

## 有源电力滤波器稳态和动态特性分析

黄清<sup>1</sup>, 陈兵<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**文中对有源电力滤波器(active power filter, APF)的多种拓扑结构和多种控制策略进行了分析研究,以控制负载谐波电流、电网谐波电流、滤波支路谐波电流、负载谐波电压4种基本控制策略为基础,对并联混合型 APF、串联混合型 APF 以及 APF 与 PF(power filter, PF) 串联后并入电网等几种典型的 APF 结构进行稳态和暂态分析,为合理选择 APF 结构及其控制策略提供理论依据。文中给出了 APF 工作在稳态和动态时实验波形,验证了理论分析的正确性,所得到的结论对 APF 的结构选择和实际应用具有一定的指导意义。

**关键词:**有源电力滤波器;控制策略;稳态分析;动态分析;谐波

中图分类号:TN713

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)04-0078-06

### 0 引言

有源电力滤波器(active power filter, APF)自1971年提出以来<sup>[1]</sup>,相比无源电力滤波器(power filter, PF)有着显著的优势<sup>[2-4]</sup>,一直得到了各国学者的重视和研究,并取得了大量的研究成果,为 APF 的实际应用提供了理论基础。

经过十多年的发展,特别是1983年,日本学者 AKAGI H 等提出瞬时无功功率理论,为解决三相电力系统畸变电流的瞬时检测提供了理论依据,对有源电力滤波器的发展起到巨大的推动作用。随着有源滤波理论研究的不断深入,以及电力电子器件制造水平的迅速提高,有源滤波器产品逐渐在市场上出现,并在工业和民用领域取得了广泛的应用。

同国外技术相比,我国的有源滤波技术研究起步较晚,但是我国在 APF 的应用研究阶段得到了学术界和企业界的充分重视。大量文献表明已有的研究成果主要是集中于对 APF 拓扑结构、控制策略、补偿性能等方面的研究<sup>[5-10]</sup>,提出了并联型 APF、串联型 APF、混合型 APF 等多种拓扑结构,以及基于瞬时无功理论的 P-Q 或  $d-q$  控制、滑模控制、自适应控制、单周控制等多种控制策略。然而,很少有文献从 APF 基本原理和基本控制策略对其进行分析研究和总结。本文以此为出发点,首先对并联型 APF+PF 混合型结构、串联型 APF+PF 混合型结构以及 APF 与 PF 串联后并入电网的结构进行了架构解剖,接着对 APF 稳态和动态时基本原理进行分析研究,最后文中通过基于 DSP28335 的样机实

例对目前市面上最为应用广泛的并联型 APF+PF 混合型结构进行了实验验证,所得结论对 APF 的选择和应用具有一定的指导意义。

### 1 APF 稳态时基本原理分析

针对有源电力滤波器和无源滤波器各自的优缺点<sup>[2-4]</sup>,目前,将两者结合构成的混合型 APF 被大量采用,已成为一种较理想的解决方案。现以几种典型的混合型 APF 为例对其基本原理和控制策略进行分析,并联型 APF 和串联型 APF 基本原理包含在其中。

#### 1.1 并联型 APF+PF 混合型结构

并联型 APF+PF 混合型结构<sup>[4]</sup>的拓扑如图1所示,其等效电路如图2所示。图2中  $V_{sh}$  为电网谐波电压;  $I_{sh}$  为电网谐波电流;  $V_{lh}$  为负载侧谐波电压;  $I_{lh}$  为负载谐波电流;  $Z_s$  为电网等效阻抗;  $Z_F$  为无源滤波支路等效谐波阻抗;  $I_c$  为 APF 等效电流源。

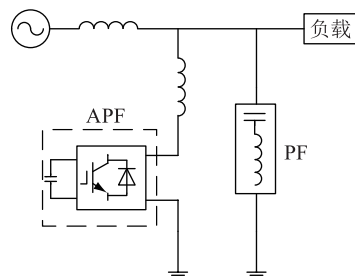


图1 并联型 APF+PF 拓扑电路

Fig.1 Topology of shunt APF+PF configuration

根据叠加定理可得到电网谐波电流:

$$I_{sh} = \frac{1}{Z_s + Z_F} V_{sh} + \frac{Z_F}{Z_s + Z_F} I_{lh} - \frac{Z_F}{Z_s + Z_F} I_c \quad (1)$$

收稿日期:2018-03-26;修回日期:2018-04-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903300)

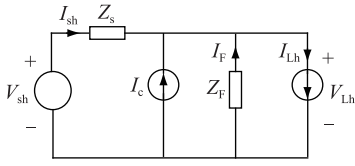


图2 并联型 APF+PF 混合型结构等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of shunt APF+PF configuration

从 APF 控制原理和控制目标来看,主要有 4 种基本控制策略<sup>[11-13]</sup>,即根据负载谐波电流、电网谐波电流、滤波器支路谐波电流、负载谐波电压进行控制。

控制策略 I:根据负载谐波电流控制,即控制  $I_c = kI_{Lh}$ ,将其代入(1)式得:

$$I_{sh} = \frac{1}{Z_s + Z_F} V_{sh} + \frac{Z_F(1-k)}{Z_s + Z_F} I_{Lh} \quad (2)$$

由式(2)可得到控制策略 I 所对应的等效电路如图 3(a)所示,增加了电网谐波阻抗和减小了滤波支路阻抗,对阻止谐波电压和谐波电流在电网和负载之间的传递非常有效,滤波效果好。若  $k=1$ ,则可以完全消除负载谐波电流对电网的影响。

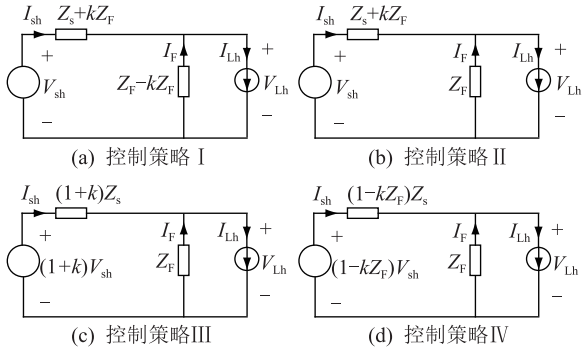


图3 并联型 APF+PF 混合型结构 4 种不同控制策略等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of shunt APF+PF configuration based on four different control strategies

控制策略 II:根据电网谐波电流控制,即控制  $I_c = kI_{sh}$ ,将其代入(1)式得:

$$I_{sh} = \frac{1}{Z_s + (1+k)Z_F} V_{sh} + \frac{Z_F}{Z_s + (1+k)Z_F} I_{Lh} \quad (3)$$

由式(3)得到控制策略 II 对应的等效电路,如图 3(b)所示,电网谐波阻抗增加,使大部分负载谐波电流进入滤波支路,减小对电网电流谐波污染,但在负载侧可能因负载谐波电流而引起较大的谐波电压,并很难完全消除负载谐波电流对电网的影响。

控制策略 III:根据滤波器支路谐波电流控制,即控制  $I_c = kI_F$ ,将其代入(1)式得:

$$I_{sh} = \frac{1+k}{Z_F + (1+k)Z_s} V_{sh} + \frac{Z_F}{Z_F + (1+k)Z_s} I_{Lh} \quad (4)$$

同样,由式(4)得到控制策略 III 对应的等效电路,如图 3(c)所示,若  $k=-1$ ,则可完全消除电网谐波电压的影响,但无法消除电网中存在的负载谐波电流。所以这种控制策略较适用于抑制电网支路与滤波支路之间的谐振,而不用于抑制负载谐波电流。

控制策略 IV:根据负载谐波电压控制,即控制  $I_c = kV_{Lh}$ ,将其代入(1)式得:

$$I_{sh} = \frac{1-kZ_F}{Z_s(1-kZ_F) + Z_F} V_{sh} + \frac{Z_F}{Z_s(1-kZ_F) + Z_F} I_{Lh} \quad (5)$$

由(5)式得到控制策略 IV 对应的等效电路,如图 3(d)所示,若  $k = \frac{1}{Z_F}$ ,这和控制策略 3 效果是一样的。若控制  $|1-kZ_F| > 1$ ,电网谐波阻抗增加,可改善无源滤波器滤波效果,但此时有源滤波器的滤波效果还要取决于系统电网阻抗。

## 1.2 串联型 APF+PF 混合型结构

串联型 APF+PF 混合型结构<sup>[4]</sup>的拓扑如图 4 所示,其等效电路如图 5 所示,其中  $V_c$  为 APF 等效电压源。根据叠加定理可得到:

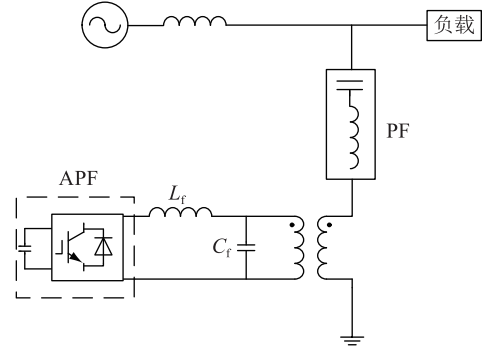


图4 串联型 APF+PF 混合型结构等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of series APF+PF configuration

$$I_{sh} = \frac{1}{Z_s + Z_F} V_{sh} + \frac{Z_F}{Z_s + Z_F} I_{Lh} - \frac{1}{Z_s + Z_F} V_c \quad (6)$$

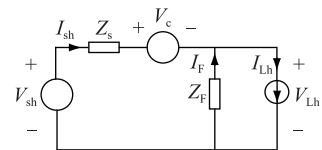


图5 串联型 APF+PF 混合型结构等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of series APF+PF configuration

同样从 4 种基本控制策略进行分析:

控制策略 I : 控制  $V_c = kI_{Lh}$ , 将其代入(6)式得:

$$I_{sh} = \frac{1}{Z_s + Z_F} V_{sh} + \frac{Z_F - k}{Z_s + Z_F} I_{Lh} \quad (7)$$

由式(7)得到对应的等效电路图 4(a), 可见电网谐波阻抗增大, 同时滤波支路阻抗减小, 滤波效果好。

控制策略 II : 控制  $V_c = kI_{sh}$ , 将其代入(6)式得:

$$I_{sh} = \frac{1}{Z_s + Z_F + k} V_{sh} + \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + k} I_{Lh} \quad (8)$$

式(8)对应的等效电路见图 6(b), 可见图 6(b)与图 3(b)类似, 滤波效果相同。

控制策略 III : 控制  $V_c = kIV_F$ , 将其代入(6)式得:

$$I_{sh} = \frac{1}{Z_s + Z_F - k} V_{sh} + \frac{Z_F - k}{Z_s + Z_F - k} I_{Lh} \quad (9)$$

式(9)对应的等效电路见图 6(c), 滤波支路阻抗减小, 可减小负载谐波电流对电网电流的影响, 然而因电网支路阻抗一般很小, 导致系统对电网谐波电压较敏感, 容易谐振。

控制策略 IV : 控制  $V_c = kV_{Lh}$ , 将其代入(6)式得:

$$I_{sh} = \frac{1}{Z_s + (1+k)Z_F} V_{sh} + \frac{(1+k)Z_F}{Z_s + (1+k)Z_F} I_{Lh} \quad (10)$$

式(10)对应的等效电路见图 6(d), 当  $k = -1$  时, 可以完全消除负载谐波电流对电网的影响, 但无法避免电网谐波电压的影响。

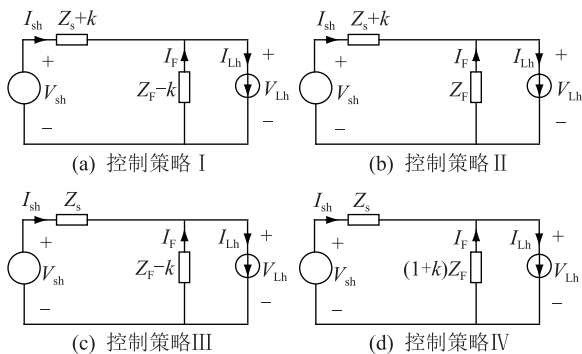


图 6 串联型 APF+PF 混合型结构 4 种不同控制策略等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of series APF+PF configuration based on four different control strategies

### 1.3 APF 与 PF 串联后并入电网

APF 与 PF 串联后并入电网混合型结构<sup>[4]</sup>拓扑如 7 所示, 其等效电路如图 8 所示, 其中  $V_c$  为 APF 等效电压源,  $Z_F$  为无源滤波支路等效谐波阻抗。

根据叠加定理可得到电网谐波电流表达式与串联型 APF+PF 混合型结构表达式(6)相同, 通过推导分析, 两种结构根据负载谐波电流、电网谐波

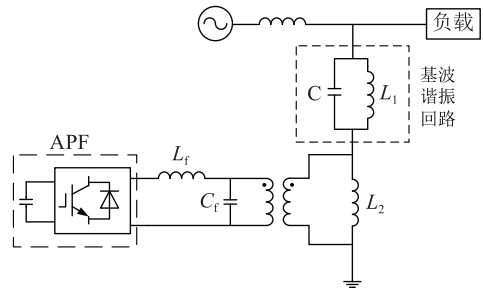


图 7 APF 与 PF 串联后并入电网混合型结构拓扑  
Fig.7 Topology of connecting to the grid after series APF with PF

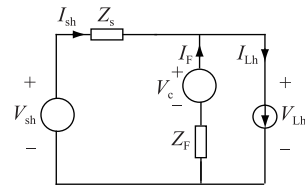


图 8 APF 与 PF 串联后并入电网混合型结构等效电路  
Fig.8 Equivalent circuit of connecting to the grid after series APF with PF

电流、滤波器支路谐波电流控制的 3 种控制策略效果相同。然而根据负载谐波电压进行控制时, 由于两种结构的负载谐波电压  $V_{Lh}$  与电网谐波电流  $I_{sh}$  关系不同(式(11)对应图 3, 式(12)对应图 5), 其控制效果也不同。

$$V_c = kV_{Lh} = k(I_{sh} - I_{Lh})Z_F \quad (11)$$

$$V_c = kV_{Lh} = k(V_{sh} - Z_s I_{sh}) \quad (12)$$

将式(12)代入(6)式得到:

$$I_{sh} = \frac{1-k}{Z_F + (1-k)Z_s} V_{sh} + \frac{Z_F}{Z_F + (1-k)Z_s} I_{Lh} \quad (13)$$

式(13)对应的此控制策略等效电路如图 9 所示, 可见当  $k = 1$  时, 能有效地抑制电网阻抗波动对滤波器和负载的影响, 同时可消除电网谐波电压的影响, 所以这种控制策略较适合于抑制电网支路与滤波支路之间的谐振, 不用于抑制负载谐波电流。

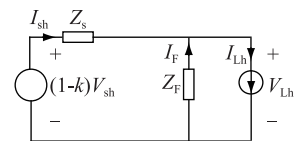


图 9 APF 与 PF 串联后并入电网混合型结构等效电路  
Fig.9 Equivalent circuit of connecting to the grid after series APF with PF

## 2 APF 动态时基本原理分析

APF 在启动和负载突变时补偿电流跟踪的动态性能将直接影响到系统能否正常工作, 已有的文

献对 APF 动态性能做了较深入的研究和分析<sup>[14-15]</sup>,然而都未从基本原理角度进行研究。为此,下文以并联型 APF 为例对其动态时基本原理进行分析,并联型 APF 负载突变时等效电路如图 7 所示, $Z_L$  为外加负载阻抗。可见图 10 为一个二阶动态响应电路,开关 K 在  $t=0$  时刻动作。

开关动作前( $t=0_-$ 时),假设系统处于稳态,根据叠加定理,通过解二阶微分方程,可得到 APF 补偿电流:

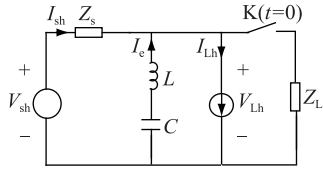


图 10 并联型 APF 在负载突变时等效电路

Fig.10 Equivalent circuit of shunt APF configuration when load change in step

$$I_{e(0_-)} = C(K_1 p e^{pt} + K_2 q e^{qt}) \quad (14)$$

式中: $K_1, K_2$  为常数; $L, C$  分别为 APF 滤波电感值和直流电容值。其中:

$$\begin{cases} p = -\frac{Z_s}{2L} + \sqrt{\left(\frac{Z_s}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \\ q = -\frac{Z_s}{2L} - \sqrt{\left(\frac{Z_s}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \end{cases} \quad (15)$$

开关动作后( $t=0_+$ 时),系统开始进入稳态,同样根据叠加定理解二阶微分方程,得到 APF 补偿电流:

$$I_{e(0_+)} = C(K_3 m e^{mt} + K_4 n e^{nt}) \quad (16)$$

式中: $K_3, K_4$  为常数。其中:

$$\begin{cases} m = -\frac{Z_s Z_L}{2(Z_s + Z_L)L} + \sqrt{\left(\frac{Z_s Z_L}{2(Z_s + Z_L)L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \\ n = -\frac{Z_s Z_L V}{2(Z_s + Z_L)L} - \sqrt{\left(\frac{Z_s Z_L}{2(Z_s + Z_L)L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \end{cases} \quad (17)$$

在负载突变的瞬间,即开关 K 动作瞬间( $t=0$ 时),为避免 APF 补偿电流冲击,应保证  $I_{e(0_-)} = I_{e(0_+)}$ ,即由式(14)和(16)可得:

$$K_1 p + K_2 q = K_3 m + K_4 n \quad (18)$$

将  $p, q, m, n$  表达式代入式(18),并设:

$$\begin{cases} A = \frac{K_1 + K_2}{K_3 + K_4} \\ B = \frac{K_1 - K_2}{K_3 - K_4} \end{cases} \quad (19)$$

代入化简整理可得:

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{Z_s}{2} \sqrt{\frac{B^2 - A^2}{B^2 - 1}} \quad (20)$$

根据式(19)选择 APF 的滤波电感和直流电容值,可以避免负载突变时,电网电流和 APF 补偿电流冲击,动态性能好。

### 3 实验验证

针对以上理论分析,本文选取目前最为常用的并联型 APF+PF 混合型结构为例,根据负载谐波电流进行控制,对 APF 稳态和动态时工作情况进行了实验验证,实验参数为:采用 DSP 28335+FPGA 双核控制系统作为控制器,一次回路侧交流输入相电压峰值 110 V,开关频率 10 kHz,APF 输出滤波电感为 1.5 mH 硅钢片平波电抗器,直流侧电压设置为 400 V,电容值为 4700  $\mu$ F,PF 采用滤波电容器为 25  $\mu$ F 滤波无极容,耐压 1200 V,星形连接。IGBT 采用英飞凌单管 IKW40T120,IGBT 驱动采用落木源六单元驱动 TX-DA962,驱动不内置死区。值得注意的是 DSP 产生的 PWM 信号通过 FPGA 产生驱动逻辑保护功能,并产生 1  $\mu$ s 的上下桥臂直通保护死区, PWM 信号再通过光耦隔离和整形电路进入驱动电路。图 11 为 APF 启动和退出时电网 A 相电压和电流的动态响应波形,图 12 为负载突变时电网 A 相电压和电流的动态响应波形,一级负载纯阻性 80  $\Omega$ ,在一级负载稳定运行时突然并联接入二级负载同样也是 80  $\Omega$ 。由图 11—12 可见,APF 滤波效果好,且启动和负载突变时电网电流无冲击,动态性能好。

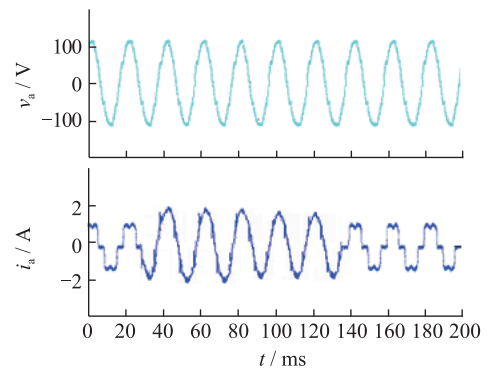


图 11 APF 启动和退出时电网 A 相电压和电流实验波形

Fig.11 Experimental waveforms of the grid phase-A voltage and current when APF started and stopped

接着对 APF 接入前后对电网谐波电流抑制效果进行分析,在 APF 启动前电网电流总谐波失真(THD)频谱如图 13 所示。由于 APF 未投入工作,网侧含有大量由于非线性负载导致的 5、7 次低频谐波,网侧电流 THD(记作  $\eta_{\text{THD}}$ )为 25.9%,APF 投入



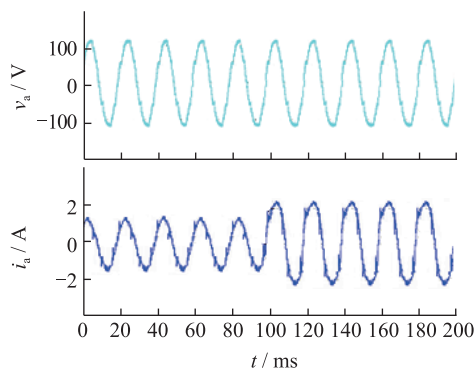


图12 负载突变时电网 A 相电压和电流实验波形

Fig.12 Experimental waveforms of the grid phase-A voltage and current when load change in step with APF

工作后滤波效果显著,如图 14 所示,低频谐波分量大幅度降低,网侧电流  $\eta_{\text{THD}}$  降低至 2.8%。



图13 APF 启动前网测电流 THD 频谱

Fig.13 THD spectrum of grid current before APF

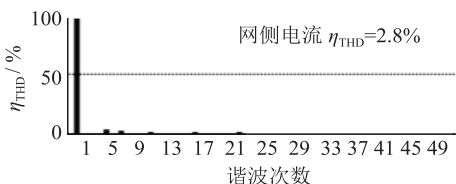


图14 APF 启动后网测电流 THD 频谱

Fig.14 THD spectrum of grid current after APF

## 4 结语

本文根据 APF 4 种基本控制策略对 APF 基本原理进行了详细的分析,得出了每种控制策略对应的不同类型 APF 的控制效果,为合理选择不同类型的 APF 及其控制策略提供了理论依据,并通过二阶动态响应系统分析了 APF 在负载突变时补偿电流跟踪的动态过程,得出了 APF 滤波电感和直流电容值合理选择的关系式,以避免 APF 启动和负载突变时电网电流和补偿电流冲击,从而改善系统动态性能。文中以并联型 APF+PF 混合型结构为实例,对该例进行了实验验证,网侧电流 THD 从补偿前的 25.9%降低至 2.8%,实验结果证明了理论分析的正确性和有效性。

### 参考文献:

[1] SASAKI H, MACHIDA T. A new method to eliminate AC harmonic current by magnetic flux compensation; consideration on

basic design[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(5): 2009-2016.

[2] AKAGI H, FUJITA H. A new power line conditioner for harmonic compensation in power systems[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1995, 10(3): 1570-1575.

[3] MORAN A L, DIXON W J, WALLACE R R. A three-phase active power filter operating with fixed switching frequency for reactive power and current harmonic compensation [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 1995, 42(4): 402-408.

[4] 李战鹰,任震,杨泽明.有源滤波装置及其应用研究综述[J]. 电网技术. 2004, 28(22): 40-43.

LI Zhanying, REN Zhen, YANG Zeming. Survey on active power filter devices and their application study [J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 40-43.

[5] 吴卫民,童立青,钱照明,等.一种高性能串联混合型有源电力滤波器拓扑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 108-112.

WU Weimin, TONG Liqing, QIAN Zhaoming, et al. Analysis of a novel hybrid series active power filter topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 108-112.

[6] 杨兴武,雷彪,欧阳武,等.单相 H 桥级联型 APF 模型预测控制方法研究[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 962-968.

YANG Xingwu, LEI Biao, OUYANG Wu, et al. Model predictive control of single-phase cascaded H-bridge active power filter[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 962-968.

[7] 朱志健,唐卫民.三相电压型 PWM 整流器的新型双闭环控制方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 86-90.

ZHU Zhijian, TANG Weimin. A novel double closed loop control strategy of three-phase voltage-sourced PWM rectifier [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 86-90.

[8] 尹春杰,王芳,石磊,等.基于瞬时电压矢量定向的有源电力滤波器补偿电流检测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 112-118.

YIN Chunjie, WANG Fang, SHI Lei, et al. A novel compensation current detection method for APF based on transient voltage space vector orientation [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2017, 32(7): 112-118.

[9] 徐群伟,钟晓剑,胡健,等.基于误差迭代 PI 和改进重复控制的 APF 补偿电流控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 124-131.

XU Qunwei, ZHONG Xiaojian, HU Jian, et al. Compensation current control of APF based on error iteration PI and improved repetitive control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 124-131.

[10] 秦伟,冯延晖,黄凯,等.基于 NCAV 和电路等效替换的 PWM 整流器容错控制系统[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 84-89.

QIN Wei, FENG Yanhui, HUANG Kai, et al. Fault-tolerant control system of PWM rectifier based on NCAV and circuit equivalent replacement [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 84-89.

- [11] WANG Zhaoan, WANG Qun, YAO Weizheng, et al. A series active power filter adopting hybrid control approach[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2001,16(3):301-310.
- [12] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(9):17-21.  
CHEN Guozhu, LUV Zhengyu, QIAN Zhaoming. The general principle of active filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(9):17-21.
- [13] 范瑞祥, 罗安, 周柯, 等. 并联混合型有源电力滤波器的建模和控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(12):55-61.  
FAN Ruixiang, LUO An, ZHOU Ke, et al. The modeling and the control strategy analysis of shunt hybrid active power filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(12):55-61.
- [14] MENDALEK M, AL-HADDAD K, FNAIECH F, et al. Non-linear control technique to enhance dynamic performance of a shunt active power filter[J]. IEE proceedings Electric Power Applications, 2003,150(4):373-379.
- [15] GUOZHU C, SMEDLEY K M. Steady-state and dynamic study of one-cycle controlled three-phase active power filter[C] // 38<sup>th</sup> IAS Annual Meeting, Salt Lake City, USA, 2003,2:1075-1081.

作者简介:



黄清

黄清(1968—),男,硕士,高级工程师,主要从事输电运检技术研究工作(E-mail: cbsure@163.com);

陈兵(1977—),男,博士,研究员级高级工程师,从事新能源、电能质量技术研究工作。

## Active Power Filter under Steady and Dynamic State

HUANG Qing<sup>1</sup>, CHEN Bing<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** A variety of topology structures and control strategies of active power filter (APF) are analyzed. Based on the four basic control strategies, load harmonic current control, grid harmonic current control, filter line harmonic current control and load harmonic voltage control, the steady state and dynamic state analysis of typical APF structures such as shunt hybrid APF, series hybrid APF and APF series with PF connecting to the grid are carried out. The experimental waveforms, which verifies the correctness of the theory analysis, of APF working on steady state and dynamic state are also given by an application example. The conclusions obtained in this paper is of great significance in structural selection and practical application of APF.

**Key words:** APF; control strategy; steady state analysis; dynamic state analysis; harmonic

(编辑 钱悦)