

一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法

周 波

(乐山电业局, 四川 乐山 614000)

摘 要:在电气化铁路中, 电力机车是一个运行的、急剧变化的单相牵引负荷, 当由其引起的电网电压波动较严重时, 可能导致检测方法中使用的锁相环处于失锁状态而无法进行准确检测。在有功电流分离法的基础上, 提出了一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法。理论分析和仿真证明, 该方法可以实时检测出单相电路谐波和无功电流, 原理简单、易于实现。

关键词:锁相环; 单相电路; 谐波; 无功电流; 实时检测

Abstract: In the electrification of the railway the electric locomotive is a running and sharp change in the single-phase traction load. When the voltage fluctuations caused by it are in a more serious situation, it could lead to the phase-locked loop used in the detection method in a state of losing lock that cannot be accurately detected. Based on the active current separation method, a detection method without phase-locked loop is put forward for single-phase circuit harmonic and reactive current. Theoretical analysis and simulation show that the method can detect real-time single-phase circuit harmonic and reactive current which is simple in principle and easy to achieve.

Key words: phase-locked loop; single-phase circuit; harmonic; reactive current; real-time detection

中图分类号: TM835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0041-03

在电气化铁道中, 电力机车是一个单相整流型牵引负荷, 三相不对称, 运行时对电网注入了大量的谐波电流, 从而引起电网电压、电流波形畸变, 供电质量恶化, 严重时甚至影响到电力系统的安全运行。

谐波与无功电流检测的方法有很多, 其基本原理是将单相电网电流进行分解, 用与电网电压同频同相的单位正余弦信号分别与电网电流相乘, 经过低通滤波器后得到电网电流中的瞬时基波有功电流和瞬时无功电流, 进而得到瞬时谐波电流。该方法算法简单, 硬件实现容易。

有功电流分离法中, 与电网电压同频同相的单位正余弦信号是用锁相环得到的。使用锁相环虽然可以得到电网电压的基频和初相角, 但也容易受到信号的影响^[2]。当电网电压波动较严重时, 较大的频率偏移会导致锁相环处于无锁状态而无法准确地进行相位跟踪, 从而难以得到与电网电压同频同相的单位正余弦信号, 也就无法准确地检测谐波和无功电流。

在有功电流分离法的基础上, 提出了一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法, 通过预先设定正余弦信号的频率和初相角, 从而不要锁相环就能准确检测出负载电流的谐波和无功分量。该方法实现了有功电流分离法的优点, 不受电压畸变的影响,

节省了锁相环电路, 算法简单, 容易实现。

1 无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测的基本原理

不失一般性, 假设电网电压无畸变, 令 $u_s(t) = U_s \cos \omega t$ 周期性非正弦电网电流用傅立叶级数展开为:

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \cos(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=3}^{\infty} I_m \cos(n\omega t + \varphi_n) \\ &= I_m \cos \varphi_1 \cos \omega t - I_m \sin \varphi_1 \sin \omega t + \sum_{n=3}^{\infty} I_m \cos(n\omega t + \varphi_n) = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \\ &= i(t) + i_h(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $i(t)$ 为瞬时基波电流; $i_p(t)$ 为瞬时基波有功电流; $i_q(t)$ 为瞬时基波无功电流; $i_h(t)$ 为瞬时谐波电流; φ_1 为基波电流 $i(t)$ 的初相角; φ_n 为各次谐波电流的相位角。

一般电网电流中都含有 3 次以上的谐波, 故上式中的 n 以 3 为下限。

式 (1) 中电网电流 i 可以测出, $\cos \omega t$ 是与电网电压同相位的正弦量。如果能够计算出 I_m 和 φ_1 , 就可算出基波有功和无功电流, 从而得到谐波电流。

由于电网电压电流基频都是 50 Hz 经过有源滤

波器补偿后也希望得到频率为 50 Hz 基频电流, 并且检测出的基频电流实际上也是 50 Hz 因此, 可以直接确定正余弦信号的角频率 $\omega = 2\pi f$ $f = 50$ Hz 相位角任意, 设为 θ 则正余弦信号分别为 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 。将上式两边同乘以 $\cos(\omega t + \theta)$, 则有:

$$i(t) \cos(\omega t + \theta) = I_m \cos(\omega t + \varphi_1) \cos(\omega t + \theta) + \sum_{n=3}^{\infty} I_{nm} \cos(n\omega t + \varphi_n) \cos(\omega t + \theta) = \frac{I_m}{2} [\cos(\theta - \varphi_1) + \cos(2\omega t + \varphi_1 + \theta)] + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{I_{nm}}{2} \{ \cos[(n+1)\omega t + \varphi_n + \theta] \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n - \theta] \}$$

其中, 直流分量为: $I_p = \frac{I_m}{2} \cos(\theta - \varphi_1)$ (3)

采用截止频率代于 2 倍电流基波频率的低通滤波器对 $i(t) \cos(\omega t + \theta)$ 进行滤波, 可得 I_p 。

同理, 将式 (1) 两边同乘以 $\sin(\omega t + \theta)$, 则有:

$$i(t) \sin(\omega t + \theta) = I_m \cos(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \theta) + \sum_{n=3}^{\infty} I_{nm} \cos(n\omega t + \varphi_n) \sin(\omega t + \theta) = \frac{I_m}{2} [\sin(\theta - \varphi_1) + \sin(2\omega t + \varphi_1 + \theta)] + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{I_{nm}}{2} \{ \sin[(n+1)\omega t + \varphi_n + \theta] \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n - \theta] \}$$

其中, 直流分量为:

$$I_q = \frac{I_m}{2} \sin(\theta - \varphi_1) \quad (5)$$

采用同样的低通滤波器对 $i(t) \sin(\omega t + \theta)$ 滤波, 可得 I_q 。

由式 (3) 与式 (5) 可推得:

$$I_m = 2 \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (6)$$

$$\varphi_1 = \theta - \arctg \frac{I_q}{I_p} \quad (7)$$

特殊地, 若假设 $\theta = 0^\circ$, 则:

$$\varphi_1 = \theta - \arctg \frac{I_q}{I_p} \quad (8)$$

综上, 只要任意给定一个相位角 θ 以正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 为参考, 由式 (7)、(8) 就可计算出 I_m 、 φ_1 , 从而可得基波有功电流、基波无功电流及谐波电流:

$$i_p(t) = I_m \cos \varphi_1 \cos \omega t \quad (9)$$

$$i_q(t) = -I_m \sin \varphi_1 \sin \omega t \quad (10)$$

$$i_h(t) = i(t) - i_p(t) - i_q(t) \quad (11)$$

由式 (3)~(11) 构造无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测原理图如图 1 所示。

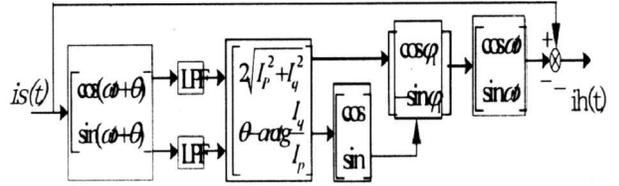


图 1 检测原理图

由图 1, 该检测方法节省了锁相环电路, 幅值和初相角的计算可以通过 DSP 实现, 因此使用乘法器、低通滤波器、加法器即可实现, 从而简化了硬件电路。

当电网电压发生畸变时, 综上, 仍以正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 为参考, 可求电网基波电压的初相角 φ_1 及基波电流的幅值 I_m 和初相角 φ_1 。特殊地, 若设 $\theta = 0^\circ$, 则:

$$\varphi_1 = -\arctg \frac{U_q}{U_p} \quad (12)$$

$$U_m = 2 \sqrt{U_p^2 + U_q^2} \quad (13)$$

$$u_p(t) = U_m \cos \varphi_1 \cos \omega t \quad (14)$$

$$u_q(t) = -U_m \sin \varphi_1 \sin \omega t \quad (15)$$

$$u_s(t) = U_m \cos(\theta + \varphi_1) + \sum_{n=3}^{\infty} U_{nm} \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (16)$$

$$I_m = 2 \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (17)$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{I_q}{I_p} \quad (18)$$

由此可得电网基波有功电流、基波无功电流及谐波电流:

$$i_p(t) = I_m \cos(\varphi_1 - \varphi_1) \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (19)$$

$$i_q(t) = -I_m \sin(\varphi_1 - \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (20)$$

$$i_h(t) = i(t) - i_p(t) - i_q(t) \quad (21)$$

2 仿真分析

2.1 电网电压无畸变的情况

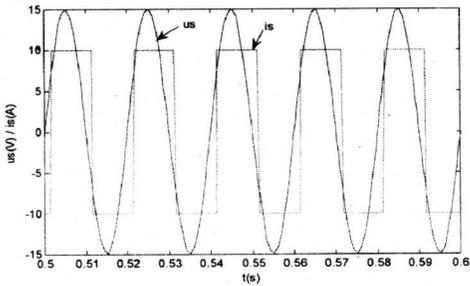
基于 Matlab/Simulink 针对上述检测方法进行了仿真。仿真中设电网电压无畸变, 负载为单相感性整流负载。电网电压 u_s 、电流波形 i 如图 2(a) 所示, i 为滞后电压 $\pi/6$ 的方波电流。仿真结果见图 2(b)、(c)、(d)、(e)。

2.2 电网电压有畸变的情况

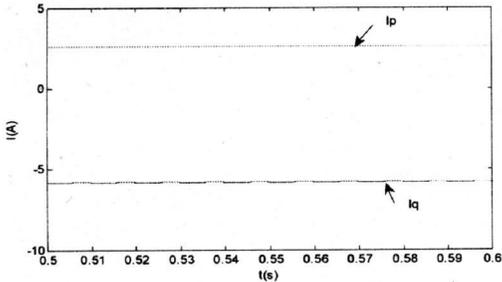
仿真中设电网电压发生了畸变,负载仍为单相感

后基波电压 $\pi/6$ 的方波电流。采用该检测方法的仿真结果如图 3(b)、(c)所示。

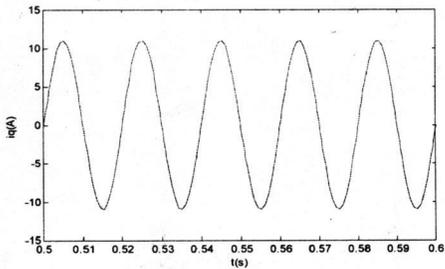
图 3(b)是基波电流的检测结果。图中两条曲线分别是基波电流理论值和检测值曲线。由图可见,大约 0.1 s 后两曲线重合,由此说明该方法能够实时、准确地检测电网基波电流。图 4(c)是对谐波电流的检测结果。



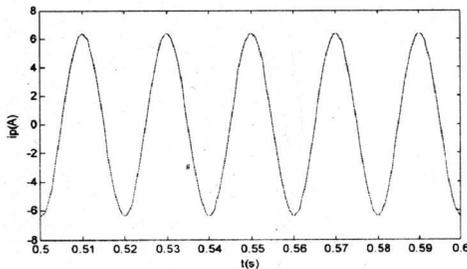
(a)电网电压、电流



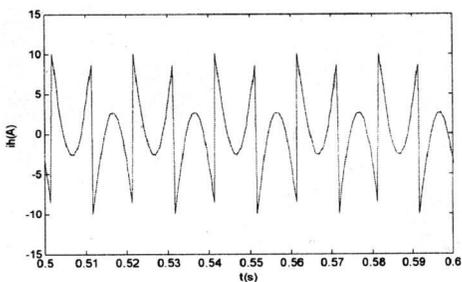
(b)通过低通滤波器得到的直流分量



(c)基波有功电流



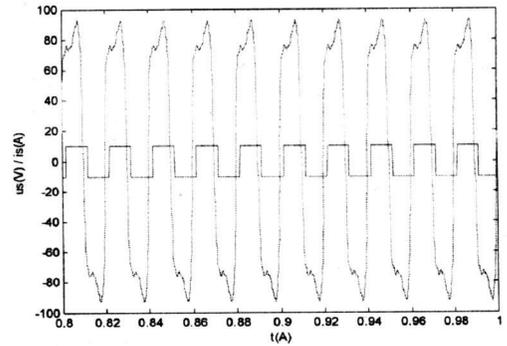
(d)基波无功电流



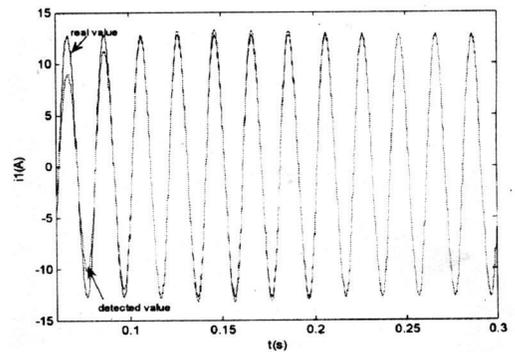
(e)谐波电流

图 2 电网电压无畸变时的仿真结果

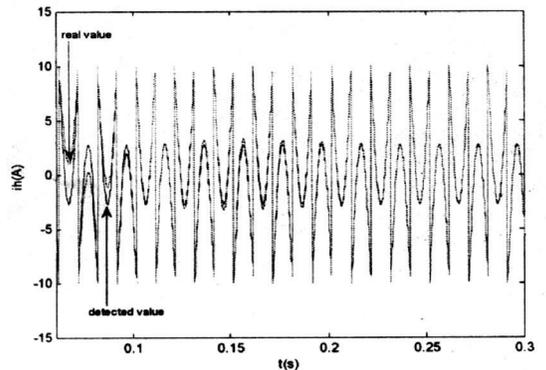
性整流负载。电网电压 u_g 、电流波形 i_g 如图 3(a)所示。电网电压 u_g 含有 3、5、7、9、11 次谐波, i_g 仍为滞



(a)电网电压、电流



(b)基波电流



(c)谐波电流

图 3 电网电压畸变无锁相环时的仿真结果

3 结 论

通过理论分析和仿真证明,所提出的无锁相环的
(下转第 60 页)

一个十分重要的课题。提出了一种自适应遗传—禁忌搜索 (IAGA—TS)混合算法,算法改进了文献 [5] 提出的 IAGA 算法,缩小了解搜索空间,加快算法寻优速度及鲁棒性,形成了一种快速、准确的 OPP 问题解决方法,算例仿真结果证明了该方法的有效性。

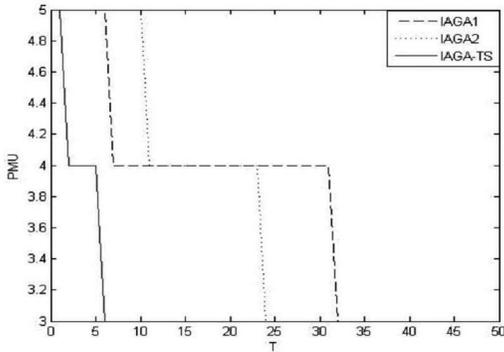


图 3 IEEE 14 节点系统仿真结果对比

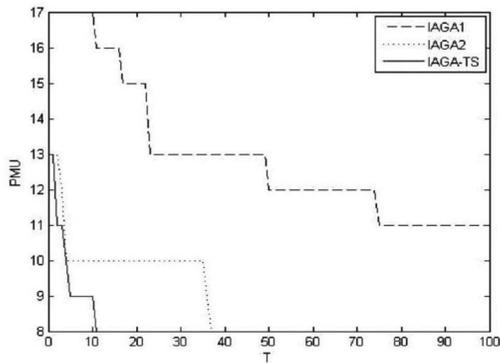


图 4 IEEE 39 节点系统仿真结果对比

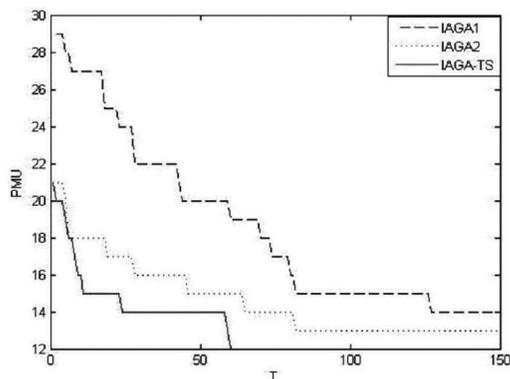


图 5 IEEE 57 节点系统仿真结果对比

参考文献

[1] 许树楷,谢小荣,辛耀中.基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44—49.

[2] Marin F J Garcia-Lagos F, Joya G, et al Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks [J]. IEEE electronics Letters 2003, 39(19): 1403—1405.

[3] Nuqiu R F, Phadke A G. Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2005, 20(4): 2381—2388.

[4] Baklwin T L, Mili L, Boisen M B, et al Power system observability with minimal phasor measurement placement [J]. IEEE Trans on Power Systems 1993, 8(2): 707—715.

[5] 沙明智,郝育黔,郝玉山,等.电力系统 PMU 安装地点选择优化算法的研究 [J]. 继电器, 2005, 33(7): 31—37.

[6] 李强,于尔铿,吕世超,等.一种改进的相量测量装置最优配置方法 [J]. 电网技术, 2005, 29(12): 57—61.

[7] Srinivas M, Patnaik LM. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics 1994, 24(4): 656—667.

[8] 王小平,曹立明.遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安交通大学出版社, 2000.

[9] A. H. Mantawy, Youssef L, Abdel-Magid, Shokri Z, Selim. Integrating Genetic Algorithms Tabu Search and Simulated Annealing for the unit commitment problem // IEEE Trans on Power Systems 1999, 14(3): 829—836.

[10] 王凌.智能优化算法及其应用 [M]. 清华大学出版社, 2001.

作者简介:

李新振 (1982—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度及其自动化。

滕欢 (1965—),女,高级工程师,长期从事电力系统调度自动化科研、教学及工程实践工作。

(收稿日期: 2008—12—15)

(上接第 43 页)

单相电路谐波检测方法,通过预设正余弦信号的基频和初相角,不要锁相环就能准确地检测出谐波和无功电流。该方法算法简单,硬件电路容易实现。

参考文献

[1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功补偿 [M]. 北

京:机械工业出版社, 1998: 209—238.

[2] 张厥盛,郑继禹,万心平.锁相技术 [M]. 西安电子科技大学出版社, 1994: 1—18.

(收稿日期: 2008—12—26)