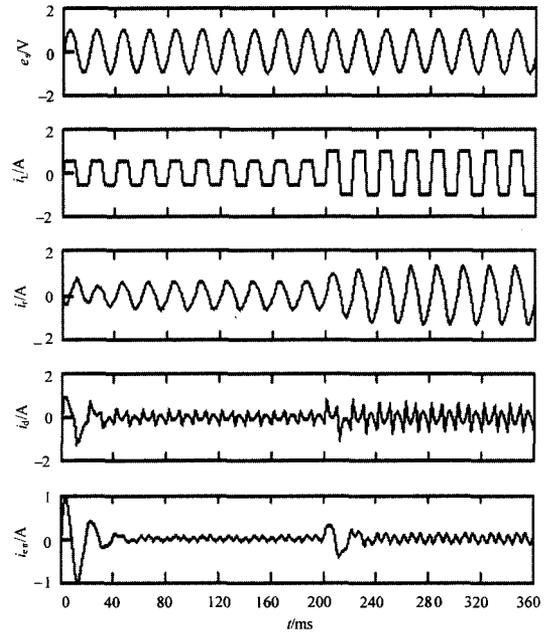


图 4 $N=20, n=1, \eta=0.15, \alpha=0.01$ 时的仿真波形
Fig.4 Simulation waveforms when
 $N=20, n=1, \eta=0.15, \alpha=0.01$

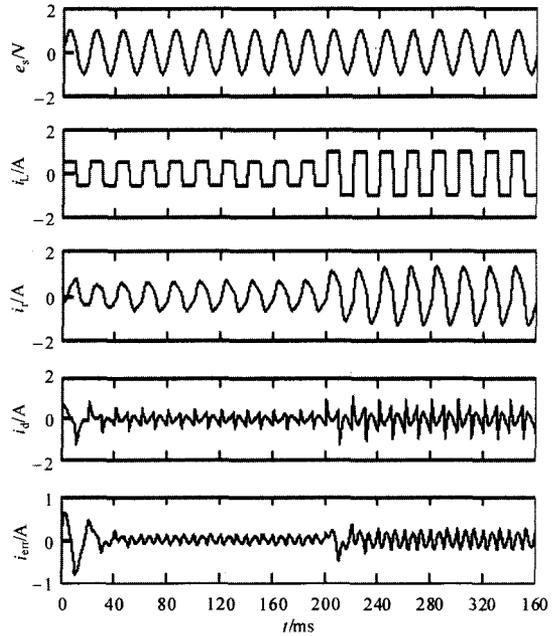


图 5 $N=40, n=1, \eta=0.15, \alpha=0.01$ 时的仿真波形
Fig.5 Simulation waveforms when
 $N=40, n=1, \eta=0.15, \alpha=0.01$

比较图 4、图 6 和图 7 可知：在 N 、 η 和 α 不变的情况下， $n=1$ 比 $n=2$ 的检测精度高，而 $n=2$ 比 $n=5$ 的检测精度高； $n=1$ 的动态响应时间（略为 1.5 个周期）比 $n=2$ 的动态响应时间（略为 1 个

周期)稍长, $n=2$ 的动态响应时间(略为 1 个周期)比 $n=5$ 的动态响应时间稍长。可见: n 越小, 则该方法的检测精度越高, n 对该方法的检测精度影响较大; 而对该方法的动态响应时间影响不大。因此, 考虑该方法的检测精度和动态响应时间, 并兼顾该方法的计算量、复杂度等, n 应越小越好, 建议 n 取 1。

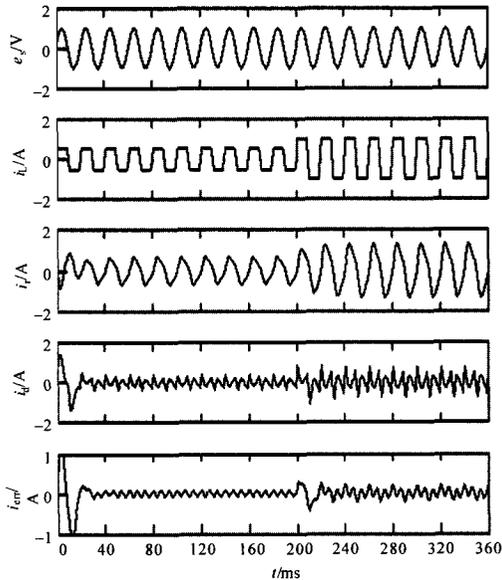


图 6 $N=20, r=2, \eta=0.15, \alpha=0.01$ 时的仿真波形
Fig.6 Simulation waveforms when $N=20, n=2, \eta=0.15, \alpha=0.01$

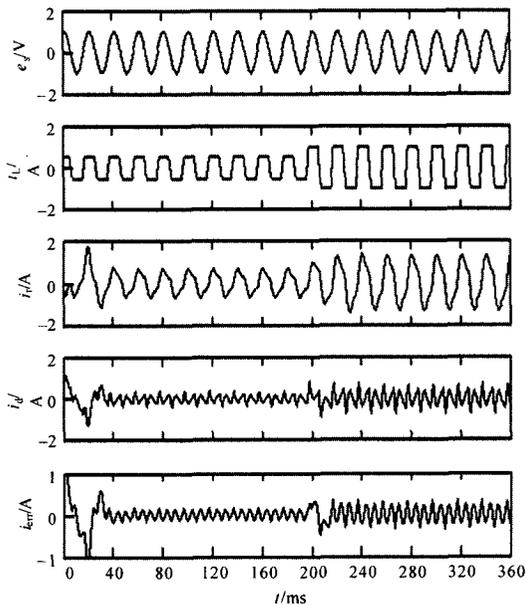


图 7 $N=20, r=5, \eta=0.15, \alpha=0.01$ 时的仿真波形
Fig.7 Simulation waveforms when $N=20, n=5, \eta=0.15, \alpha=0.01$

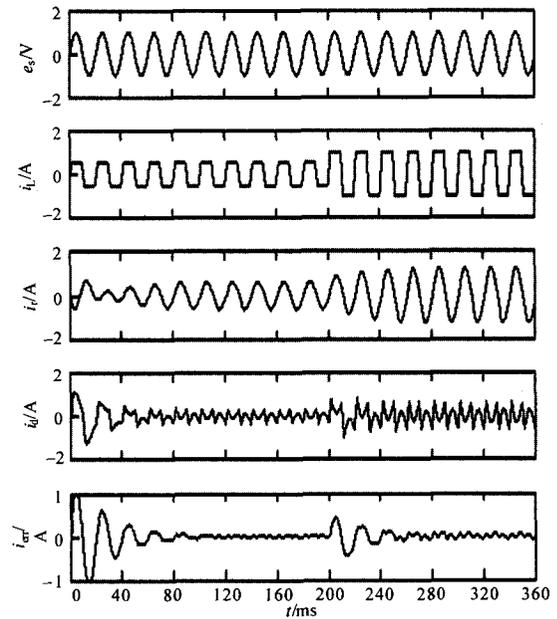


图 8 $N=20, r=1, \eta=0.08, \alpha=0.01$ 时的仿真波形
Fig.8 Simulation waveforms when $N=20, n=1, \eta=0.08, \alpha=0.01$

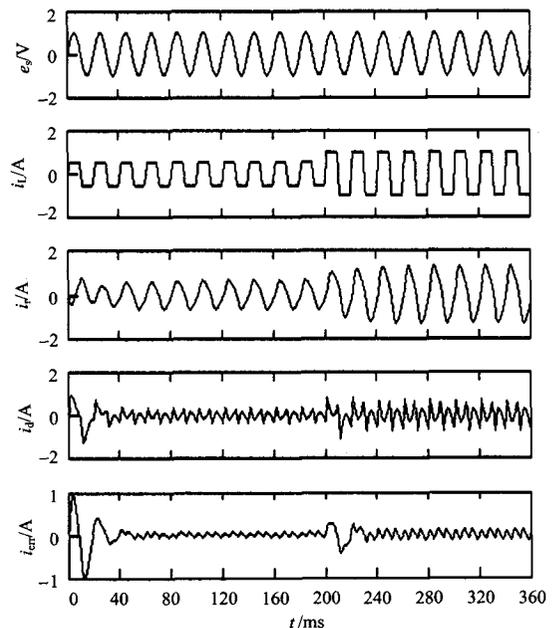


图 9 $N=20, r=1, \eta=0.15, \alpha=0.10$ 时的仿真波形
Fig.9 Simulation waveforms when $N=20, n=1, \eta=0.15, \alpha=0.10$

比较图 4 和图 8 可知: 在 N 、 n 和 α 不变的情况下, $\eta=0.08$ 比 $\eta=0.15$ 的检测精度高, 而 $\eta=0.08$ 的动态响应时间(略为 3 个周期)比 $\eta=0.15$ 的动态响应时间(略为 1.5 个周期)长。可见: η 越小, 则该方法的检测精度越高, 而其动

态响应时间越长。所以, η 对该方法的检测精度和动态响应时间影响较大, 它既不能太大也不能太小, 应选择适中。

比较图 4 和图 9 可知: 在 N 、 n 和 η 不变的情况下, $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.10$ 的检测精度无明显差别; $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.10$ 的动态响应时间(都略为 1.5 个周期)也无明显差别。可见: α 对该方法的检测精度和动态响应时间影响很小。为减小该方法的计算量并简化该方法, 建议 α 取 0。

3 结论

对该方法进行了详尽的数字仿真, 分析仿真结果, 可得出如下结论:

(1) 在一定的范围内, 一个周期内的采样个数越小, 则该方法的检测精度越高, 而其动态响应时间越长。故一个周期内的采样个数对该方法的检测精度和动态响应时间影响较大, 它既不能太大也不能太小, 应选择适中。

(2) 输入量的个数越小, 则该方法的检测精度越高, 它对该方法的检测精度影响较大; 而对该方法的动态响应时间影响不大。它越小越好, 建议取 1。

(3) 学习率越小, 则该方法的检测精度越高, 而其动态响应时间越长。故学习率对该方法的检测精度和动态响应时间影响较大, 它既不能太大也不能太小, 应选择适中。

(4) 惯性系数对该方法的检测精度和动态响应时间影响很小, 建议取 0。

参考文献

- [1] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1984, 20(3): 625-630.
- [2] Williams J L. A New Interpretation of the Akagi-nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-phase Situations[J]. IEEE Trans on Instrum Meas, 1992, 41(4): 723-727.
- [3] 王兆安, 李民, 卓放. 三相电路瞬时无功功率理论的研究[J]. 电工技术学报, 1992, (3): 55-59.
WANG Zhao-an, LI Min, ZHUO Fang. A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power of Three-phase Circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1992, (3): 55-59.
- [4] LUO Shi-guo, HOU Zhen-cheng. An Adaptive Detecting Method for Harmonic and Reactive Currents[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 1995, 42(1): 85-89.
- [5] 王群, 吴宁, 苏向丰. 有源电力滤波器谐波电流检测的一种新方法[J]. 电工技术学报, 1997, 12(1): 1-5.
WANG Qun, WU Ning, SU Xiang-feng. A New Detecting Approach of Harmonic Currents for the Active Power Filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997, 12(1): 1-5.
- [6] 王群, 周维维, 吴宁. 一种基于神经网络的自适应谐波电流检测法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1997, 20(5): 6-11.
WANG Qun, ZHOU Luo-wei, WU Ning. An Adaptive Detecting Approach of Harmonic Currents Based on ANN[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 1997, 20(5): 6-11.
- [7] 李乔, 吴捷. 自适应谐波电流检测方法用于有源电力滤波器的仿真研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(12): 86-90.
LI Qiao, WU Jie. Simulation Study of Adaptive Harmonic Current Detection Method for Active Power Filters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 86-90.
- [8] 戴朝波, 林海雪, 雷林绪. 两种谐波电流检测方法的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 80-84.
DAI Chao-bo, LIN Hai-xue, LEI Lin-xu. A Study on the Comparison of Two Harmonic Current Detecting Methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 80-84.
- [9] 王群, 谢品芳, 吴宁, 等. 模拟电路实现的神经元自适应谐波电流检测方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 42-46.
WANG Qun, XIE Pin-fang, WU Ning, et al. Neuron Adaptive Detecting Approach of Harmonic Current Based on Realization of Analog Circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 42-46.
- [10] WANG Qun, WU Ning, WANG Zhao-an. A Neuron Adaptive Detecting Approach of Harmonic Current for APF and Its Realization of Analog Circuit[J]. IEEE Trans on Instrum and Meas, 2001, 50(1): 77-84.
- [11] 高大威, 孙孝瑞. 基于神经网络的用于有源电力滤波器的电流检测[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 72-75.
GAO Da-wei, Sun Xiao-rui. An Adaptive Detecting Approach of Currents Based on Neural Network for Active Power Filter[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 72-75.
- [12] 高大威, 孙孝瑞. 基于自适应线性神经网络的三相畸变电流检测方法及其实现[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 49-52.
GAO Da-wei, SUN Xiao-rui. A Detecting Approach of Three-phase Distortion Currents Based on Adaptive Linear Neural Network and Its Being Realized[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 53-55.

(下转第 51 页 continued on page 51)

- [6] Ostrow S L. WARFTM: A Modular Wind Power System for Distributed Electric Utility Application[J]. IEEE, 1995.
- [7] Vestas Wind Systems A / S. Technical Report of Wind Turbine Generators[R]. 2001.
- [8] Salman S K, Liang F, Rogers W J S. Effects of Wind Power Generators on the Voltage Control of Utility Distribution Networks[Z].
- [9] Sun Tao, Chen Z, Blaabjerg F. Transient Analysis of Grid-Connected Wind Turbines with DFIG after an External Short-Circuit Fault[A]. In: Nordic Wind Power Conference[C]. Chalmers University of Technology, 2004.
- [10] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [11] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 10-14.
CHI Yong-ning, WANG Wei-sheng, LIU Yan-hua. Impact of Large Scale Wind Farm Integration on Power System Transient Stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 10-14(in Chinese).
- [12] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
LEI Ya-zhou. Studies on Wind Farm Integration Into Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89.
- [13] 宋伟, 李昌禧. 大型风力发电机组并网运行的探讨[J]. 河北电力技术, 2003, (1): 50-53.
SONG Wei, LI Chang-xi. Discussions on On-line Parallel Operation of Large Windmill Generators[J]. Hebei Electric Power Technology, 2003, (1): 50-53.
- [14] 王建生. 基于 MATLAB 的风力异步发电机动态仿真[J]. 电力学报, 2005, 20(3): 237-239.
WANG Jian-sheng. Dynamic Simulation of the Wind Turbine Asynchronous Generator in Matlab[J]. Journal of Electric Power, 2005, 20(3): 237-239.
- [15] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.
LI Jing, SONG Jia-hua, WANG Wei-sheng. Modeling and Dynamic Simulation of Variable Speed Wind Turbine with Large Capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105.
- [16] Windrow B, Winter R. Adaptive Signal Processing[M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.

收稿日期: 2008-04-26; 修回日期: 2008-08-28

作者简介:

文玉玲(1975-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护整定计算; E-mail: wenyuling2009@yahoo.com.cn

晁勤(1959-), 女, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力系统综合自动化及风力发电技术与教学工作。

(上接第 5 页 continued from page 5)

- [13] 林添顺, 黄阜民, 张尧. 单相自适应检测在三相无功及谐波电流检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 66-68.
LIN Tian-shun, HUANG Fu-min, ZHANG Yao. The Adaptive Detection of Single-phase Circuit Applied in Harmonic and Reactive Currents Detection of Three-phase Circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 66-68.
- [14] 高大威, 孙孝瑞, 卢青春. 基于神经网络电流检测的有源电力滤波器研究[J]. 电力电子技术, 2002, 36(5): 48-56.
GAO Da-wei, SUN Xiao-rui, LU Qing-chun. Active Power Filter Based on Current Detection with Neural Network[J]. Power Electronics, 2002, 36(5): 48-56.
- [15] 高大威, 孙孝瑞. 三相不对称非线性负载情况下的畸变电流检测[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(13): 45-47.
GAO Da-wei, SUN Xiao-rui. A Detecting Method of Current Distortion Under the Condition of Unbalanced Nonlinear Loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 45-47.
- [16] Widrow B, Winter R. Adaptive Signal Processing[M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N J, 1985.

收稿日期: 2008-04-28; 修回日期: 2008-05-28

作者简介:

李自成(1967-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及其应用; E-mail: lifengli9222@ujs.edu.cn

孙玉坤(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机非线性智能控制、电能质量控制技术、磁悬浮无轴承电机等。