

并联型有源电力滤波器电流控制的等效原理

王广柱

(山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061)

Equivalence Principle of Current Control for Shunt Active Power Filters

WANG Guang-zhu

(Electrical Engineering School, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

ABSTRACT: Two main types of schemes are used in shunt Active Power Filters (APF) control: the conventional control scheme which is based on detecting and calculating the harmonic and reactive currents of nonlinear loads, and the direct ac main current control scheme which does not require the harmonic and reactive currents to be sensed and computed. This paper analyzes and demonstrates the inherent relations between the two types of control schemes and concludes that they are equivalent for current control. A new control scheme based on this conclusion is proposed and discussed, and the harmonic and reactive currents signal calculated in a conventional APF is found to behave as just a feed-forward signal in the proposed APF control scheme. An in-depth analysis shows that the proposed control scheme is a low-cost but high-performance solution for power quality control, and that this scheme needs only one ac current sensor to sense the ac main current, and one dc voltage sensor to sense the dc capacitor voltage. A prototype was developed to demonstrate the performance of the proposed APF and the finding are well supported by the experimental results.

KEY WORDS: power electronics; active power filter; equivalence principle; current control; harmonic and reactive currents

摘要: 详细分析和论证了基于负载谐波与无功电流检测的并联有源电力滤波器(APF)和基于电源电流直接控制的APF控制方式之间的内在联系, 得出二者在电流控制上等效这一重要结论。给出基于上述等效原理的APF新型控制方案, 该方案是在传统方案基础上, 省掉负载和APF电流检测单元以及谐波及无功电流或基波有功电流运算单元。分析了该方案与传统控制方案之间的关系, 结果表明: 传统控制方案中的谐波及无功电流检测信号只是APF直流侧电容电压闭环控制前向通道中的一个前馈信号。基于新方案制作了一台单相APF实验样机, 实验结果验证了该文结论和所提方案的正确性和有效性。

关键词: 电力电子; 有源电力滤波器; 等效原理; 电流控制; 谐波及无功电流

0 引言

1976年, Gyugyi等人提出了采用PWM(pulse width modulation)控制变流器构成的有源电力滤波器(active power filter, APF)^[1], 确立了APF的完整概念和主电路拓扑结构。特别是20世纪80年代以来, 由于新型电力半导体器件的出现, 以及日本学者赤木泰文(H. Akagi)的基于瞬时无功功率理论的谐波瞬时检测方法的提出^[2], APF得以迅速发展。至今为止, APF仍然是电力电子技术领域中的研究热点之一。

对并联型APF的研究, 大都集中在谐波或无功电流检测算法上^[3-12], 该领域是传统APF控制方式的重点研究内容。而采用电源电流直接控制的APF控制方式, 因其具有不需要检测和计算负载中谐波及无功电流等一系列优点, 正逐渐引起人们的兴趣^[13-14], 在文献[15]中也研究了这种控制方式。然而, 却很少有报道提及采用电源电流控制和传统的APF电流控制之间的联系和区别, 这正是本文将要论述的内容。

本文从传统APF控制方式出发, 论证了电源电流控制方式与传统的APF控制方式在电流控制上完全等效, 并且给出了基于该等效原理的新型APF控制方案, 分析了该方案与传统方案之间的联系。

1 有源电力滤波器的补偿等效原理

图1是并联型APF的基本原理框图。其谐波源负载中含有基波有功电流 i_{Lr} 、谐波及无功电流 i_{Lh} 。当APF输出一个与电流 i_{Lh} 相反的电流 i_c 时, 则电

源电流 i_s 中就仅包含负载电流中的基波有功分量 i_{Lf} 。这就是传统 APF 谐波补偿原理。上述原理可用如下的一组公式描述：

$$i_s = i_L + i_c \quad (1)$$

$$i_L = i_{Lf} + i_{Lh} \quad (2)$$

令 $i_c = -i_{Lh} \quad (3)$

则 $i_s = i_{Lf} \quad (4)$

显然，APF 的关键问题是如何实时、准确的检测出负载中的谐波及无功电流。

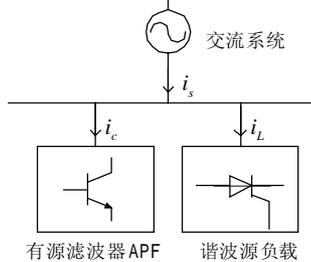


图 1 APF 谐波补偿原理框图

Fig. 1 Harmonic currents compensation for APF

然而，和上述原理等效的方式是将式(3)和式(4)顺序颠倒，即，如果控制电源电流 i_s 为负载电流基波有功分量 i_{Lf} ，则 APF 的输出 i_c 自然就是补偿的谐波电流 i_{Lh} 。与传统方式不同的是，该原理不用检测负载中的谐波电流，只需检测负载电流的基波成分 i_{Lf} 。而事实上，由于 APF 直流侧电压仅由电容器维持，在稳态时 APF 只能吸收或发出谐波或无功电流（这里忽略了 APF 本身的损耗），并且其最终的控制目标是使电源电流为基波有功电流，这样，电源电流的指令电流的相位关系可由电源电压决定，其幅值可由 APF 直流侧电压闭环控制器的输出决定，因此根本无需检测负载的基波电流 i_{Lf} 。

总之，采用这种等效的补偿原理，可避免谐波及无功电流检测和计算所带来的一系列麻烦。但问题的关键是：电源电流是否可控？其控制与传统的 APF 输出电流控制之间有无内在联系？

2 APF 电流控制与电源电流控制等效性

大家知道，APF 本身并不是一个线性滤波器，它可以看作成一个由功率开关电路组成的脉冲电压功率放大电路，其输出通过电感与交流电压源相连，因此其输出电流中总会含有开关电流误差成分，这种误差是 APF 固有的，不可能被消除，它与开关频率、电路参数、电源电压以及直流侧电压等有关。设

$$i_c = i_c^* + \Delta i_c \quad (5)$$

$$i_s = i_s^* + \Delta i_s \quad (6)$$

式中 i_c 、 i_c^* 和 Δi_c 分别为 APF 输出的实际电流、指令电流和 i_c 中的开关误差电流； i_s 、 i_s^* 和 Δi_s 分别为交流电源实际电流、指令电流和 i_s 中的开关误差电流。

图 2 是典型的传统控制方式 APF 原理示意图。

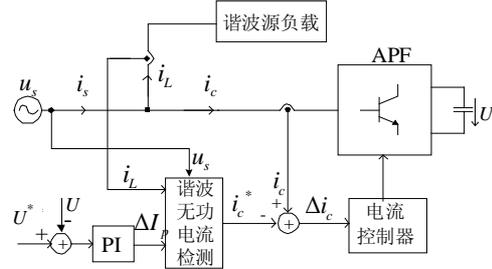


图 2 传统 APF 控制原理框图

Fig. 2 Conventional control scheme of APF

图中，APF 直流侧电容端电压 U 采用闭环控制， U^* 为其设定值（ U^* 大于电源电压 u_s 之峰值）。这里电压控制器假设为比例-积分(PID)调节器，其输出 Δi_p 代表 APF 有功电流调节量； i_c^* 表示由谐波及无功电流检测单元运算的 APF 电流指令值，APF 的 PWM 开关信号由电流误差值 Δi_c 通过电流控制器产生。为了便于比较，假设谐波及无功电流检测单元为理想单元，并且 APF 没有功率损耗，即检测单元的输出完全等于负载 i_L 中的谐波及无功电流成分，即 $i_c^* = -i_{Lh}$ ，稳态时有功调节量 $\Delta i_p = 0$ 。电流控制器有滞环控制法、三角波比较法、及抛物线法^[16]等多种方法，不失一般性，这里采用抛物线法电流控制器。图 3 是 APF 的仿真结果。图中，电流 i_s^* 表示负载电流 i_L 的基波有功电流； i_c^* 表示负载电流 i_L 的谐波及无功电流的负值，因此有

$$i_s^* = i_{Lf} = i_L - i_{Lh} = i_L + i_c^* \quad (7)$$

图 4 是图 3 在时间为 1.7ms 左右的局部放大图，从图中可以看出一种有趣的现象，那就是电源电流开关误差与 APF 电流开关误差相等，即

$$\Delta i_s = \Delta i_c \quad (8)$$

如果上述关系成立，则 APF 电流误差 Δi_c 就可以采用另外一种方法获得，即可以用电源电流误差 Δi_s 取代它。

其实，上述关系式(8)并不难得到证明：将式(5)和(6)代入式(7)，得

$$i_s = i_L + i_c + (\Delta i_s - \Delta i_c) \quad (9)$$

根据图 1，显然有式(8)成立。

这说明，可以不用通过获得 APF 指令电流值 i_c^*

和检测 APF 电流 i_c 的办法来得到电流误差 Δi_c ，而可由电源电流指令值 i_s^* 与电源电流检测值 i_s 之差得到。因此，只要传统 APF 控制方式的 APF 电流 i_c 可控，则电源电流 i_s 就可控，并且只要采用相同的电流控制器，传统 APF 电流控制和电源电流控制这两种方式，其控制效果也就相同，因为二者电流控制器的输入实际上是同一个量。这就说明二者在电流控制上是等效的。

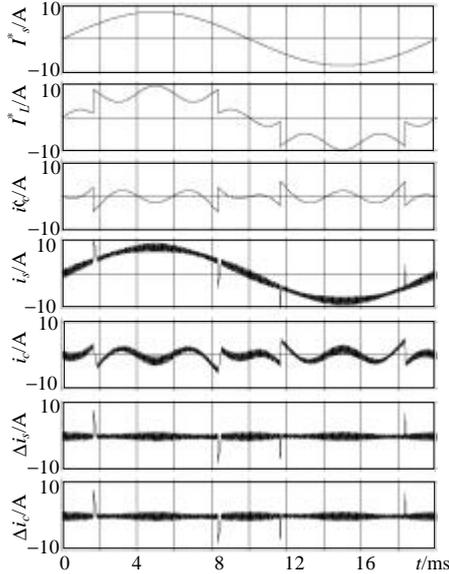


图3 传统 APF 的理想补偿波形

Fig. 3 Theoretical compensation results of conventional APF

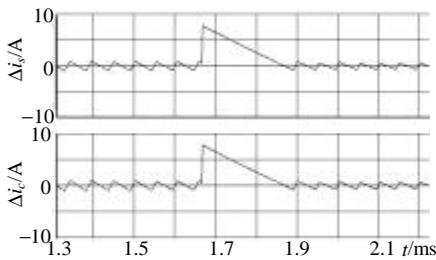


图4 图3的局部放大波形

Fig. 4 Local zoom in for Fig. 3

在传统的 APF 电流控制中，控制比较直观，意义明确，因为被控量直接是 APF 的输出，而用 Δi_s 控制 APF 跟踪指令电流 i_s^* 时，表面上看被控量还是 APF 的输出电流而与电源电流 i_s 无关，但实际上，二者有着内在的联系。虽然 i_c 和 i_s 的变化量或变化方向可能不同，但二者各自的开关误差 Δi_c 和 Δi_s 却始终相同。

3 基于电流控制等效原理的 APF 系统

基于上述电流控制等效原理的新型 APF 系统原理如图 5 所示。图中，经 SIN 单元后， S 为与电源

电压 u_s 同频同相的单位幅值的正弦信号，或者 S 为单位幅值的电源电压信号，直流侧电压闭环 PI 调节器的输出 I_s^* 乘以 S 作为电源电流的指令信号 i_s^* (i_s^* 是正弦波信号，而 I_s^* 是它的幅值)，APF 电流控制器的输入为电源电流开关误差 Δi_s 。

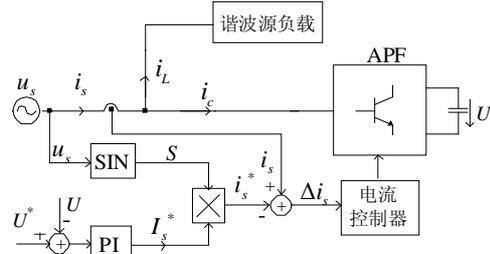


图5 基于电流控制等效原理的新型 APF 控制方案
Fig. 5 Proposed control scheme of APF based on the equivalence principle of current control

该方案特点是：

(1) 保留了传统 APF 方案^[11-12]中的电流控制器和直流侧电容电压闭环控制器，而且可取与传统 APF 方案相同的控制参数，只是将电流控制器的输入用 Δi_s 取代了 Δi_c ，这是本方案的关键点；

(2) 电源电流指令值 i_s^* 可以通过检测负载中的基波有功电流获得（大部分谐波及无功电流检测方法也都是采用从负载电流中减去其获得的基波有功电流的方法），也可直接通过检测电源电流获得^[12]，而本方案充分利用 APF 直流侧电容电压的闭环控制作用，直接得到电源的有功电流信息，即电源有功电流分量幅值 I_s^* 。其控制原理可定性分析如下：

1) 当 APF 直流侧电容电压 E 低于其设定值 E^* 时，其电压 PI 调节器输出 I_s^* 会增加，经乘法器后电源电流参考指令值 i_s^* 相应增加，电流控制器控制 APF 使电源电流 i_s 跟踪 i_s^* ，因此导致 APF 电流 i_c 中含有多余的有功电流成分，而对直流侧电容充电，导致电压 E 上升。反之亦然。

2) 当负载电流 i_L 中有功电流分量增加时，由于电源电流 i_s 还未来得及做出调整，因此 i_L 中增加的这一部分有功电流分量将由 APF 电流 i_c 提供，而使直流侧电容放电，导致电压 E 降低，接下来的控制过程同步骤 1)。

3) 当负载 i_L 中的基波无功电流变化时，对 I_s^* 无影响或影响不大，因为无功电流对直流侧电容的充放电在半个电源周期内平衡，只要 PI 调节器中的滤波环节设计得当就可滤除这种等于或高于 2 倍电源频率的电压波动，使其输出 I_s^* 不受影响。

4) 当负载 i_L 中的谐波电流变化时, 有 2 种情况: ①电源电压为基波正弦波, 即电源电压无畸变, 在这种情况下, 负载 i_L 中的谐波电流表现为无功电流; ②电源电压中含有与负载 i_L 中的谐波电流同频的谐波成分, 在这种情况下, 负载 i_L 中的谐波电流可分解为谐波有功和无功电流, 其谐波有功电流部分波动会导致 PI 输出 I_s^* 相应变化, 而谐波无功部分对 I_s^* 没影响或影响不大。

总之, 进入/流出 APF 的有功电流会影响 I_s^* , 而无功电流则不影响 I_s^* 或影响较小。

4 新型控制方案与传统控制方案的关系

在图 2 所示的传统 APF 控制方案中, 现有的谐波及无功电流检测方法^[2-12]都是先计算基波有功电流, 然后与负载电流相减获得谐波及无功电流, 因此图 2 可改画为如图 6 所示。图 6 中虚线框内部分表示图 2 的谐波及无功电流检测单元, SIN 单元和

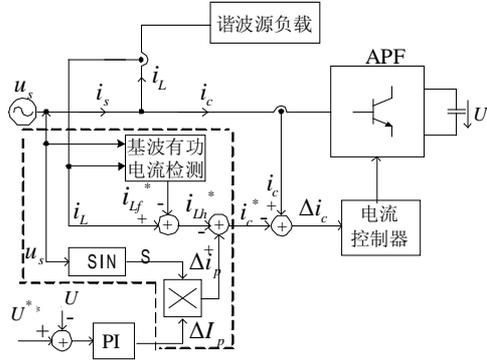


图 6 传统 APF 等效控制原理框图

Fig. 6 Equivalent conventional control scheme of APF

S 的功能与图 5 相同, S 与 APF 直流侧电容电压闭环 PI 调节器输出 ΔI_p 的乘积 Δi_p 表示 APF 吸取或发出有功电流的调节量, 与谐波检测单元获得的谐波及无功电流分量 $-i_{Lh}^*$ 叠加后作为 APF 电流参考指令值 i_c^* , 即

$$i_c^* = -i_{Lh}^* + \Delta i_p \quad (10)$$

以及

$$i_s^* = i_{Lf}^* + \Delta i_p \quad (11)$$

其中 i_{Lf}^* 为负载电流 i_L 中基波有功分量的运算值, 则 $i_{Lh}^* = i_L - i_{Lf}^*$ 。

对图 6 进行方块图变换, 可得图 7(a), 综合变换后为图 7(b), 最终图 6 可变换为图 8。显然, 图 8 与图 5 的区别在于图 8 中多出了虚线框内的基波有功电流检测部分。从控制的角度来看, 负载有功电

流的波动可以看作是 APF 直流侧电容电压控制闭环内的一个扰动信号, 而 APF 传统控制方式中的基波有功电流检测信号 i_{Lf}^* 可看作是电容电压闭环内的一个前馈信号, 因此, 稳态上两种方案完全等效。由于传统控制方式比新型方案多了一级负载基波有功电流前馈信号, 这使得理论上传统方式在动态响应速度上要优于新型方案。如果假设基波有功电流检测为一个无延时和无误差的理想单元, 即 $i_{Lf}^* = i_{Lf}$, 则传统方案将具有极高的动态响应速度。然而, 现有的基波有功电流检测算法都有低通滤波特性, 即频率带宽是有限的, 如果其带宽与 PI 调节器的控制带宽在一个数量级上, 那么 i_{Lf}^* 的前馈作用将十分有限, 此时两种方案在动态上也就差别不大。因此, 动态响应速度的提高程度取决于基波有功电流检测算法。

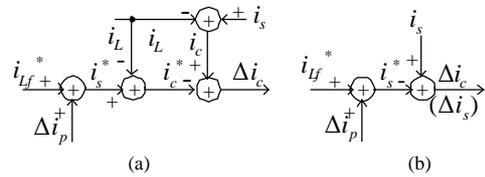


图 7 传统 APF 控制方案的方块图变换

Fig. 7 Block diagram transformation of conventional APF

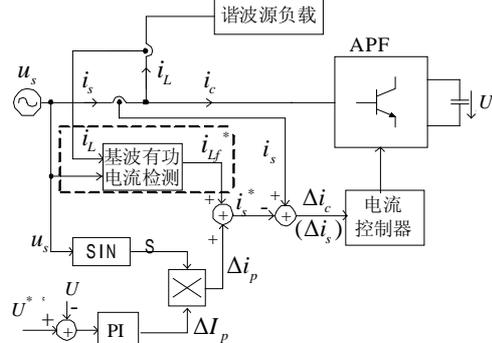


图 8 传统 APF 控制方案与新方案的关系

Fig. 8 Relation between the conventional and the proposed scheme of APF

另一方面, 如果 APF 对负载有功电流波动的动态响应速度有限, 则说明在动态过程中, 有一部分负载有功电流需暂时由 APF 提供或吸收, 这相当于 APF 对负载有功电流的波动起到了部分缓冲作用, 这对电网事实上是有好处的^[13]。因此, 虽然新型方案在动态响应速度上可能不及传统方案, 但这丝毫不会降低它的滤波性能。

5 实验研究

为了简单, 采用新型方案设计和制作了一台单相 APF 实验样机。其中, APF 主电路采用 IPM 模

块 PM20CSJ060, 其直流侧电容为 $1000\mu\text{F}/450\text{V}$ 铝电解电容, 交流侧串联电感约为 4mH , 交流电源采用单相 $220\text{V}/50\text{Hz}$ 市电 (采用调压器和隔离变压器隔离), 并联一个低通滤波器 (由电容与电阻串联组成, 其作用是与变压器等效漏抗组成低通滤波器, 滤除电源电流中的开关频率成分, 该电路必须放置在电流互感器与电源之间, 否则会严重影响系统性能) 后, 再通过霍尔电流互感器与电感相连。非线性负载由一个直流侧带感性负载的单相晶闸管全桥整流电路和一个直流侧带电容滤波负载的单相二极管整流电路组成。APF 直流侧电容电压参考值设定为 400V 。由于本方案不需要谐波及无功电流检测电路和算法, 因此仅仅采用了由运算放大器组成的带低通滤波的 PI 调节器闭环控制电路。与电源电压同相的标准正弦波信号采用由锁相环 CD4046、计数器 CD4040、EPROM2764、D/A 转换器 DAC0832 等组成的数字合成电路产生, 其中 EPROM 存放一个周期的正弦波离散数据, D/A 转换器输出标准正弦波信号 i_s , 其幅值由 PI 调节器输出信号 I_s^* 连接 D/A 转换器的参考电压 U_{ref} 进行控制。电流控制器采用了抛物线法 PWM 电流控制器^[16], 该控制器除具有和滞环控制同样的快速性和鲁棒性外, 其开关频率基本保持恒定。本系统中开关频率预设为 20kHz , 电路全部由硬件电路组成。

图 9(a)和(b)为 APF 带负载(晶闸管触发角为 10°) 启动时的电源电压、电源电流(开关频率滤波前后)、负载电流、APF 输出电流以及直流侧电容电压波形。从图可以看出, APF 直流侧电压从其初始值(约为电源电压峰值)上升直到其设定值(400V), 在此期间直流侧电容需要一定的有功电流对其充电, 故电源电流要大于负载电流的有功分量。图 9(c)为系统空载而 APF 正常运行中突加晶闸管整流负载时的各信号波形; 图 9(d)为系统带二极管整流负载而 APF 正常运行时, 突加晶闸管整流负载时的各信号波形。可以看出, 在负载投入瞬间的第一个电源周期内, 电源不能马上提供负载电流, 而由 APF 提供部分有功电流, 导致直流侧电容放电而电压下降。

在上述几种情况下, APF 控制都有一定的暂态过程, 在该过程中, 电源与 APF 之间存在一定的有功交换, APF 对负载的变化起到一定的缓冲作用。电源电流除幅值不能快速跟踪负载电流外, 其相位始终与电源电压同相位, 并且基本为正弦波, 因此

这并不影响 APF 补偿的效果。

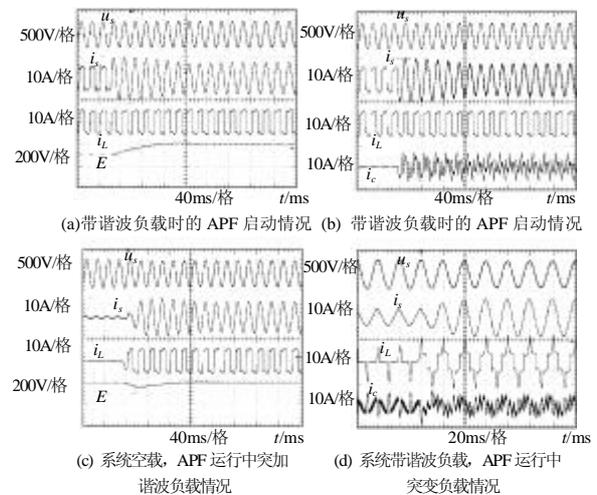


图 9 基于新型电流控制原理的 APF 实验波形

Fig. 9 Experimental results of APF based on the proposed control scheme

6 结论

要补偿负载中的谐波或无功, 就要首先检测负载电流中的谐波及无功电流, 并将其作为 APF 输出电流指令值, 然后控制 APF 输出跟踪该指令电流, 达到 APF 补偿谐波或无功的目的。自从有源电力滤波器(APF)诞生以来, 这种方式就被认为是并联型 APF 最基本的控制方式, 一直被人们研究和应用。本文通过分析和实验证明: 采用电源电流直接控制与上述传统 APF 控制在电流控制上是等效的, 并且基于该等效原理的新型 APF 控制方案与传统控制方案具有几乎相同的补偿效果, 而新型控制方案不需要检测负载电流和 APF 输出电流, 也不需要通过复杂的算法计算谐波及无功电流或基波有功电流。因此本文提出的基于电流控制等效原理的新型 APF 控制方案比传统 APF 控制方式简单和优越得多。

参考文献

- [1] Gyugyi L, Strycula E C. Active ac power filters[C]. IEEE/IAS Annual Meeting, Chicago USA, 1976.
- [2] Akagi H, Kanazawa Y, Nanae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits[C]. IEEE&JIEE Proceedings IPEC. Tokyo, Japan, IEEE, 1983.
- [3] Soares V, Verdelho P. An instantaneous active and reactive current component method for active filters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2000, 15(4): 660-669.
- [4] Mishra 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.

- [5] Luo Shiguo, Hou Zhencheng, An adaptive detecting method for harmonic and reactive currents[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1995, 42(1): 85-89.
- [6] Wang Qun, Wu Ning, Wang Zhaoan. A neuron adaptive detecting approach of harmonic current for APF and its realization of analog circuit [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(1): 77-84.
- [7] Lai L L, Chan W L, Tse C T, et al. Real-time frequency and harmonic evaluation using artificial neural networks[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(1): 52-59.
- [8] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于空间矢量的基波正序、负序分量及谐波分量的实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 1-5. Zhang Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Study and simulation of real time detecting method for fundamental positive sequence, negative sequence components and harmonic components based on space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 1-5(on Chinese).
- [9] 孙驰, 魏光辉, 毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 43-48. Sun Chi, Wei Guanghui, Bi Zengjun. Detection for reactive and harmonics currents of unbalanced of three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 43-48(on Chinese).
- [10] 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, 22(1): 80-84. Dai Chaobo, Lin Haixue, Lei Linxu. A study of the comparison of two harmonic current detecting methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 80-84(on Chinese).
- [11] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 基于瞬时无功功率理论的四相输电谐波电流检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 12-17. Li Shengqing, Zhu Yinghao, Zhou Youqing, et al. Four-phase transmission harmonic current detection method based on instantaneous reactive power theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 12-17(on Chinese).
- [12] 公茂忠, 刘汉奎, 顾建军, 等. 并联型有源电力滤波器参考电流获取的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 43-47. Zhou Weiping, Gong Mao zhong, Liu Hankui, et al. A novel method of calculating current reference for shunt active power filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 47-47(on Chinese).
- [13] Smedley K M, Zhou Luowei, Qiao Chongming. Unified constant frequency integration control of active power filters steady-state and dynamics[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2001, 16(3):428-436.
- [14] Le Roux A D, Du Toit J A, Enslin J H R. Integrated active rectifier and power quality compensator with reduced current measurement[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1999, 46(3): 504-511.
- [15] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [16] 王广柱. 抛物线法电流跟踪脉宽调制控制器[P]. 中国专利, CN1635698, 2004.

收稿日期: 2006-03-23.

作者简介:

王广柱(1963—), 男, 教授, 研究方向为现代电力电子技术及应用, sdwgz@163.com; sdwgz@sdu.edu.cn.

(编辑 王彦骏)

(上接第 11 页 Continued from page 11)

- [10] Neudorf E G, Kiguel D L, Hamoud G A, et al. Cost-benefit analysis of power system reliability: two utility case studies[C]. IEEE 1995 PES Winter Meeting, New York, 1995.
- [11] Li Wenyuan, Vaahedi E, Mansour Y. Determining number and timing of substation spare transformers using a probabilistic cost analysis approach[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(3): 934-939.
- [12] Chan S Park. Contemporary engineering economics[M]. New York: Addison- Wesley Publishing Company, 1993.

收稿日期: 2006-04-26.

作者简介:

李文沅, 博士, 首席工程师(加拿大), 教授, IEEE Fellow, 重庆大学顾问教授, 主要兴趣包括电力系统规划, 运行, 可靠性和概率应用, wenyuan@telus.net;

周家启, 教授, 博士生导师, 主要兴趣包括电力系统规划, 可靠性和概率应用;

颜伟, 博士, 副教授, 主要兴趣包括电力系统最优化技术, 运行控制和概率在电力系统中的应用;

谢开贵, 博士, 教授, 主要兴趣包括电力系统规划, 可靠性和概率应用。

(责任编辑 喻银凤)