

适用于电气化铁路的无功谐波电流检测方法研究

董祥, 李群湛, 黄军, 周晋

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 研究了两种适用于电气化铁路的无功谐波电流检测方法, 包括基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法和基于有功电流分离方法的无功谐波电流检测方法。给出了相应的检测原理及系统框图, 参考西南交通大学电气工程学院研发的BDC-5型牵引变电站电能质量监测系统测试的彝良变电所电能质量数据构造负载进行建模仿真, 这两种方法具有较高精度和较好的实时性, 在电气化铁路中推荐使用。

关键词: 检测方法; 电气化铁路; 谐波检测; 牵引供电系统

Detecting methods of reactive power and harmonic current in electrified railway systems

DONG Xiang, LI Qun-zhan, HUANG Jun, ZHOU Jin

(School of Electrical Engineering Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to detect the reactive power current and harmonic current in electrified railway systems, two detecting methods are proposed in this paper. There are methods based on function orthogonal characteristic and active current separate method. The corresponding detection systems are developed, and simulations based on power quality data of Yiliang traction which detected by BDC-5 traction substation power quality detecting system are performed which verify the feasibility of the methods proposed. With higher precision and the real-time performance, two methods are recommended in electrified railway systems.

Key words: detecting method; electrified railway; harmonic detection; traction power system

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0032-04

0 引言

电气化铁路采用工频交流 50 Hz 三相供电单相用电, 其负荷电力机车的功率大, 速度、负载状况变化频繁, 因此牵引电网具有功率因数低、谐波含量高、负序电流大的特点, 不但自身损耗大, 对公共电网及铁路沿线的设备也带来了严重的危害, 必须采取措施治理^[1]。

目前常用的固定容量并联电容器组和 LC 滤波器等无源设备, 不能根据负载情况灵活地调节补偿容量, 在使用中常出现过补偿和欠补偿, 无法有效解决现代化高速、重载机车带来的问题。静止无功发生器、有源滤波器等有源电能质量调节设备体积小、重量轻, 可以根据负载状况灵活调节补偿容量, 有源电能质量调节设备在电气化铁路系统中的应用逐渐成为发展趋势^[2]。为了提高有源电能质量调节器的性能, 必须研究迅速、准确的检测方法。

三相电路无功谐波电流检测最广泛应用的方法是基于一瞬时无功功率的检测方法^[3], 但三相无功功率理论不适用于像电气化铁路这样的单相供电系统, 本文针对两种适用于电气化铁路的无功谐波电流检测方法分别加以研究, 经过比较, 给出检测性

能相对较好的方法。

1 基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法

设电网电压为 $u_s = U_s \cos \omega t$, 而含有谐波的周期性非正弦电网电流可以用傅里叶级数表示为

$$i_s(t) = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) = \tag{1}$$

$$I_p \cos \omega t + I_q \sin \omega t + \sum_{n=3}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$$

式(1)左右两边同时乘以 $2\sin \omega t$, 并在一个周期内积分后, 取平均值, 则有:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_s(t) 2\sin \omega t dt = \frac{1}{T} \int_0^T [I_p \sin \omega t \cdot 2\sin \omega t + I_q \cos \omega t \cdot 2\sin \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \cdot 2\sin \omega t] dt = \tag{2}$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T I_p (1 - \cos 2\omega t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T I_q \sin 2\omega t dt +$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=2}^{\infty} I_n \left\{ \begin{matrix} \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n] \\ \cos[(n+1)\omega t + \varphi_n] \end{matrix} \right\} dt = I_p$$

把 I_p 乘以 $\sin \omega t$, 就是 $i_p(t)$, 故把式(2)左右两边同乘以 $\sin \omega t$, 即:

$$\left(\frac{1}{T} \int_0^T i_s(t) 2 \sin \omega t d\omega t\right) \sin \omega t = i_p \sin \omega t = i_p(t) \quad (3)$$

同理式(1)左右两边同时乘以 $2\cos \alpha$, 并在一个周期内积分取平均值, 则有:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T i_s(t) 2 \cos \omega t d\omega t &= \frac{1}{T} \int_0^T [I_p \sin \omega t \cdot 2 \cos \omega t + \\ I_q \cos \omega t \cdot 2 \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \cdot 2 \cos \omega t] d\omega t &= \quad (4) \\ \frac{1}{T} \int_0^T I_p \sin 2\omega t d\omega t + \frac{1}{T} \int_0^T I_q (1 + \cos 2\omega t) d\omega t + \\ \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=2}^{\infty} I_n \left\{ \begin{array}{l} \sin[(n+1)\omega t + \varphi_n] + \\ \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n] \end{array} \right\} d\omega t &= I_q \end{aligned}$$

把 I_q 乘以 $\cos \alpha$, 就是 $i_q(t)$, 故把式(4)左右两边同乘以 $\cos \alpha$, 即

$$\left(\frac{1}{T} \int_0^T i_s(t) 2 \cos \omega t d\omega t\right) \cos \omega t = i_q \cos \omega t = i_q(t) \quad (5)$$

根据运算过程, 能获得畸变电流中的任何电流分量^[4]。其电路见图 1 所示。

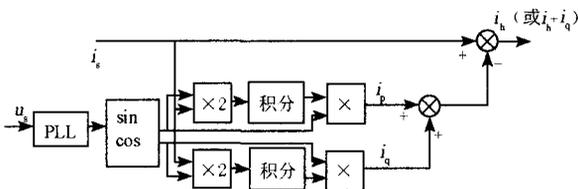


图 1 基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法检测框图

Fig.1 Block diagram of detecting method based on function orthogonal characteristic

2 基于有功分离的无功谐波电流检测方法

一般的电网瞬时电流 i_s 总可以分解为:

$$i_s(t) = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (6)$$

式中: $i_p(t)$ 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。

设电网电压为 $u_s = U_s \cos \omega t$, 而含有谐波的周期性非正弦电网电流可以用傅里叶级数表示, 即式(6)可进一步写成:

$$i_s = I_p \cos \omega t + I_q \sin \omega t + \sum_{n=3}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (7)$$

将式(7)的两边同乘以 $\cos \alpha$, 则有:

$$i_s(t) \cos \omega t = \frac{I_p}{2} (1 + \cos 2\omega t) + \frac{I_q}{2} \sin 2\omega t + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{I_n}{2} \{ \cos[(n+1)\omega t + \varphi_n] + \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n] \} \quad (8)$$

等式(8)中相当于直流分量的一项与 I_p 成比例, 采用截止频率低于 2 倍电流基波频率的低通滤波器可得到 $I_p/2$, 若使低通滤波器的增益扩大 1 倍, 可以使之输出 I_p , 这样可求出瞬时基波有功电流 $i_p(t) = I_p \cos \omega t$ 。

为了求瞬时基波无功电流, 可以在式(7)的两边同乘以 $\sin \alpha$, 可得:

$$i_s(t) \sin \omega t = \frac{I_p}{2} \sin 2\omega t + \frac{I_q}{2} (1 - \cos 2\omega t) + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{I_n}{2} \{ \sin[(n+1)\omega t + \varphi_n] - \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n] \} \quad (9)$$

式(9)中相当于直流分量的一项与 I_q 成比例, 采用同样的低通滤波器可以得到 I_q , 并求出瞬时基波无功电流 $i_q(t) = I_q \sin \omega t$ 。

从而得到瞬时谐波电流:

$$i_h(t) = i_s(t) - [i_p(t) + i_q(t)] = i_s(t) - i_f(t) \quad (10)$$

算法的框图见图 2。图中低通滤波器(LPF)对直流分量的增益为 2, 锁相环(PLL)用来产生与电压信号同相位的正弦信号, 这样当电压畸变时, 该检测算法也能准确地测出电网电流中的瞬时无功电流及瞬时谐波电流^[5]。

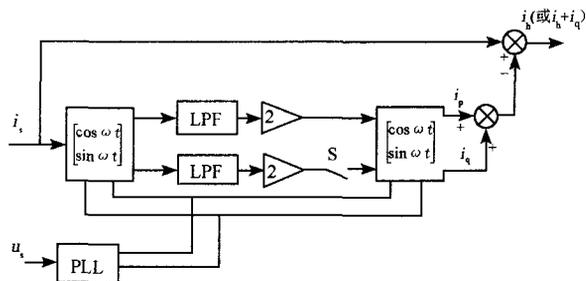


图 2 基于有功分离的无功谐波电流检测方法检测框图

Fig.2 Block diagram of detecting method based on active current separate method

3 仿真实验与结果

参考西南交通大学电气工程学院研发的 BDC-5 型牵引变电站电能质量监测系统测试的彝良变电所电能质量数据构造负载进行建模仿真, 其中电压电流均含有谐波 (电压畸变率为 1.425%), 取前 3、5、7 次谐波完成仿真。

以变压器次边 a 相馈线为例, 电压电流波形分别如图 3、4 所示。

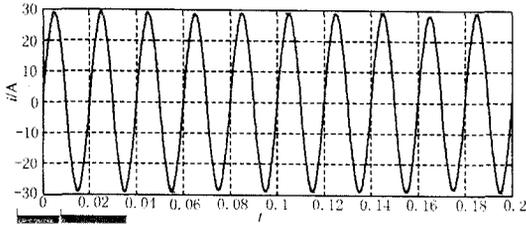


图3 变压器负荷侧 a 相电压

Fig. 3 Voltage of the load side of transformer of phase a

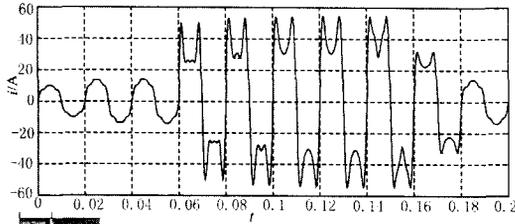


图4 变压器负荷侧 a 相电流

Fig. 4 Current of the load side of transformer of phase a

图5~7为基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法检测到的基波有功电流、基波无功电流以及谐波电流实际值和检测值对比图。

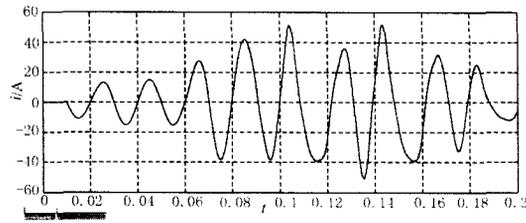


图5 基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法所检测的基波有功电流

Fig. 5 Fundamental active power current using detecting method based on function orthogonal characteristic

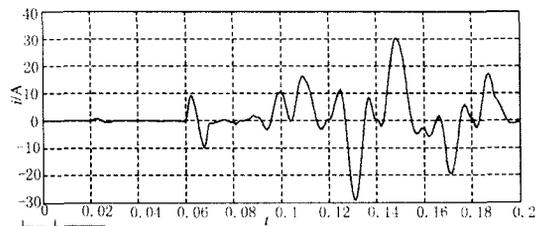


图6 基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法所检测的基波无功电流

Fig. 6 Fundamental reactive power current using detecting method based on function orthogonal characteristic

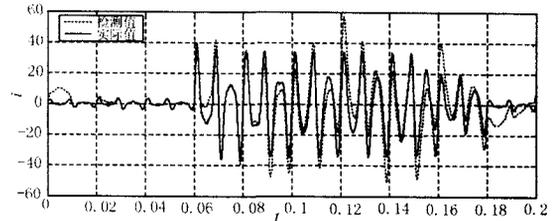


图7 基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法所检测谐波电流实际值和检测值

Fig.7 Actual value and measured value of harmonic current using detecting method based on function orthogonal characteristic

图8~10为用有功电流分离检测方法检测到的基波有功电流、基波无功电流以及谐波电流实际值和检测值对比图。

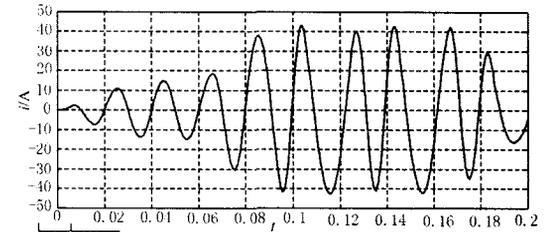


图8 基于有功分离的无功谐波电流检测方法所检测的基波有功电流

Fig. 8 Fundamental active power current using detecting method based on active current separate method

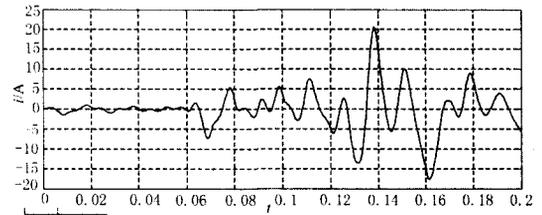


图9 基于有功分离的无功谐波电流检测方法所检测的基波无功电流

Fig. 9 Fundamental reactive power current using detecting method based on active current separate method

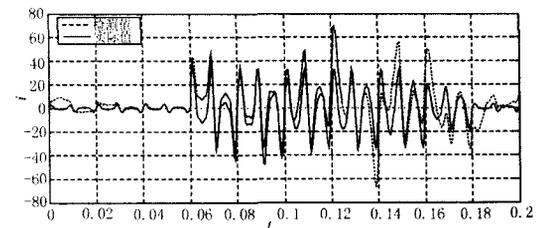


图10 基于有功分离的无功谐波电流检测方法所检测谐波电流实际值和检测值

Fig. 10 Actual value and measured value of harmonic current using detecting method based on active current separate method

4 结论

本文给出了两种适用于电气化铁路的无功谐波电流检测方法,这两种方法都可以分别检测出可以作为指令电流的基波有功电流、基波无功电流、谐波电流值,若将原理图中的基波无功电流检测支路断开,还可以检测得到基波无功电流和谐波电流之和。仿真是在电压和电流均畸变的条件下进行,故可以从仿真结果看出电压畸变对各种检测方法的检测结果的影响。

两种检测方法相比较可得如下结论:

a) 两种检测方法相对结构简单,基于有功分离法的检测方法与基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法相比包含低通滤波器,一定程度上会影响检测实时性。从仿真结果可以看出,基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法系统在半个周期后开始检测到各电流值,基于有功电流分离检测方法系统在1/4个周期后开始检测到各电流值。

b) 基于函数正交特性的无功谐波电流检测方法相对于第一种方法用两个积分器取代低通滤波器,不会由于滤波器的性能影响检测实时性。从仿真结果可以看出,相比基于有功分离法的检测方法检测精度较好。

两种检测方法结构有所差别,但均具有检测精度高,响应速度快的优点,在电气化铁路无功谐波电流检测方法的应用中推荐使用,也可以应用到其他单相电路无功谐波检测中。

参考文献

- [1] 李群湛.电气化铁道并联综合补偿及其应用[M].北京:中国铁道出版社,1993.
LI Qun-zhan. Shunt Reactive Power Compensation in Electrified Railway Systems[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993.
- [2] 安鹏,张雷,刘玉田.电气化铁路对电力系统安全运行的影响及对策[J].山东电力技术,2005,(4):16-19.
AN Peng, ZHANG Lei, LIU Yu-tian. Impact of Electrified Railway on Power System Security Operation and Countermeasures[J]. Shandong Electric Power, 2005, (4):16-19.
- [3] 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.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M].

Beijing: China Machine Press, 1998.

- [4] 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].高压技术,2007,33(3):163-166.
LU Xiu-ling, ZHANG Song-hua, CAO Cai-kai, et al. New Detecting Method for Harmonics and Reactive Currents in Single-phase Circuit[J]. High Voltage Engineering, 2007,33(3):163-166.
- [5] 蒋斌,颜钢锋,赵光宙.单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测新方法[J].电力系统自动化,2000,(6):35-39.
JIANG Bin, YAN Gang-feng, ZHAO Guang-zhou. A New Method for Real-time Detecting Approaches of Instantaneous Harmonic and Reactive Currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, (6):35-39.
- [6] Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning [J]. IEEE Trans on Ind App, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [7] Peng F Z, Kohata M, Akagi H. Compensation Characteristics of Shunt and Series Active Filters[A]. In: 1992 Chinese-Japanese Power Electronics Conf[C]. Beijing: 1992.
- [8] 戴瑜兴,张义兵,陈际达.检测单相系统谐波电流和无功电流的一种新方法[J].电工技术学报,2004,19(2):95-97.
DAI Yu-xing, ZHANG Yi-bing, CHEN Ji-da. A Novel Detection Approach to Harmonic and Reactive Currents of a Single-phase System[J]. Trans of CETS, 2004,19(2):95-97.
- [9] 耿云玲,王群.单相电路的一种谐波和无功电流实时检测方法[J].国防科技大学学报,2000,22(4):111-115.
GENG Yun-ling, WANG Qun. Real Time Detection Approach of Harmonic and Reactive Currents for Single-Phase Circuit [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000,22 (4):111-115.

收稿日期:2008-05-09; 修回日期:2008-06-24

作者简介:

董祥(1984-),女,硕士,研究方向为电能质量与控制;E-mail:dongxiang_08@126.com

李群湛(1957-),男,教授,博士生导师,从事电力系统分析、牵引供电理论及系统的综合补偿与优化设计等方面的教学和科研工作;

黄军(1983-),男,硕士,研究方向为电能质量与控制。