

谐波及无功电流检测方法的研究

陶 骏, 刘正之

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 从三相电路的综合矢量出发, 提出了一种适用性广、算法简单的谐波及无功电流检测方法。通过对检测算法中的低通滤波器选择原则的研究, 引入无功及谐波电流作为反馈信号, 补偿了低通滤波器的延时, 加快了检测的动态响应速度。仿真和实验结果证实了所提方法的有效性。

关键词: 谐波电流检测; 无功电流检测; 低通滤波器; 反馈

中图分类号: TM 71; TM 93

0 引言

近几年来, 有源滤波技术得到了快速发展, 它克服了传统无源滤波器过分依赖电网及元件参数、易于与电网发生谐振等缺点。为了使其具有较好的补偿性能, 谐波及无功电流的实时检测将是关键。

谐波及无功电流的检测若采用频域方法, 如利用窄带滤波器, 则会给检测结果带来附加相移, 导致波形失真, 同时也无法检测无功电流基波分量及负序分量。基于瞬时无功功率理论^[1]的检测方法具有较好的实时性, 但需进行 2 次坐标变换, 计算量较大。此外, 还有学者采用自适应滤波方法, 结合神经网络实现对谐波及无功电流的检测^[2,3]。由于这些方法实时性较差, 因此难以推广。

本文在三相系统综合矢量基础上, 建立了新的谐波及无功电流检测方法。通过对检测算法中低通滤波器的研究, 证明了滤波器的类型、阶数、截止频率对检测精度和动态响应速度有很大的影响。

1 检测算法的原理

在公共电网中, 电压的畸变往往很小, 研究中假定三相电压为对称正弦波。

在三相系统的综合矢量平面上, 获得电压综合矢量 $\vec{E}$ 和电流综合矢量 $\vec{I}$ 。三相基波有功电流构成的综合矢量应与 $\vec{E}$ 方向一致, 且幅值不变, 由此得到的三相电压瞬时值 (e_a, e_b, e_c) 与基波有功电流 (i_{ap}, i_{bp}, i_{cp}) 存在着下述关系:

$$\frac{e_a}{i_{ap}} = \frac{e_b}{i_{bp}} = \frac{e_c}{i_{cp}} = K \quad (1)$$

式中 K 为比例因子。

并且

$$\bar{P} = e_a i_{ap} + e_b i_{bp} + e_c i_{cp} \quad (2)$$

$$P = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (3)$$

式中 P 及 $\bar{P}$ 分别为三相瞬时有功功率及其直流分量^[1]。

由式(1)~式(3)得:

$$K = \frac{e_a^2 + e_b^2 + e_c^2}{\bar{P}} \quad (4)$$

$\bar{P}$ 可以根据三相电压及电流瞬时值间的作用, 由低通滤波器获得。因此, 可得:

$$\begin{cases} i_{aq} = i_a - i_{ap} \\ i_{bq} = i_b - i_{bp} \\ i_{cq} = i_c - i_{cp} \end{cases} \quad (5)$$

式中 i_{aq}, i_{bq}, i_{cq} 为三相瞬时无功及谐波电流。

严格地说, 所提检测方法基于瞬时无功功率理论的检测方法相比, 本质上是一致的, 但本方法略去了 2 次坐标变换, 简化了计算。

检测框图如图 1 所示。图 1 给出了谐波与无功电流全补偿的给定信号。若仅补偿基波无功(如各种静止无功补偿装置), 只需将参考电压变为滞后电网电压 90° 的量, 经过计算瞬时无功功率单元、低通滤波器(LPF)单元即可得到无功电流; 若仅补偿谐波(如有源滤波器), 只需在全补偿给定信号的基础上, 剔除基波无功电流即可。

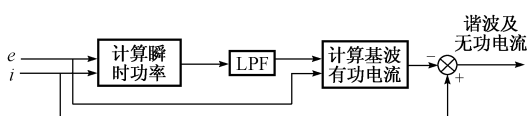


图 1 检测框图

Fig. 1 Block diagram of detecting

2 仿真与实验结果

采用 EMTP 程序对由六脉冲晶闸管相控变流

器构成的电流畸变系统进行仿真计算。图 2 给出了在稳态下,即固定的负载和晶闸管触发角,在 2 个电源周期中 A 相网侧的畸变电流、检测获得的谐波及无功电流和基波有功电流的仿真结果。

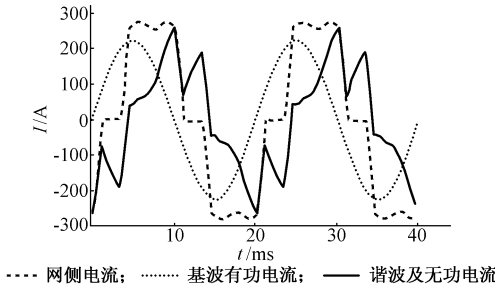


图 2 仿真结果
Fig. 2 Simulation results

利用图 3 所示的实验原理图进行实验。实验结果如图 4 所示。图 4(a)为负载和晶闸管触发角均不变时对应的稳态检测结果。可见,检测出的基波有功电流基本为正弦,谐波及无功电流和图 2 的仿真结果类似(实验负载的电感比仿真负载的电感小,两者的各电流波形略有差异)。图 4(b)为晶闸管触发角变化而导致负载电流发生突变时的动态检测结果。由基波有功电流波形可见,该方法具有较快的响应速度。

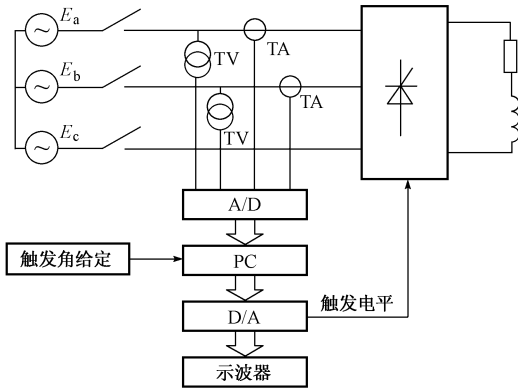


图 3 实验原理图
Fig. 3 Principle diagram of experiment

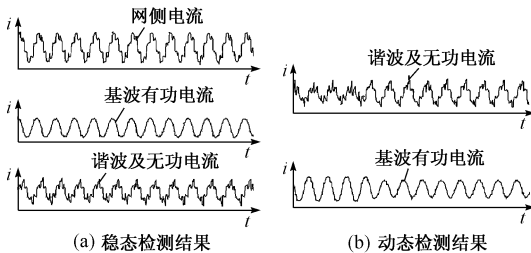


图 4 实验结果
Fig. 4 Experimental results

3 低通滤波器的选择原则

当今,随着高性能微处理器的发展(如 DSP),各种检测算法中数学运算占用的时间已微乎其微。这样,无论用模拟电路还是微处理器实现检测运算,其中计算延时与低通滤波器的固有延时相比可以忽略,故检测的动态响应速度主要决定于低通滤波器的固有延时^[4]。一般而言,滤波器的延时与检测精度是相矛盾的,因此设计时应兼顾考虑。

3.1 滤波器类型的选择

常用的滤波器有 Butterworth, Chebychew, Elliptic, Bessel 等几种。对相同阶数和截止频率的这几种低通滤波器的研究发现,从检测精度看, Elliptic 滤波器和 Chebychew 滤波器最好, Butterworth 滤波器次之, Bessel 滤波器最差;从动态响应速度看,依次是 Bessel 滤波器、Butterworth 滤波器、Chebychew 滤波器、Elliptic 滤波器。当截止频率选择得不太高时,由于 Butterworth 低通滤波器的频率特性在零点处最好,因此其检测精度已经能满足要求,并且从简化设计的角度出发,采用 Butterworth 低通滤波器比较合适。

3.2 滤波器截止频率的选择

从提高检测精度出发,希望滤波器的截止频率选择得越低越好,但这样会引起延时加大,使动态响应过程变慢。低通滤波器的任务是滤除瞬时功率中的交流分量,这些交流分量的频率一般比较高,如在六脉冲晶闸管相控交流电源中,理想情况下,最低频率的交流分量是 6 次谐波,因此,截止频率选择过低,意义并不大。此外,截止频率过低时,若用数字滤波器实现,会使滤波器参数相差倍数过大,从而使计算机运算时的截断误差增大,反而影响了精度。一般,截止频率选择在 20 Hz 左右,就可以满足要求。

3.3 滤波器阶数的选择

滤波器的阶数越高,检测精度越高,但动态响应速度会越慢。若用数字滤波器实现,会使计算量增加,进一步加大检测延时;若用模拟器件实现,则会增加元件数目和实现费用。实际中,综合考虑谐波电流的检测精度、动态响应过程及可实现性,一般选择二阶滤波器就能满足要求。

由此可见,采用截止频率为 20 Hz 的二阶 Butterworth 滤波器具有较好的检测效果。

4 检测算法的改进

虽然本文给出的检测算法具有较快的响应速度,但对于动态负荷的检测,仍难以胜任。为了进一步提高动态响应速度,引入检测结果(谐波及无功电

流)作为反馈信号,改进后的检测框图如图 5 所示。

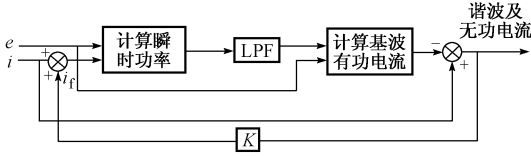


图 5 改进的检测框图

Fig. 5 Block diagram of modified detecting method

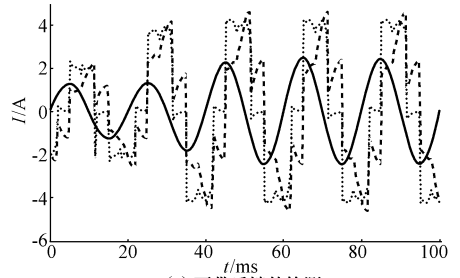
稳态时,图 5 中的反馈量 i_f 将完全是无功和谐波成分,它与电压 e 作用产生的瞬时功率是交流分量,可被 LPF 滤除,因此不会影响稳态精度;暂态时,反馈量 i_f 将含有基波有功分量,它与电压作用产生的瞬时功率通过 LPF 后,得到一附加的直流量,这个直流量对单纯由网侧的电压、电流作用产生的直流量起补充作用,缩短了动态响应时间。

当基波有功电流(有效值)增大时,由于低通滤波器的延时作用,检测出的基波电流不能迅速跟踪实际值,在一段时间内,基波的检测结果要比实际值小。这样,输出的谐波及无功电流中含有与系统基波有功电流同相位的成分,它们与电压相互作用,并通过低通滤波器后,使瞬时功率的直流分量有所增大。由式(1)和式(4)可知,检测出的基波有功分量将有所增大,从而补偿了过渡过程中的检测误差,加快了动态响应速度。同样,当基波有功电流(有效值)减小时,过渡过程中输出的谐波及无功电流中含有与系统基波有功电流反相位的成分,由此使检测出的基波有功分量迅速衰减,补偿了低通滤波器的延时。

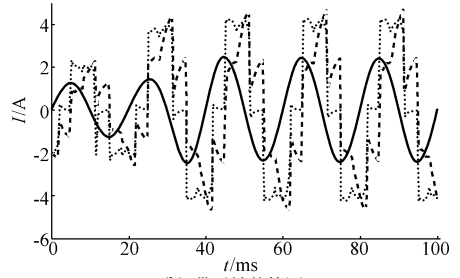
图 6 为检测算法改进前后的 EMTP 仿真结果,仿真仍为由六脉冲晶闸管相控变流器构成的电流畸变系统,其电流在 20 ms 发生突变(采用了改变负载的办法)。根据基波电流波形的变化,可以看出不带反馈的检测动态响应时间需 30 ms 左右,带反馈的方法只需 10 ms 左右。可见,引入反馈后,获得了更好的检测效果。

5 结语

本文根据三相系统的综合矢量,建立了一种谐波及无功电流检测方法,该方法可以检测出包括基波无功电流、零序电流、基波负序电流及谐波电流在内的所有有害电流。同时通过引入谐波及无功电流的反馈改进检测方法,可进一步提高响应速度,改善检测效果,使该方法更适合对动态系统谐波电流的快速检测。仿真与实验结果验证了算法的正确性和可行性。



(a) 不带反馈的检测



(b) 带反馈的检测

--- 谐波及无功电流; — 基波有功电流; 网侧电流

图 6 改进前后的检测算法的检测效果

Fig. 6 Results of the modified detecting method and non-modified detecting method

参考文献

- 1 Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components. IEEE Trans on IA, 1984, 20(3): 625~630
- 2 王 群, 吴 宁, 谢品芳 (Wang Qun, Wu Ning, Xie Pinfang). 一种基于神经元的自适应谐波电流检测法 (A Neuron-Based Adaptive Approach to Detection of the Harmonic Currents). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10): 13~10
- 3 周维维, 江泽佳, 吴 宁 (Zhou Louwei, Jiang Zejia, Wu Ning). 基于补偿电流最小原理的谐波及无功电流检测方法 (A Detecting Approach of Harmonic and Reactive Currents Based on the Minimum Compensated Currents). 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 1998, 13(3): 33~36
- 4 余健明 (Yu Jianming). 瞬时谐波电流检测方法的动静态特性分析 (Analysis of Static and Dynamic Characters of Instantaneous Harmonic Current Detecting Method). 电力电子技术 (Power Electronics), 1999, 33(2): 15~17

陶 骏, 男, 博士研究生, 主要从事电网无功补偿及谐波抑制方面的研究。

刘正之, 男, 研究员, 博士生导师, 曾为德、英、韩等国聚变研究所访问学者, 长期从事高功率脉冲电源及聚变工程的研究。

