

基于 Simulink 的两种单相谐波电流检测方法研究

李圣清, 何政平, 李永安, 曾黎琳

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 随着电网中谐波污染的日益严重, 谐波与无功检测成为了提高电能质量的关键手段之一。文章详细分析了基于扩展二维理论的谐波快速检测方法和基于有功电流分离法的无锁相环谐波电流检测法, 并对之进行了 Matlab/Simulink 仿真分析验证。结果表明, 理想工况下, 这两种方法都能实时准确地检测谐波电流, 算法较简单, 容易实现; 当电网电压畸变、基波频率偏移时, 采用基于有功电流分离的单相谐波电流检测法的检测精度更高。

关键词: 谐波检测; 有源电力滤波器; 有功电流分离法; 扩展二维理论

中图分类号: TM761⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)06-0054-04

Research on Two Detection Methods of Single-phase Circuit Harmonic Current Based on Simulink

LI Sheng-qing, HE Zheng-ping, LI Yong-an, ZENG Li-lin

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: As the harmonic pollution of power grid is becoming increasingly seriously, harmonic and reactive detection has become one of the key approaches of power quality improvement. It analyzed amply a harmonic current detection method based on the two-dimensional spread theory and a fast harmonic detection method based on the active current separation theory which has no phase locked loop (PLL), and verified them by Matlab/Simulink. Simulation results show that these two methods can detect harmonic and reactive currents of single-phase circuit real-timely and accurately under ideal conditions, and the algorithms are simple and easy to implement; but once the grid voltage distorts and the fundamental frequency offsets, the harmonic current detection algorithm of single-phase circuit based on the active current separation theory has a higher accuracy.

Key words: harmonic detection; active power filter; active current separate method; two-dimensional spread theory

0 引言

随着电力电子技术及其装置的发展与广泛应用, 大量非线性电子设备被广泛地用于电网中, 由电网谐波引起的电能质量问题日益严重, 使得人们越来越关注有源电力滤波器。有源电力滤波器多为三相滤波器, 而在某些领域(如电气化铁路), 由单相非线性负载引

起的谐波危害也很严重^[1-2], 其谐波电流的检测是直接影响到有源滤波效果的关键环节^[3]。

三相电路的谐波及无功电流检测方法比较成熟, 其中最好的方法是基于三相电路瞬时无功功率理论, 将该思想扩展到单相电路谐波检测, 可通过构造另外两相电路来实现, 但是算法比三相瞬时无功功率检测法复杂^[3-6]。文献[7]提出了一种人工神经网络与锁相环相结合的谐波检测方法, 该方法采用神经网络计算基波幅值, 利用锁相环获取单位幅值的基波电流, 二者相乘得到电网基波电流, 最终得到谐波电流, 算法较为复杂, 并且由于采用锁相环, 增加了检测电路的复杂程度。文献[8]采用自适应神经网络检测谐波电流, 它基于自适应噪声

收稿日期: 2012-09-15

作者简介: 李圣清(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电能质量调节与控制技术、电力电子系统控制技术等研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077046); 湖南省重点学科建设资助项目(201176); 湖南省研究生科研创新项目(CX2012B401)

对消技术的基本原理, 将基波电流从负载电流中滤除, 从而得到谐波电流, 方法复杂。当电网频率偏移时, 上述方法可能因锁相环电路的存在而影响检测的准确性^[9]。文献[9]和[10]提出了一种无锁相环的谐波电流检测方法, 它省去了锁相环电路, 避免了电网频率偏移对检测准确性的影响。本文对基于扩展二维理论的谐波快速检测方法和基于有功电流分离法的无锁相环谐波电流检测法进行了详细分析, 并通过 Simulink 软件进行了仿真分析和验证。

1 基于扩展二维理论的检测方法

电力系统中, 电流和电压一般是周期为 T 的非正弦信号 $f(t)$, 根据傅里叶级数可展开为:

$$f(t) = \sum_{k=1}^M [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] = \sum_{k=1}^M A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (1)$$

式中: A_k —— $f(t)$ 信号幅值, $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$; φ_k —— $f(t)$ 信号初相角, $\varphi_k = \arctan(a_k/b_k)$ 。

对式(1)求导, 可得:

$$f'(t) = \sum_{k=1}^M A_k k \omega \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (2)$$

令 $g(t) = f'(t)/\omega$, 则:

$$g(t) = \sum_{k=1}^M A_k k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (3)$$

利用式(1)和式(3)构成二维空间向量 $\mathbf{F}$, 即取 $\mathbf{F} = [f(t), g(t)]$; 二维空间中另两个向量 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 分别取为 $\mathbf{F}_1 = (\sin\omega t, \cos\omega t)$ 和 $\mathbf{F}_2 = (\cos\omega t, -\sin\omega t)$ 。根据向量的点积可得:

$$\begin{cases} \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}_1 = f(t) \sin\omega t + g(t) \cos\omega t = A_1 \cos\varphi_1 + \tilde{P}_1 = P_1 + \tilde{P}_1 \\ \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}_2 = f(t) \cos\omega t + g(t) \sin\omega t = A_1 \sin\varphi_1 + \tilde{P}_2 = P_2 + \tilde{P}_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_1 —— $\mathbf{F} \cdot \mathbf{F}_1$ 的直流分量, $P_1 = A_1 \cos\varphi_1$; $\tilde{P}_1$ —— $\mathbf{F} \cdot \mathbf{F}_1$ 的交流分量; P_2 —— $\mathbf{F} \cdot \mathbf{F}_2$ 的直流分量, $P_2 = A_1 \sin\varphi_1$; $\tilde{P}_2$ —— $\mathbf{F} \cdot \mathbf{F}_2$ 的交流分量。

经低通滤波器滤波分别可得 P_1 和 P_2 , 由此得出 $f(t)$ 的基波分量:

$$\begin{cases} f_1(t) = A \sin(\omega t + \sigma) \\ f_h(t) = f(t) - f_1(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ ——基波初相角, $\sigma = \arctan(P_2/P_1)$; A ——基波幅值, $A = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}$ 。

扩展二维单相谐波电流检测方法(以下简称“扩展二维法”)的原理如图1所示。因低通滤波器的存在, 谐波电流检测时会产生几个毫秒以上的延时; 且由于采用了微分环节, 当电网电流发生跳变时, 波形可能会出

现毛刺^[5]。谐波电流检测过程中, 即使电网电压发生畸变, 其基波分量也不会改变, 因为锁相环产生的正弦及余弦信号是由电网电压的基波分量确定的, 不会影响整个电路的计算; 但当电网基波频率发生偏移时, 锁相环电路可能因失锁而影响检测的准确性^[9]。

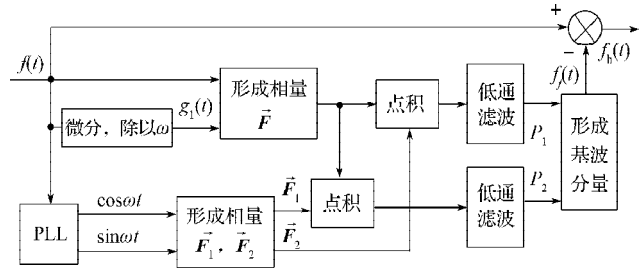


图1 扩展二维单相谐波电流检测方法

Fig.1 Harmonic current detection algorithm of single-phase circuit based on the two-dimensional spread theory

2 基于有功电流分离法的检测方法

假设电网电压畸变、基波频率偏移 u_s , 则根据傅里叶级数, 电网电压 u_s 可展开为:

$$u_s = u_1 + u_h = U_1 \sin(\omega' t + \phi_1) + u_h \quad (6)$$

式中: u_1 ——基波电压; u_h ——谐波电压; ω' ——电网实际角速度; U_1 ——基波电压幅值; ϕ_1 ——基波电压初相角。

电网电流 i_s 可展开为:

$$i_s = i_1 + i_h = I_1 \sin(\omega' t + \varphi_1) + i_h = I_1 \cos(\phi_1 - \varphi_1) \sin(\omega' t + \phi_1) + I_1 \sin(\phi_1 - \varphi_1) \cos(\omega' t + \phi_1) + i_h = i_{1p} + i_{1q} + i_h \quad (7)$$

式中: i_1 ——基波电流; i_{1q} ——基波无功电流; i_{1p} ——基波有功电流; i_h ——谐波电流; I_1 ——基波电流幅值; φ_1 ——基波电流初相角。

将式(6)两边同乘以 $\sin(\omega t + \theta)$, 经低通滤波器滤波并乘以2, 可得 $U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$; 同理将式(6)两边同乘以 $\cos(\omega t + \theta)$, 经过低通滤波器滤波并乘以2, 可得 $U_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$, 据此可得:

$$\begin{aligned} u_1 &= U_1 \sin(\omega' t + \phi_1) = U_1 \sin[(\omega' t + \phi_1 - \omega t - \theta) + (\omega t + \theta)] = \\ &= U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \sin(\omega t + \theta) + \\ &= U_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \cos(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

对电网电流进行同样处理, 可得:

$$\begin{aligned} i_1 &= I_1 \sin(\omega' t + \varphi_1) = I_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \varphi_1 - \theta] \sin(\omega t + \theta) + \\ &= I_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \varphi_1 - \theta] \cos(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

由式(7)可知, 欲求 i_{1p} 和 i_{1q} , 需先算出 $\cos(\phi_1 - \varphi_1)$:
 $\cos(\phi_1 - \varphi_1) = \cos[(\omega' t + \phi_1 - \omega t - \theta) - (\omega' t + \varphi_1 - \omega t - \theta)] =$
 $\cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \cos[(\omega' - \omega)t + \varphi_1 - \theta] +$
 $\sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \sin[(\omega' - \omega)t + \varphi_1 - \theta] =$

$$\frac{BD + CE}{U_1 I_1} \quad (10)$$

式中: $B = U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$;

$$C = U_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta];$$

$$D = I_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta];$$

$$E = I_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]。$$

根据式(7)、式(8)和式(10),可得:

$$i_{ip} = I_1 \cos(\phi_1 - \phi_i) \sin(\omega' t + \phi_i) = I_1 \frac{u_1}{U_1} \cos(\phi_1 - \phi_i) =$$

$$I_1 \times \frac{u_1}{U_1} \times \frac{BD + CE}{U_1 I_1} = \frac{BD + CE}{U_1^2} u_1 = \frac{BD + CE}{B^2 + C^2} u_1 \quad (11)$$

$$i_{iq} = i_1 - i_{ip} \quad (12)$$

$$i_h = i - i_1 \quad (13)$$

有功电流分离单相谐波电流检测方法(以下简称“有功电流分离法”)的原理如图2所示。由式(8)、式(9)及式(11)~式(13)可以看出,参与运算的正弦和余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 和 $\cos(\omega t + \theta)$ 建立在给定正余弦函数的基础上,并非以实际的基波角速度 ω' 为基准。 ω 在坐标变换中仅起过渡作用,且实际应用时电网规定的角速度偏差值比较小,可以直接取标准工频(50 Hz)对应的角速度值。 θ 可任意取值,不影响最后结果的准确性。该检测法无需锁相环,因此简化了系统;且相对于扩展二维法,还可以进一步检测基波有功和无功电流。

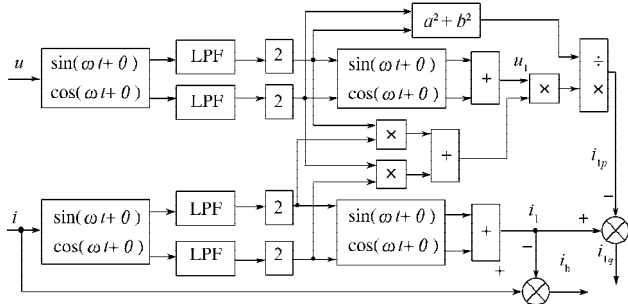


图2 有功电流分离单相谐波电流检测方法

Fig.2 Harmonic current detection algorithm of single-phase circuit based on the active current separated theory

3 仿真分析

对两种单相谐波电流检测方法进行Matlab/Simulink仿真验证。仿真电路如图3所示,其负载由带阻感负载的不可控整流桥组成,为非线性负载。表1示出单相谐波检测系统电路参数。本文分别对电压无畸变、基波频率无偏移和电压畸变、基波频率偏移两种工况下单相谐波电流进行仿真。

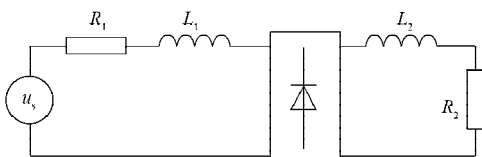


图3 仿真电路图

Fig.3 Simulation circuit

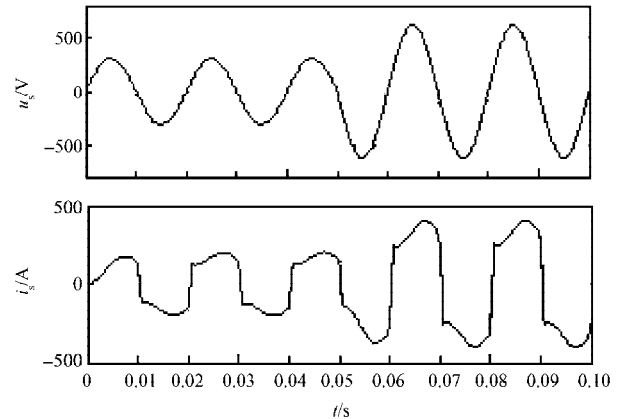
表1 系统电路参数

Tab.1 Parameters of the system circuit

参数	系统电压 U_s/V	系统电压 基波频率 f_s/Hz	系统等效 电阻 R_1/Ω	系统等效 电感 L_1/mH	整流桥直 流侧电阻 R_2/Ω	整流桥直 流侧电感 L_2/mH
数值	220	50	0.2	0.1	1.0	5

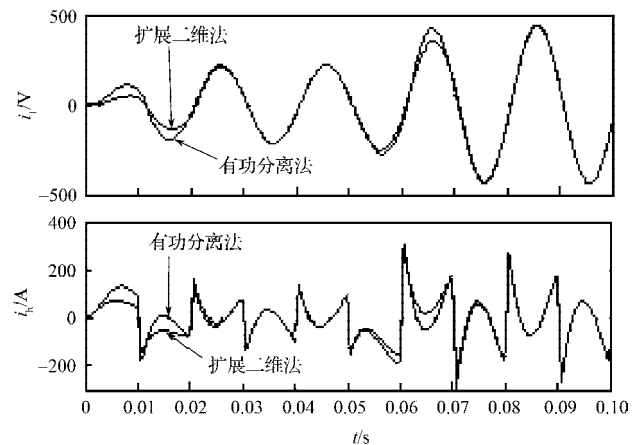
3.1 电压无畸变、频率无偏移工况

对电压无畸变、基波频率无偏移工况下单相谐波电流进行仿真。为检验电网不稳定时检测方法的动态跟踪性能,假设从0.05 s时刻起,电网电压增大一倍(图4(a)上图),此时电网电流波形严重畸变(图4(a)下图)。图4(b)上图示出利用扩展二维法和有功电流分离法检测得到的基波电流波形,可以看出,动态过程中,利用有功电流分离法,其幅值响应快些,但两种方法都需经约一个基波周期(0.02 s)的时间才能最终达到稳定状态;图4(b)下图示出利用这两种方法得到的谐波电流。可以看出,电压无畸变、频率无偏移工况下,利用这两种方法都能实时、准确地检测出谐波电流。图4(c)示出利用有功电流分离法检测的结果,可以看出,有功电流分离法还能准确地检测基波有功、无功电流。



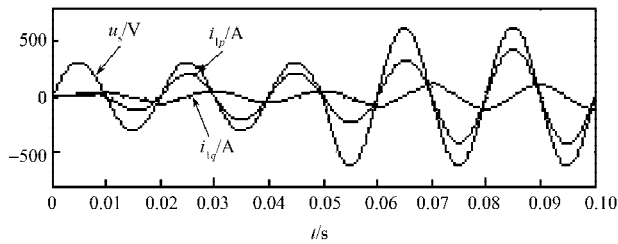
(a)系统电压和电流

(a)System voltage and current



(b)基波和谐波电流

(b)Fundamental current and harmonic current



(c)系统电压、基波有功和无功电流

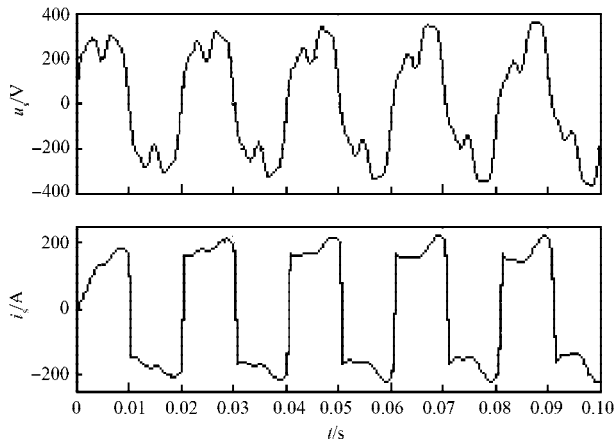
(c)System voltage, fundamental active current and fundamental reactive current

图4 仿真结果

Fig.4 Simulation results

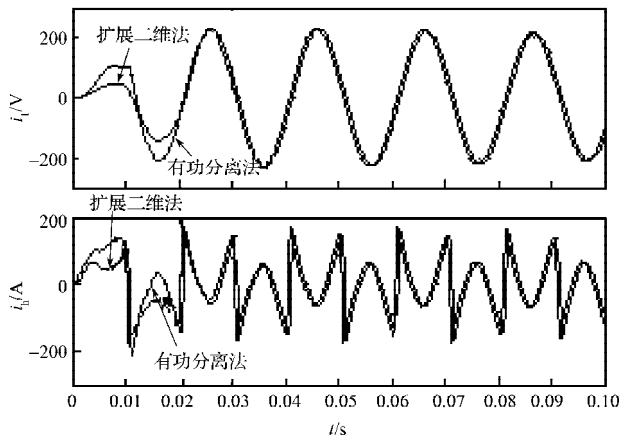
3.2 电压畸变、基波频率偏移工况

在系统电压畸变、电网基波频率发生偏移的工况下,仿真结果如图5所示。可以看出,利用有功分离法仍然能实时准确地分离、检测出基波、基波有功电流、基波无功电流和谐波电流;而利用扩展二维法,因为锁相环失锁而产生偏差,直接影响到检测结果的准确性。



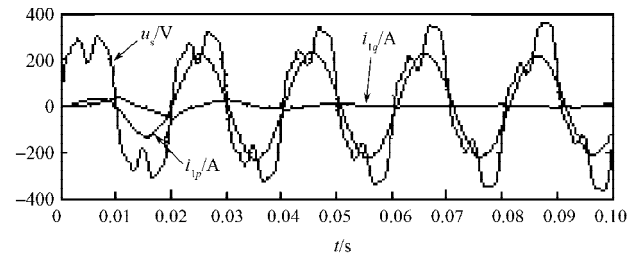
(a)系统电压和电流

(a)System voltage and current



(b)基波和谐波电流

(b)Fundamental current and harmonic current



(c)系统电压、基波有功和无功电流

(c)System voltage, fundamental active current and fundamental reactive current

图5 仿真结果

Fig.5 Simulation results

4 结语

本文对两种单相谐波电流检测方法进行了详细推导,通过 Simulink 搭建仿真模型并进行了仿真。从算法的推导过程可以看出,扩展二维法检测算法相对简单,但检测过程会受锁相环影响;而有功电流分离法在电网频率和电压畸变工况下仍然能实时准确地提取谐波电流、基波有功和无功电流,并且由于无需锁相环,简化了系统结构。从仿真结果可以看出,在电压无畸变、频率无偏移工况下,这两种方法都能实时地检测出谐波电流;但当电网电流畸变、频率发生偏移时,仅有功电流分离法仍然能够实时准确地检测出谐波、基波有功和无功电流,而扩展二维检测法检测精度受影响。

参考文献:

- [1] 孙曙光,王景芹,师顺泉.单相电路谐波及无功电流实时检测的研究[J].电测与仪表,2008(1):4-7.
- [2] 陆秀令,张松华,曹才开,等.单相电路谐波及无功电流新型检测方法[J].高电压技术,2007,33(7):163-166.
- [3] 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(1):81-84.
- [4] 荣飞,罗安,范卿.一种新的谐波电流检测方法[J].高电压技术,2008,34(1):138-141.
- [5] 姜齐荣.有源电力滤波器[M].北京:科学出版社,2005.
- [6] 周林,张风,栗秋华,等.无锁相环 i_p, i_q 检测任意次谐波电流的新方法[J].高电压技术,2007,33(7):129-133.
- [7] 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.
- [8] 张国荣,王英.自适应神经网络在谐波电流检测中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(3):46-49.
- [9] 丁菊霞,张华俊,张秀峰.基于平均值理论的无锁相环单相电路谐波电流检测方法[J].电力系统保护与控制,2010,38(13):26-30.
- [10] 吕晓琴,张秀峰,章春军.无锁相环单相电路谐波及无功电流综合检测新方法[J].电力系统保护与控制,2010,38(6):45-48.
- [11] 周晴,毛亚辉,赵永彬.改进的无锁相环无低通滤波器的谐波检测方法[J].电测与仪表,2012(2):27-36.
- [12] Mzishra M K, Joshi A, Ghosh A. A new algorithm for active shunt filters using instantaneous reactive power theory [J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(12): 56-58.
- [13] Karimi H, Karimi-Ghartemani M, Reza Iravani M, et al. An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4):1350-1356.

