

改进低通滤波器的瞬时无功功率谐波电流检测方法

耿涛, 赵金

(华中科技大学控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 瞬时无功功率谐波电流检测方法得到广泛应用, 其性能主要受低通滤波器的影响。通过统计理论中的假设检验方法判断电网电流处于稳态或瞬态, 在不同的状态选择精度优先或动态性能优先的低通滤波器, 从而提高瞬时无功功率谐波电流检测方法的性能。作者使用 Matlab 建立谐波电流模型, 并采用文中所建议的方法, 对比了改进前与改进后两种电流谐波检测效果, 仿真结果证明改进后的方法具有较好的检测效果。

关键词: 瞬时无功功率; 改进低通滤波器; 谐波检测

Instantaneous reactive power theory harmonic detection method based on improved lowpass filter

GENG Tao, ZHAO Jin

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Instantaneous reactive power theory is adopted broadly. Its performance is affected by the lowpass filter. This paper describes a method whether the steady or transient state of the power net can be judged by hypothesis test. And then proposed lowpass filter switches between the two different frequency for steady-state and transient estimation. The utility of instantaneous reactive power theory is improved. Author models the harmonic current with Matlab. And with the proposed method, the result of simulation presents the better performance.

Key words: instantaneous power; improved lowpass filter; harmonic detection

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0053-04

0 引言

日本学者 H. Akagi 1983 年提出瞬时无功功率理论^[1], 以瞬时实功率 p 和瞬时虚功率 q 的定义为基础, 即 pq 理论, 后又发展为以瞬时有功电流 i_p 和瞬时无功电流 i_q 为基础的理论体系。瞬时无功功率理论的提出, 摒弃了传统的以平均功率定义为基础的功率定义理论, 该方法原理简单、动态响应速度快、延时小, 可以实现谐波与无功功率的分别检测。目前大多数的 APF 产品均使用这种检测方式^[2]。

在三相对称无中线 Y/Δ 电路中, 谐波成份只有 $6k \pm 1$ 次谐波。设三相电流的瞬时值为 i_a, i_b, i_c , 它们由基波和谐波成分组成, 谐波表达式如式 (1)、(2)。

图 1 为有功电流 i_p 和瞬时无功电流 i_q 谐波检测方法原理图。三相电流通过 Clark 变换变换为两相有功与无功电流的直流量与交流量两项之和 $\bar{i} + \tilde{i}$ 。两相电流经过低通滤波器 (LPF) 得到电流直流量 \bar{i} , 由 Clark 逆变换得到三相基波电流, 与原各相

电流相减, 得到各相谐波电流 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 。

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin[n(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \varphi_n] \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin[n(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \varphi_n] \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\cos \omega t & -\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} =$$

$$\sqrt{3} \begin{bmatrix} I_1 \cos \varphi_1 \mp \sum_{n=6k \pm 1} I_n \cos[(n \pm 1)\omega t + \varphi_n] \\ I_1 \sin \varphi_1 - \sum_{n=6k \pm 1} I_n \sin[(n \pm 1)\omega t + \varphi_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_p + \tilde{i}_p \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

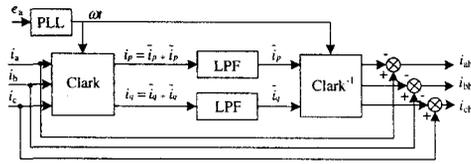


图 1 i_p-i_q 瞬时无功功率谐波检测运算方式原理图

Fig.1 Principle algorithm of the instantaneous power “ i_p-i_q theory” for harmonic detection

由于检测方法中使用低通滤波器 (LPF), 检测精度与速度受 LPF 的影响^[3]。LPF 截止频率低时, 有较高的检测精度, 但动态性能较差; LPF 截止频率高时, 有较好的动态性, 但检测精度较差。因此, 为了兼顾谐波电流检测的动态性与精度, LPF 截止频率的设计不能过小也不能过大。

本文设计两种截止频率的 LPF, 通过统计理论中的假设检测方法来判断电网电流处于稳态或瞬态, 来选择精度优先或动态性能优先的低通滤波器, 从而在整体上获得较优的动态响应性能和稳态精度。

1 电网电流瞬态与稳态的判断

电网电流处于稳态时, 单位基波周期内采样点数学期望 $\mu=0$, 为了判断电网电流处于瞬态或稳态, 选置信水平 $\alpha=80\%$, 原假设与备选假设为:

$$H_0: \mu = \mu_0 = 0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

检验统计量的观测值 t 服从 t 分布, 通过下式计算:

$$t = \sqrt{n} \frac{\bar{X} - \mu_0}{S} \sim t(n-1)$$

其中: n 为一个基波周期内采样点的个数, \bar{X} 、 S 分别为一个基波周期内采样点的样本均值与样本方差, 由下式计算得到。

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=i+1}^{i+n} x_k$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{k=i+1}^{i+n} x_k^2 - n\bar{X}^2 \right)$$

其中: x_k 为 k 时刻电流采样值, i 为迭代起始点, 即当前的采样点。

假设检验拒绝域条件及滤波器的选择通过表 1 判断。

表 1 假设检验的决策表格

Tab.1 Hypothesis test decision table

t 统计值	决策	电网状态	滤波器
$t > t_{1-\alpha/2}(n-1)$	拒绝 H_0	瞬态	速度优先
$t < t_{1-\alpha/2}(n-1)$	接受 H_0	稳态	精度优先

采样频率设为 2 kHz, 基波频率为 50 Hz, 所以基波周期内的采样点 $n=40$, $\alpha=0.8$, 则 t 的临界值 $t_{1-\alpha/2}(n-1) = t_{0.6}(39) = 0.255$ 。检测系统初始时令前一个周期为瞬态, 初始结束时使用假设检验判断其状态。电网电流瞬态与稳态的判断算法流程图如图 2 所示。

为衡量检测误差定义单位周期检测误差 PDE (Period Detection Error) 为下式的值:

$$PDE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=i}^{i-N-1} (i(k) - i_1(k))^2}$$

本文仅检测基波电流, 这里 $i(k)$ 为实际的谐波电流基波分量, $i_1(k)$ 为检测方法检测得到的基波电流。以 PDE 来衡量检测方法的检测精度。在下面的论述中均以实际 a 相基波, 与检测得到的 a 相基波为分析对象。

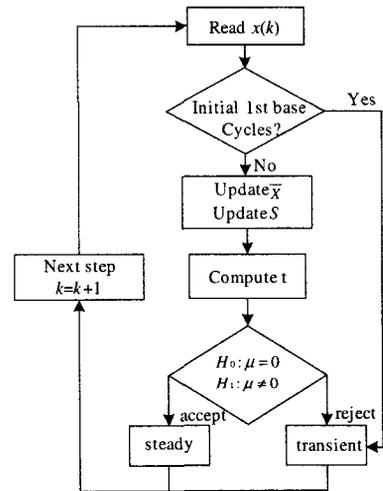


图 2 电网电流瞬态与稳态的判断算法流程图

Fig.2 Steady-state and transient estimation arithmetic

本文通过 Matlab 模拟电网电流跳变、波动的情况, 并通过假设检验对电网状态进行判断。定义已知谐波分量的电网电流如表 2 所示。

$$I_a = \sin(\omega t) + 0.5\sin(5\omega t) + 0.12\sin(7\omega t) + 0.08\sin(11\omega t) + 0.06\sin(13\omega t)$$

$$I_b = \sin(\omega t - 120) + 0.5\sin(5\omega t + 120) + 0.12\sin(7\omega t - 120) + 0.08\sin(11\omega t + 120) + 0.06\sin(13\omega t - 120)$$

$$I_c = \sin(\omega t + 120) + 0.5\sin(5\omega t - 120) + 0.12\sin(7\omega t + 120) + 0.08\sin(11\omega t - 120) + 0.06\sin(13\omega t + 120)$$

表 2 定义的三相谐波电流

Tab.2 The defined harmonic current of ABC phase

谐波次数	1	5	7	11	13
幅值/p.u.	1	0.2	0.12	0.08	0.06
相位/(°)	0	0	0	0	0
	-120	120	-120	120	-120
	120	-120	120	-120	120

0.1 s 时刻, I_a, I_b, I_c 各次谐波幅值分别跳变为原来的两倍, 如图 3 所示, 在跳变瞬态时刻, 本文所建议的方法对电网电流稳态和瞬态做出了正确的判断。

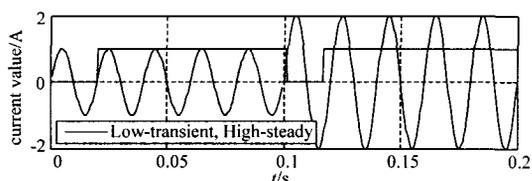


图 3 稳态与瞬态判断的 Matlab 仿真图

Fig.3 Steady-state and transient estimation by Matlab

2 LPF 对 PQ 方法检测性能影响及其分析

速度优先 LPF1 设计为 2 阶 Butterworth 低通滤波器, 截止频率为 80 Hz, Z 域传递函数为:

$$G_1(Z) = \frac{0.01336Z^2 + 0.02672Z + 0.01336}{Z^2 - 1.647Z + 0.7009}$$

使用 LPF1 的 PQ 检测方法对 a 相基波电流的检测如图 4 所示。

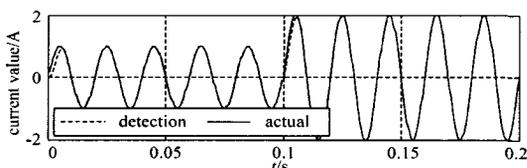


图 4 仅使用 LPF1 时的基波电流检测性能

Fig.4 The performance of PQ method(cutoff frequency 80 Hz)

算得 $PDE=5.67 \times 10^{-4}$, 由于截止频率较高, 当电网电流处于瞬态时, 较多的高频分量可以通过, 电流检测具有较快的动态响应性能, 但同时, 稳态时, LPF 对低次谐波幅值衰减太小, 有过多的分量通过 LPF, 因此造成检测精度较差。

精度优先 LPF2 设计为 2 阶 Butterworth 低通滤波器, 截止频率为 20 Hz, Z 域传递函数为:

$$G_2(Z) = \frac{0.0009447Z^2 + 0.001889Z + 0.0009447}{Z^2 - 1.911Z + 0.915}$$

使用 LPF2 的 PQ 检测方法对 a 相基波电流的检测如图 5 所示。

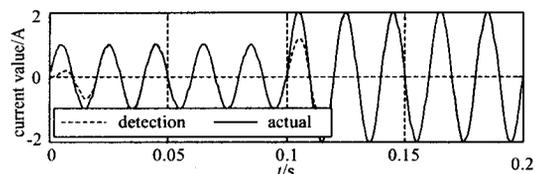


图 5 仅使用 LPF2 时的基波电流检测性能

Fig.5 The performance of PQ method(cutoff frequency 20Hz)

算得 $PDE=2.76 \times 10^{-1}$, 约为 LPF1 误差的一半。理论分析与 LPF1 分析相同, 由于 LPF2 截止频率较低, 具有较差的动态性能与较高的稳态精度。

3 改进低通滤波器及其检测性能分析比较

通过判断电流的瞬态与暂态, 设计一种自适应改进低通滤波器, 在 LPF1 与 LPF2 两个滤波器之间切换, 以此获得稳态的高精度, 与瞬态的快速响应速度。低通滤波器切换方式如图 6 所示, 为防止单点切换带来的抖动, LPF1 与 LPF2 的切换使用两点切换, 即滞环切换。滞环宽度设为 Δt , 切换算法描述为:

```

if t > t1-a/2(n-1) + Δt/2
switch to LPF1
elseif t < t1-a/2(n-1) - Δt/2
switch to LPF2
else
hold
    
```

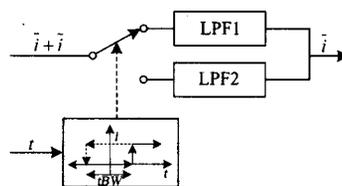


图 6 改进低通滤波器切换方式

Fig.6 Improved LPF switch method

为对比改进后的检测效果与传统的低通滤波器的效果, 定义以下时变电网电流信号。幅值在半个基波周期内保持不变, 半个基波周期之间随机波动, $I_a=(1-40*\text{random})*I_a$, $I_b=(1-40*\text{random})*I_b$, $I_c=(1-40*\text{random})*I_c$, random 为 [0 1] 的随机值。 $\Delta t=0.01$, 仿真波形如图 7、图 8 所示。

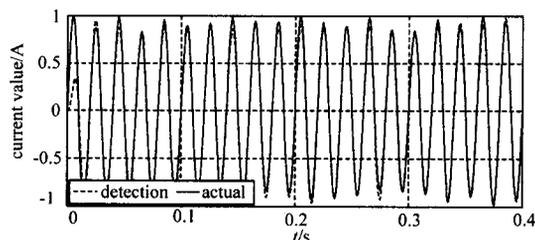


图 7 典型值为 30 Hz LPF 的基波电流检测性能

Fig.7 Performance of PQ method(cutoff frequency 30 Hz)

截止频率典型值为 30 Hz 的谐波检测效果如图 7 所示, 算得 $PDE=3.32 \times 10^{-3}$ 。

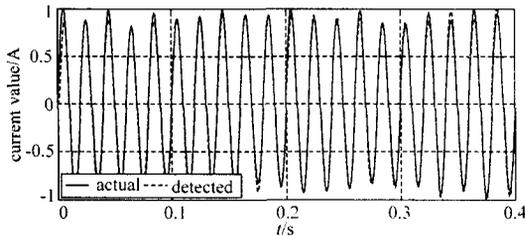


图 8 改进低通滤波器的基波电流检测性能
Fig.8 Performance of PQ method(improved LPF)

算得 $PDE=2.05 \times 10^{-3}$, 改进低通滤波器误差约为改进前的 2/3, 在电网电流处于瞬态时, 使用 LPF1 (80 Hz), 在稳态时使用 LPF2 (20 Hz), 因此改进低通滤波器兼具两种滤波的共同优点, 相比使用截止频率典型值为 30 Hz 的低通滤波器具有较好的检测效果。

4 结论

本文通过统计理论中的假设检验方法, 判断电网电流的暂态或瞬态, 根据不同的状态, 切换两种截止频率的低通滤波器, 仿真结果证明, 这种使用自动切换的低通滤波器的谐波检测方法与传统瞬时无功功率谐波电流检测方法相比, 该方法简单易行,

在一定程度上兼顾了动态速度与检测精度。实现时只需存储两组 LPF 系数, 与一个周期的采样值 (用于电流瞬态、暂态判断), 无需增加额外的硬件与软件开销。

参考文献

[1] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits[A]. In: Proc 1983 Inf Power Electronics Conf[C]. Tokyo(Japan): 1983.

[2] Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.

[3] 王群,姚为正,王兆安. 低通滤波器对谐波检测电路的影响[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 5-8. WANG Qun, YAO Wei-zheng, WANG Zhao-an. Effect of Low Pass Filter on Harmonics Detection Circuit[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(4): 5-8.

收稿日期: 2008-05-08; 修回日期: 2008-06-04

作者简介:

耿涛 (1981-), 男, 博士生, 主要从事有源滤波和电能质量控制技术研究; E-mail: gengtao@smail.hust.edu.cn

赵金 (1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为运动控制系统理论与应用、智能控制理论与应用。

(上接第 43 页 continued from page 43)

PAN Lei-lei, LIU Jun-yong. Investigation of Regional Real-Time Var Optimization Control System Considering the Impact of the Order of Control Actions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 110-118.

[4] 丁晓群, 陈晟, 许杏桃, 等. 全网无功电压优化集中控制系统在泰州电网的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 21-23, 44.

DING Xiao-qun, CHEN Cheng, XU Xing-tao, et al. Application of Optimization and Centralized Control System for Reactive Power/Voltage in Taizhou Power Network[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 21-23, 44.

[5] Karmarkar N K. A New Polynomial-time Algorithm for Linear Programming[J]. Combinatorica, 1984, (4): 373-395.

[6] Wei H, Sasaki H, Yokoyama R. An Application of Interior Point Quadratic Programming Algorithm to Power System Optimization Problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 260-267.

[7] 郭庆来, 吴越, 张伯明, 等. 地区电网无功优化实时控制系统的研究与开发[J]. 电力系统自动化, 2002,

26(13): 66-69.

GUO Qing-lai, WU Yue, ZHANG Bo-ming, et al. Research and Development of Real-Time Control System for Reactive Power Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 66-69.

[8] 许文超,郭伟. 电力系统无功优化的模型及算法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 100-104.

XU Wen-chao, GUO Wei. Summarize of Reactive Power Optimization Model and Algorithm in Electric Power System[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2003, 15(1): 100-104.

收稿日期: 2008-05-01; 修回日期: 2008-06-05

作者简介:

薛斌 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优化理论及应用; E-mail: xuebin00052229@gmail.com

祝云 (1974-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统最优化理论及应用;

韦化 (1954-), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统最优运行与规划, 涉及电力市场、电力系统分析与计算、最优潮流、水火电力系统最优潮流、电压稳定、状态估计、网络与分布计算等。