

# 电能质量调节器检测方式的研究

宋新新,王广柱

(山东大学电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要: 给出了一种基于新型检测方式的电能质量调节器,该检测方式不需要检测供电电网电压波动及谐波和负载无功及谐波电流,论述了这种新型检测方式与传统检测方式在电压、电流控制上的等效性。经过 Psim 仿真,结果表明基于该等效检测方式的电能质量调节器具有控制算法简单、性能优良等优点,在各种电网电压和负载电流情况下,该调节器能使电网电流为正弦波并保持功率因数为 1,同时向负载提供稳定的正弦波电压。

关键词: 电能质量调节器; 电压波动及谐波; 无功及谐波电流; 等效控制原理

中图分类号: TM921. 2; TM714. 3 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005) 23-0051-04

## 0 引言

由于大量非线性负载的使用,导致电网电能质量问题日益严重,每年因电能质量问题要承受巨大的经济损失<sup>[1]</sup>。应用新技术解决电能质量问题已成为电力系统研究领域中的热门话题之一<sup>[2~4]</sup>。日本学者 H. Akagi 在 1996 年分析有源滤波器新趋势一文中,首次提出了统一电能质量调节器 UPQC (Unified Power Quality Conditioner) 的概念。它是由串联有源滤波器和并联有源滤波器 APF (Active Power Filter) 串联组合而成。其作用是根据供电电网的实际情况和要求,全面集中地对电网电能质量进行综合补偿,从而全面经济地解决供电电网的电能质量问题,为用户提供可靠的高质量电能<sup>[5]</sup>。现阶段对于 UPQC 的研究,大都集中在谐波电压和无功谐波电流的检测算法上<sup>[6,7]</sup>。而采用电网电流直接控制 APF 的控制方式,因其具有不需要检测负载无功及谐波电流等一系列优点,正逐渐引起人们的兴趣<sup>[8,9]</sup>。本文给出了一种电压、电流直接控制的新型检测方式,并论证得出这种新型检测方式与传统 APF 检测方式在电压、电流控制上的等效性。并通过 Psim 软件,在电网电压出现波动或含有谐波电压时,以及负载中含有谐波及无功电流等情况下,对基于该新型检测方式的 UPQC 进行了仿真,结果表明基于该新型检测方式的电能质量调节器具有控制算法简单、性能优良等优点,在各种电网电压和负载电流情况下,该调节器能使电网电流为正弦波并保持功率因数为 1,同时向负载提供稳定的正弦波电压。

## 1 UPQC 的功能及结构原理

电能质量调节器作为一种提高电能质量的电源设备,一方面它可以对电网电压的波动和谐波进行补偿,使用户负载上电压成为稳定的纯净正弦波电压。另一方面它对负载电流中的无功分量和谐波分量进行补偿,使电网的输入电流为与电网电压同相位的正弦波有功电流,使电网的输入功率因数等于 1;隔断了电网与负载的谐波互相干扰,使电网电压的谐波不干扰负载,也使负载的谐波电流不污染供电电网。

图 1 为 UPQC 的拓扑结构,它由串联 APF 和并联 APF 串联连接在一起组合而成。串、并联 APF 的直流侧使用共同的母线电容  $C_d$ 。串联 APF 通过变压器的二次侧在电路的输入端与负载串联,工作时相当于一个受控电压源,其作用是对电网输入电压的波动和谐波进行补偿。并联 APF 在电路的输出端与负载并联,工作时相当于一个受控电流源,其作用是对负载所需的无功与谐波电流进行补偿。L、C 构成无源滤波器,用来滤出 APF 产生的高次谐波。

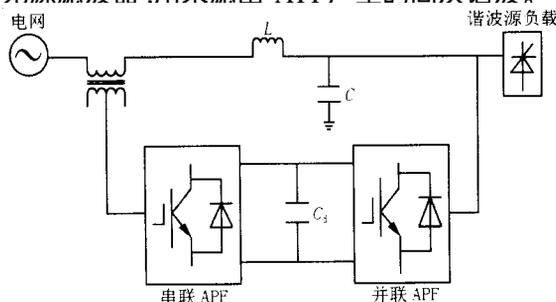


图 1 统一电能质量调节器基本拓扑

Fig 1 Basic topology of UPQC

## 2 电压和电流检测新方法

### 2.1 并联 APF 电流控制等效方法

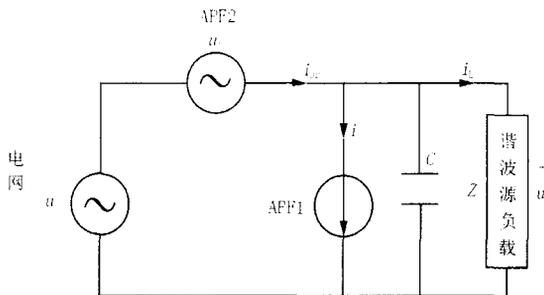


图 2 电能质量调节器等效控制方法图

Fig 2 Equivalent circuit of UPQC

图 2 是电能质量调节器等效原理图。对于并联有源滤波器 APF1 而言,其谐波源负载  $i_L$  中含有基波电流  $i_{Lr}$  和谐波电流  $i_{Lh}$ 。当 APF1 输出一个与谐波电流相反的电流  $i_{cr}$  时,则电网电流  $i_{sr}$  中就仅包含负载电流中的基波分量  $i_{Lr}$ 。这就是传统的 APF1 谐波电流补偿原理,可用如下的一组公式描述:

$$i_{sr} = i_L + i_{cr} \quad (1)$$

$$i_L = i_r + i_h \quad (2)$$

$$\text{令} \quad i_{cr} = -i_h \quad (3)$$

$$\text{则} \quad i_{sr} = i_r \quad (4)$$

然而,和上述原理等效的方式是将上述式 (3) 和 (4) 顺序颠倒,即,如果控制电网电流  $i_{sr}$  为负载电流基波分量  $i_r$ ,则 APF1 的输出  $i_{cr}$  自然就是负载的谐波电流  $i_h$ 。事实上,由于 APF1 的最终控制目标是使电网电流为基波正弦电流,至于它是不是负载中的谐波电流并不重要,因此根本无需检测负载的基波电流。

由于 APF1 本身是由功率开关电路组成,其输出中总会含有开关电流误差成分。因此,在传统的 APF1 电流控制中有:

$$i_{cr} = i_c + i_s \quad (5)$$

电网电流控制中有:

$$i_{sr} = i_s + i_c \quad (6)$$

式中:  $i_c$  为 APF1 的实际电流输出,  $i_s$  为 APF1 电流  $i_c$  中的开关电流分量误差,  $i_s$  为电网中的实际电流,  $i_{sr}$  为电网电流  $i_s$  中的开关电流分量误差。

将式 (5) 和 (6) 代入式 (1), 得

$$i_s = i_c + i_c + (i_c - i_s) \quad (7)$$

根据图 2 显然有:

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

由此可见,并联 APF1 电流控制与电网电流控

制在原理上是等效的。

### 2.2 串联 APF 电压控制等效原理

对于串联有源滤波器 APF2 来讲,如图 2 所示,电网电压  $u_s$  中含有标准基波电压  $u_{sf}$  和谐波电压  $u_{sh}$ ,同时还可能存在电压波动  $u_o$ 。当 APF2 输出一个与谐波电压或电压波动相反的电压  $u_c$  时,则负载端电压  $u_L$  就仅包含电网电压的标准基波分量  $u_{sf}$ 。这就是传统的 APF2 谐波电压补偿原理,可用如下的一组公式描述:

$$u_s + u_c = u_L \quad (9)$$

$$u_s = u_{sf} + u_{sh} + u_o \quad (10)$$

令

$$u_c = -u_{sh} - u_o \quad (11)$$

则

$$u_L = u_{sf} \quad (12)$$

与上述原理等效的方式是将上述式 (11) 和 (12) 顺序颠倒,即如果控制负载端电压  $u_L$  为电网电压基波分量  $u_{sf}$ ,则 APF2 的输出  $u_c$  自然就是电网电压的谐波分量  $u_{sh}$  或电压波动值  $u_o$ 。

在传统的 APF2 电压控制中有:

$$u_c = u_L - u_s \quad (13)$$

$$u_{cr} = u_{Lr} - u_s \quad (14)$$

式中:  $u_s$  为电网端电压,  $u_L$  为负载端电压,  $u_c$  为 APF2 输出的补偿电压,  $u_{Lr}$  为负载电压的参考值,  $u_{cr}$  为 APF2 补偿电压的参考值。

由式 (13)、(14) 得:

$$u_{cr} - u_c = u_L - u_{Lr} \quad (15)$$

$$\text{令} \quad u_c = u_{cr} - u_c \quad u_L = u_{Lr} - u_L \quad (16)$$

即

$$u_c = u_L \quad (17)$$

由式 (17) 可以说明,串联 APF2 电压控制与负载电压控制在原理上也是等效的。

## 3 系统构成

图 3 是基于上述电压和电流控制新型方法的 UPQC 系统构成,由于电流滞环控制具有反映速度快,控制精度较高,容易实现和不需要了解负载的特性等优点,因此,本系统电流控制采用了恒频滞环电流控制方法。图中,串联 APF 和并联 APF 都采用了电压电流双闭环控制,所不同的是:串联 APF 电压外环控制目标是使负载电压为与电网电压基波同相的正弦电压,并联 APF 电压外环控制目标是使直流侧电容电压保持恒定;串联 APF 电流内环控制主要考虑系统稳定性需要,而并联 APF 电流内环控制目标是使电网电流为与电网电压同相的基波正弦电流。

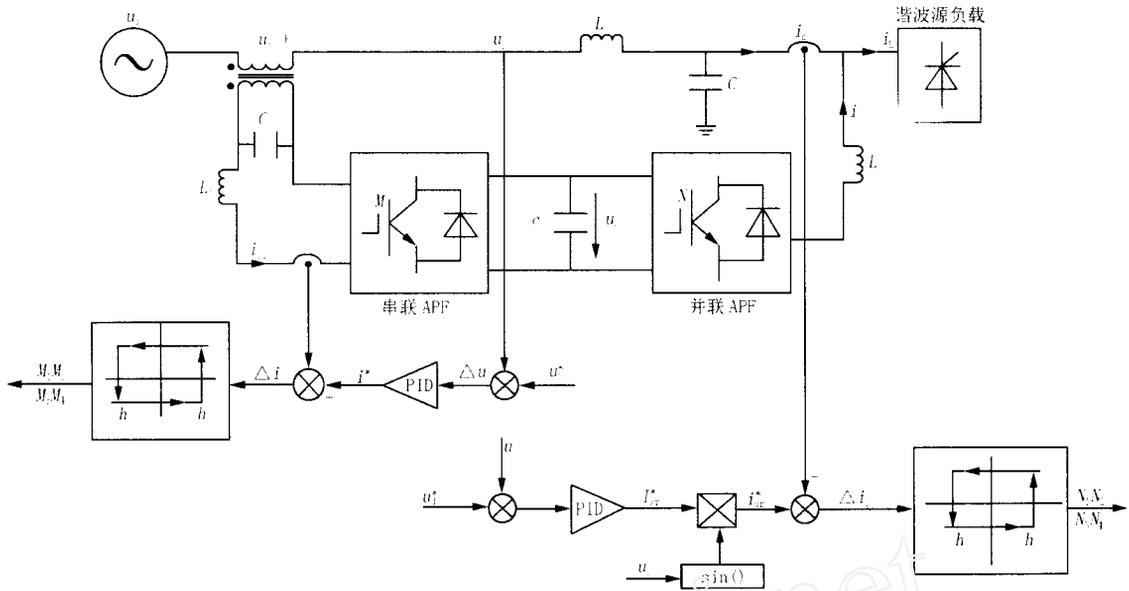


图 3 电能质量调节器滞环控制原理图  
Fig 3 Hysteresis loop control of UPQC

对于这种新型的控制方法,如何得到标准参考电压(电流)是问题的关键。本系统的 PD 调节器采用的是典型的型系统,其串、并联部分的传递函数分别如图 4、5 所示。

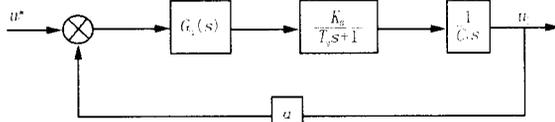


图 4 串联部分 PD 传递函数  
Fig 4 PD transfer function of serial circuit

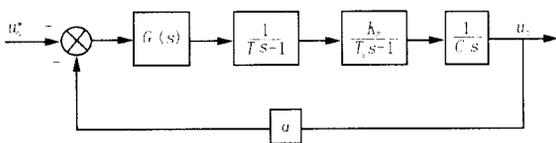


图 5 并联部分 PD 传递函数  
Fig 5 PD transfer function of parallel circuit

$$PD \text{ 调节器的传递函数: } G_u(s) = \frac{K_u (u_s s + 1)}{u_s}$$

串、并联 APF 之间直流侧电容电压  $u_d$  经 PD 调节器控制,产生与电网电压同相的标准参考电流  $i_s^*$ ,电网电流  $i_s$  与参考值  $i_s^*$  进行比较,两者差值作为滞环比较器的输入 ( $h$  是滞环跟踪控制的滞环带,可变),通过滞环比较器产生控制并联 APF 开关  $M_1 \sim M_4$  通断的 PWM 信号,此信号作为驱动电路来控制开关的通断,从而控制电网电流为标准正弦电流。

串联部分采用双闭环控制,负载电压  $u_L$  与标准参考电压  $u_L^*$  进行比较,经 PD 控制器调节产生标准参考电流  $i^*$ ,补偿信号  $i_c$  跟踪  $i^*$  经滞环比较器产生控制串联 APF 开关  $N_1 \sim N_4$  通断的 PWM 信号,从而达到控制负载电压为正弦电压的目的。

#### 4 仿真波形

用 Psim 软件对不同的电网电压和负载电流情况下 UPQC 控制进行仿真研究,系统和仿真参数如下:电网电压  $u_s$  有效值  $U_s = 220 \text{ V}$ ,频率  $50 \text{ Hz}$ ,串联部分变压器原副边变比为  $1:3$ ,  $L_1 = 5 \text{ mH}$ ,  $C_1 = 4 \mu\text{F}$ ,PI 调节器参数  $K_u = 10.5$ ,  $\tau_u = 250 \mu\text{s}$ ;并联部分  $L_2 = 1 \text{ mH}$ ,参考电压  $u_L^*$  有效值  $U_{Lr}^* = 10 \text{ V}$ ; PI 调节器参数  $K_u = 4.5$ ,  $\tau_u = 30 \text{ ms}$ ;串、并联之间直流侧电容  $C_d = 3300 \mu\text{F}$ ,初始电压为  $400 \text{ V}$ ;有源滤波器频率  $f = 20 \text{ kHz}$ 。在串、并联有源滤波器之间加无源滤波器,  $L = 0.1 \text{ mH}$ ,  $C = 50 \mu\text{F}$ 。

1) 当负载为纯电阻负载  $R = 6 \Omega$  时,在  $t = 20 \text{ ms}$  时,使电网电压从基准值 ( $220 \text{ V}$ ) 下降  $60 \text{ V}$ ,在  $t = 0.2 \text{ s}$  时,使电压上升  $60 \text{ V}$ ,仿真波形如图 6(a) 所示。图中,  $u_s$  为电网电压波形,  $i_s$  为电网电流波形,  $u_c$  为串联 APF 补偿电压波形,  $i_L$  为负载电流波形,  $u_L$  为负载电压波形,  $i_c$  为并联 APF 补偿电流波形。可以看出,当电网电压  $u_s$  下降时,电网电流  $i_s$  随之升高;当  $u_s$  上升时,  $i_s$  随之下降。  $i_s$  始终为与

电网电压同相位的正弦有功电流并保持电网的输入功率因数等于 1。同时,串联 APF 输出电压  $u_c$  和并联 APF 输出电流  $i_s$  随之改变了方向,即:当电网电压上升时,功率从串联 APF 流向并联 APF;当电压下降时,功率从并联 APF 流向串联 APF。且负载电压  $u_L$  稳定的基频正弦电压(有效值 220 V),体现了电能质量调节器良好的稳压性能。

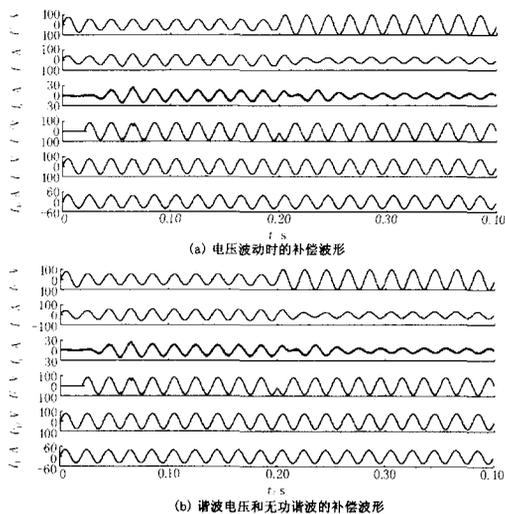


图 6 补偿前后电压、电流波形图

Fig 6 Voltage and current waveform pre/post compensation

2) 当负载侧空载时,在  $t = 5 \text{ ms}$  时向负载投入 30A 方波(滞后电压  $45^\circ$ ) + 10A 五次谐波;在  $t = 20 \text{ ms}$  时向电网侧投入 88 V 三次谐波 + 44 V 五次谐波,仿真波形如图 6(b) 所示。可以看出当电网中含有谐波电压,或者负载中含有谐波和无功电流时,UPQC 都能使电网电流为与电网电压基波同相的基频正弦电流,负载电压为稳定的基频正弦电压。其中,串联 APF 起到了补偿电网电压谐波和波动的作用,并联 APF 起到了补偿负载谐波和无功电流的作用。

## 5 结论

本文给出了一种基于电压电流新型控制方式的 UPQC,与传统控制方式相比,该方式不需检测电网电压波动及谐波电压,不需检测负载无功及谐波电流,大大简化了系统控制算法的研究。仿真结果表明,本文给出的新型 UPQC 控制方法是可行的和有效的,它不仅可用于单相系统,而且同样也适用于三相系统。

## 参考文献:

- [1] 吴竟昌. 供电系统谐波 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998  
WU Jing-chang Power Supply System Harmonics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998
- [2] 胡铭,陈衍. 有源滤波技术及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(3): 66-70  
HU Ming, CHEN Yan Active Power Filter Technology and Its Application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(3): 66-70
- [3] 钱照明,叶忠明,董伯藩. 谐波抑制技术 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(10): 48-54.  
QIAN Zhao-ming, YE Zhong-ming, DONG Bo-fan Harmonics Suppression Techniques [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(10): 48-54
- [4] Hinggorani N G Custom Power [A]. IEEE Spectrum. Greece: 1995. 10-18
- [5] 刘凤君. Delta 逆变技术及其在交流电源中的应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2003  
LIU Feng-jun Delta Inverter Technique and Its Application in AC Power Source [M]. Beijing: China Machine Press, 2003
- [6] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components [J]. IEEE Trans on Industrial Application, 1984, 20(3): 625-630
- [7] 陶骏,刘正之. 谐波及无功电流检测方法 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 31-33, 34.  
TAO Jun, LIU Zheng-zhi Study on the Detection Approach of Harmonics and Reactive Currents [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 31-33, 34.
- [8] Smedley KM, ZHOU Luo-wei, QIAO Chong-ming Unified Constant Frequency Integration Control of Active Power Filters Steady-state and Dynamics [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(3): 428-436
- [9] 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.

收稿日期: 2005-03-22; 修回日期: 2005-04-15

作者简介:

宋新新(1979-),女,硕士研究生,研究方向为电力电子及电力传动;Email: gy5555@sina.com

王广柱(1963-),男,教授,研究方向为电力电子技术及应用。

(下转第 59 页 continued on page 59)

- KUANG Hong-hai, HUANG Shao-xian Design of the Outage Management System for Distribution Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (24): 71-74.
- [5] 蔡乐,邓佑满,朱小平. 改进的配电网故障定位、隔离与恢复算法 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (16): 48-50, 61.  
CAI Le, DENG You-man, ZHU Xiao-ping An Improved Algorithm of Fault Location Isolation and Restoration for Distribution Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (16): 48-50, 61.
- [6] 蔡运清. 配电管理系统当前的国际状况 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (6): 40-44.  
CAI Yun-qing Distribution Management System's state of the Art Around the World [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (6): 40-44.
- [7] 李晓骏, 邱家驹. 基于 Web 技术的配电网地理信息系统的设计与实现 [J]. 电网技术, 2003, 27 (4): 54-58.  
LI Xiao-jun, QIU Jia-ju Design of a Distribution Geographical Information System Based on Web Technique [J]. Power System Technology, 2003, 27 (4): 54-58.
- [8] 陈竟成, 徐德超, 于尔铿. 配电网故障恢复系统 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (4): 46-51.  
CHEN Jing-cheng, XU De-chao, YU Er-keng Distribution Fault Detection Isolation and Restoration System in a Distribution Management System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (4): 46-51.

收稿日期: 2005-04-12; 修回日期: 2005-07-08

作者简介:

李先奇 (1981 - ), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为停电管理系统应用开发以及优化算法在电力系统中的应用;

E-mail: lixianqi@gmail.com

曾致远 (1957 - ), 男, 教授, 主要研究方向为信息技术在电力系统方面的应用;

张勇传 (1935 - ), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为数字梯级水库群优化调度决策。

### Analysis and implementation of distribution outage management system

LI Xian-qi, ZENG Zhi-yuan, ZHANG Yong-chuan, XU Xue-jun

(College of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Outage of distribution directly affects distribution reliability and service quality. After information and data exchanging in this system and working flow processing outage are ascertained, outage management system (OMS) based on GIS is designed in this paper, which supports planned outage and contingency outage. Distribution geometric network is established based on GIS. Under the constraint of line capacity and load balancing, finding out best isolation point and load transfer scheme. This paper proposes an outage scheme using the function as path tracing, connectivity analysis, and network analysis to minimize the outage influence. The functions including outage display, outage simulation, analysis and statistic, scheme analyzing, and work order and operation tickets management have been implemented on the basis of visualization man-machine interface.

**Key words:** GIS; distribution network; outage management; network model; load transfer

(上接第 54 页 continued from page 54)

### Simulation study of unified power quality conditioner

SONG Xin-xin, WANG Guang-zhu

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

**Abstract:** This paper proposes a new measurement of voltage and current, that there is no need of the measurements of voltage fluctuation, harmonic voltage, harmonic and reactive current. Voltage equivalent measurements for series active power filters and the current equivalent measurements for shunt active power filters are discussed. Simulation results show that the UPQC controlled by the new equivalent measurement has simple control algorithm and good performance. The UPQC can not only compensate for harmonic and reactive currents produced by nonlinear loads and improve power factor, but also eliminate voltage fluctuation and harmonic voltage.

**Key words:** unified power quality conditioner; voltage fluctuation and harmonic voltage; harmonic and reactive current; equivalent control measurements