

DOI: 10.7667/PSPC151429

并联型 APF 补偿容性非线性负载不稳定机理研究

李鹏¹, 蒋晓明², 黄俊华¹, 张涛³

(1. 广州邦讯信息系统有限公司, 广东 广州 510663; 2. 广东省自动化研究所, 广东 广州 510070;
3. 广东易事特电源股份有限公司, 广东 东莞 523808)

摘要: 基于负载电流检测方式的并联型有源电力滤波器补偿容性非线性负载时会发生不稳定的现象, 其根本原因在于整个级联系统输入输出级阻抗不匹配, 存在相互影响。针对这一问题首先建立并联有源滤波器补偿容性非线性负载时的数学模型, 其次基于 Middlebrook 阻抗分析法推导出整个级联系统输入输出级的阻抗特性, 并根据级联系统稳定性判据标准分析了不稳定产生的根本原因。仿真和实验结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 并联有源电力滤波器; 谐波补偿; 容性非线性负载; 不稳定机理

Instability mechanism study of shunt active filter in compensation of capacitive nonlinearity load

LI Peng¹, JIANG Xiaoming², HUANG Junhua¹, ZHANG Tao³

(1. Guangzhou Bonson Info. Corp., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Guangdong Institute of Automation, Guangzhou 510070, China; 3. Guangdong East Power Co., Ltd., Dongguan 523808, China)

Abstract: Instability can occur when a parallel active power filter whose reference current is deduced based on load current detection is applied to compensate capacitive nonlinearity load. The root cause of instability is the mismatch and the mutual influence of input and output impedance in cascade system. The mathematical model of parallel active power filter which is applied to compensate capacitive nonlinearity load is primarily built for the problem in this paper, and the impedance characteristic of input and output part in cascade system is analyzed based on the Middlebrook impedance analysis theory, the root instability cause is discussed by the stability criterion in cascade system, finally, the simulation and experimental results validate the correctness of the theoretical analysis.

Key words: shunt active power filter (APF); harmonic compensation; capacitive nonlinear load; instability mechanism

0 引言

随着电力电子技术的迅速发展, 关于并联型有源滤波器对不同类型非线性负载的补偿特性问题得到了广泛的研究^[1-8]。很多容性负载基于改善输入功率因数需要, 在二级管整流桥交流侧都装设了无功校正电容, 这些非线性负载不仅仅表现出电压型谐波源的特性, 而且还具有电容的特性。当并联型有源滤波器用于补偿这类容性非线性负载时, 如果系统固有谐振频率处于APF补偿频率段内, 则补偿电流将引起系统谐振问题。本文主要研究了并联型有源滤波器补偿该类容性非线性负载时出现的不稳定问题, 通过建立数学模型分析, 并根据级联系统稳定性判据标准, 分析了不稳定产生的根本原因^[9],

最后通过仿真和实验结果验证了理论分析的正确性。此外, 还对避免系统谐振而引起的谐波无限放大问题提出了解决方法。

1 容性非线性负载和并联补偿系统

图1所示为并联型有源滤波器和容性非线性负载组成的并联补偿系统主电路结构图。

整个系统是一个典型的级联系统^[10], 由于我国电网系统在低压配电网络0.4 kV母线侧, 一般都要装设三相无功补偿电容器柜, 因此图1中网侧 C_x 表示单相无功校正电容的参数, L_x 为串联在电容支路的防浪涌限流电感。

三相四线电容中点式并联型有源滤波器本质是一个电压型变流器, 通过检测负载电流控制方式提取负载中的全部谐波电流^[11], 生成幅值相等但相位相反的补偿电流, 注入公共耦合点(PCC), 抵消电

网中的谐波, 达到降低谐波污染的目的^[12]。

典型的容性非线性负载由不控整流电路和交流侧并联无功电容器两部分组成。其中交流侧并联电容器 C 的作用在于提高整流电路的功率因数。

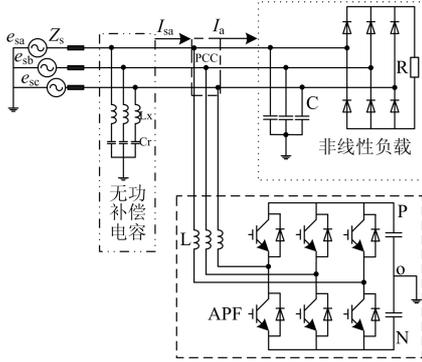


图 1 APF 补偿容性非线性负载主电路结构图

Fig. 1 Main circuit structure diagram of parallel compensation system

2 并联型 APF 补偿容性非线性负载不稳定机理分析

2.1 并联有源滤波器模型

图 2 为并联型 APF 的控制框图, 整个控制系统由谐波提取环节和电流跟踪环节两部分组成^[13]。

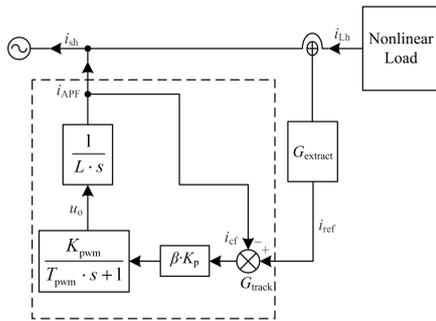


图 2 并联有源滤波器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of APF

APF 采用负载电流检测方式, 通过 DSP 的谐波提取算法计算得到谐波指令电流 i_{ref} , 将指令电流 i_{ref} 和 APF 的输出电流反馈量相减生成误差信号, 经放大后和三角波比较生成 PWM 信号, 控制有源滤波器输出电流 i_{APF} 。

图中 L 为 APF 与电网之间的接口电感, u_o 为逆变桥输出电压, T_{pwm} 为 IGBT 开关周期, $K_{pwm} = V_{dc} / V_{tri}$ (V_{dc} 为直流侧电容电压, V_{tri} 为三角载波幅值), β 为 APF 输出补偿电流的反馈系数, K_p 为电流环增益。

考虑到谐波电流提取环节的采样滤波延时、谐

波提取算法计算延时等, 并联型 APF 谐波电流检测环节的传递函数 $G_{extract}(s)$ 可近似看作一阶惯性环节, 其中 T 为延时时间:

$$G_{extract}(s) = \frac{i_{ref}}{i_{Lh}} = \frac{1}{1 + T \cdot s} \quad (1)$$

此外, APF 电流环传递函数 $G_{track}(s)$ 可表示为

$$G_{track}(s) = \frac{i_{APF}}{i_{ref}} = \frac{\beta K_p K_{pwm}}{s^2 \cdot T_{pwm} L + s \cdot L + \beta K_p K_{pwm}} \quad (2)$$

2.2 并联型有源滤波器补偿容性非线性负载数学模型

图 3 为并联型 APF 补偿容性非线性负载在谐波频段的数学模型。其中, i_{sh} 表示网侧电流谐波电流分量, i_{Lh} 为负载电流谐波电流分量, i_{Lch} 为不控整流负载交流侧并联的无功电容相应谐波电流分量, i_{Loh} 为谐波源电流(不控整流负载被等效为理想谐波源)。此外, APF 被等效为一个受控电压源, i_{APF} 为有源滤波器输出的补偿电流谐波分量, $G(s)$ 表示谐波电流检测环节传递函数, 见式(1)所示。 Z_c 表示不控整流交流侧并联电容器的阻抗, Z_{Lx} 和 Z_{cr} 分别表示电网侧无功校正电容支路的阻抗, Z_s 表示系统阻抗, U_{sh} 为电网电压谐波分量。

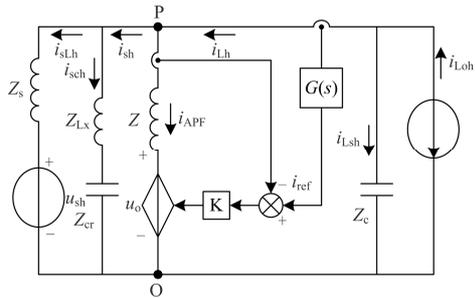


图 3 APF 补偿容性非线性负载数学模型(谐波频段)

Fig. 3 Mathematical model for shunt APF in compensation of capacitive nonlinearity load (harmonic frequency band)

由图 3, APF 逆变桥输出电压 $u_o(s)$ 为

$$u_o(s) = K(s) \cdot (i_{ref}(s) - i_{APF}(s)) \quad (3)$$

$$K(s) = \frac{\beta K_p K_{pwm}}{T_{pwm} \cdot s + 1} \quad (4)$$

根据 KVL, APF 支路的输出阻抗为

$$Z_{APFO}(s) = Z(s) + \frac{u_o(s)}{i_{APF}(s)} = Z(s) + K(s) \left(\frac{i_{ref}(s)}{i_{APF}(s)} - 1 \right) =$$

$$Z(s) + K(s) \left(\frac{1}{G_{track}(s)} - 1 \right) \quad (5)$$

其中, $G_{track}(s)$ 为 APF 电流环传递函数, 如式(2)

所示, $Z_c=1/C \cdot s$; $Z_{cr}=1/C_r \cdot s$; $Z=L \cdot s$; $Z_{Lx}=L_x \cdot s$; $Z_s=L_s \cdot s$ 。

将理论分析所用到的系统参数在表 1 中给出, 并根据式(5)得到 APF 支路的输出阻抗 $Z_{APFO}(s)$ 的阻抗频率特性, 如图 4 所示。

表 1 理论分析及仿真系统参数

参数	数值
电网阻抗	$L_s=40.6 \mu\text{H}$
网侧无功校正电容支路电容	$C_r=3.128 \text{ mF}$
网侧无功校正电容支路电感	$L_x=40.5 \mu\text{H}$
不控整流负载交流侧无功电容	$C=600 \mu\text{F}$
APF 输出电感	$L=0.8 \text{ mH}$
指令计算延时	$T=10 \mu\text{s}$
IGBT 开关周期	$T_{pwm}=66.7 \mu\text{s}$
APF 电流环控制参数	$\beta=36/3000, K_p=68, K_{pwm}=380/10$

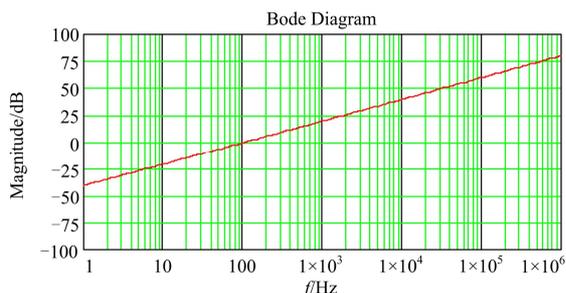


图 4 APF 输出阻抗的幅频特性

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristics of Z_{APFO}

由图 4 可知, APF 支路的输出阻抗在所有频率范围内呈感性特性, 并随频率增大其幅值也逐渐增大, 主要由输出滤波器的参数决定。

2.3 不稳定机理分析

基于图 3 数学模型中对 APF 支路输出阻抗的计算和分析, 可得到图 5 所示的级联系统等效阻抗模型。从 PCC 点(PO 节点)分开可分为前级系统和后级系统。通过对前级系统输出阻抗和后级系统输入阻抗的计算和分析, 可讨论整个系统的稳定性。

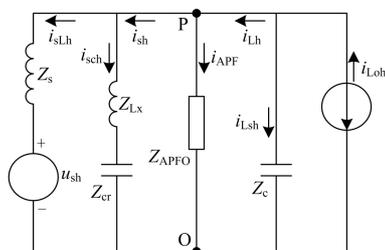


图 5 等效的 APF 输出阻抗模型

Fig. 5 Equivalent output impedance model of APF

分析系统稳定性方法有很多种, 但对于典型级

联系统的稳定性判断, 一般采用广泛使用的 Middlebrook 阻抗分析理论来分析。

根据 Middlebrook 定理, 级联系统的稳定判据为: 如果在所有频率范围内前级系统的输出阻抗远小于后级系统的输入阻抗, 整个级联系统稳定; 否则, 如果级联系统不能保证阻抗匹配, 即便系统中每部分都满足稳定条件, 级联系统仍然可能出现不稳定的现象。因此判断整个系统的稳定性问题可转化为研究前一级系统的阻抗和后一级系统阻抗匹配问题^[7]。

基于上述理论分析, 如图 5 所示级联系统的前级输出阻抗为

$$Z_o(s) = Z_s // (Z_{cr} + Z_{Lx}) \quad (6)$$

其中: $Z_s=L_s \cdot s$; $Z_{cr}=1/C_r \cdot s$; $Z_{Lx}=L_x \cdot s$ 。

如图 5 所示, 后级输入阻抗为

$$Z_{in}(s) = Z_{APFO} // Z_c \quad (7)$$

其中: Z_{APFO} 如式(5)所示, $Z_c=1/C \cdot s$ 。

定义级联系统等效环路增益 T_m 为

$$T_m = \frac{Z_o}{Z_{in}} \quad (8)$$

根据 Middlebrook 定理, 如果系统稳定, 要求在所有频率范围内, 满足 $\|T_m\| \ll 1$, 即:

$$\|T_m\| = \left\| \frac{Z_o}{Z_{in}} \right\| \ll 1 \quad (9)$$

故:

$$\|Z_o\| \ll \|Z_{in}\| \quad (10)$$

也就是说, 在所有频率范围内前级的输出阻抗远小于后级的输入阻抗, 系统稳定, 反之, 系统不稳定。

将表 1 中的系统参数分别代入式(6)和式(7), 得到图 6 所示的级联系统输入输出阻抗幅频特性图。

基于 Middlebrook 定理, 如果系统稳定需要满足式(10), 即输出阻抗 Z_o 的幅值远小于输入阻抗 Z_{in} 的幅值。图 6(a)为负载侧并联电容器取 $600 \mu\text{F}$ 时的输入输出阻抗幅频特性曲线图。图中实线表示输入阻抗 Z_{in} , 点划线表示输出阻抗 Z_o 。从图 6(a)看出, 输入阻抗与输出阻抗在频率 500 Hz 处发生相交。 Z_{in} 在 $1 \sim 500 \text{ Hz}$ 频带范围内大于 Z_o , 满足稳定性判据; 但在大于 500 Hz 频带范围内, Z_o 大于 Z_{in} , 不满足稳定性判据。依据 Middlebrook 判据, 在所有频率范围内, 输出阻抗并没有远小于输入阻抗, 因此整个级联系统不稳定。

图 6(b)为并联电容取 $200 \mu\text{F}$ 时候的输入输出阻抗幅频特性曲线图。类似于图 6(a)的分析, 输出阻抗和输入阻抗相交于 850 Hz 。在小于 850 Hz 的频带, 输出阻抗小于输入阻抗, 系统稳定; 但在大于

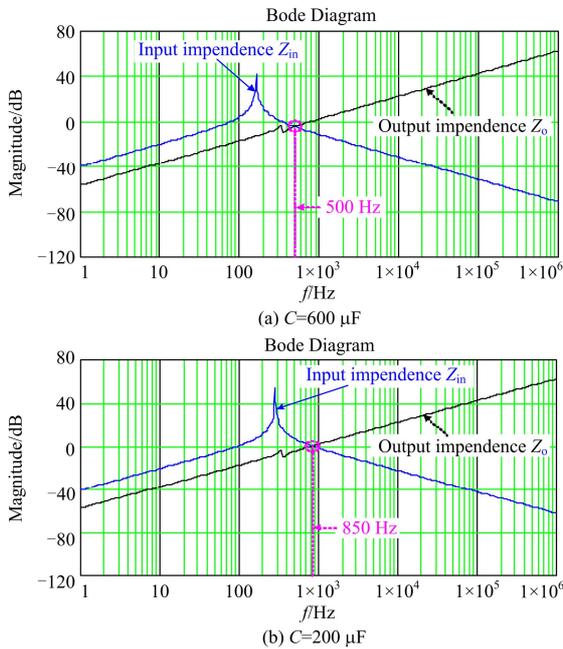


图 6 级联系统输入输出阻抗幅频特性图

Fig. 6 Input and output impedance amplitude-frequency characteristic of cascade system

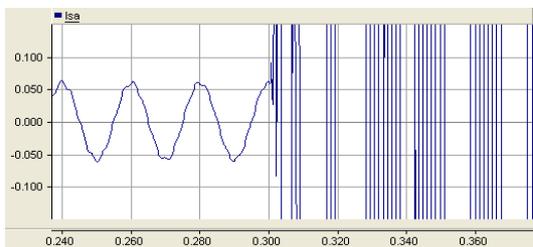
850 Hz 的频带，输出阻抗大于输入阻抗，系统不稳定。因此在所有频率范围内不满足稳定性判据，整个级联系统不稳定。

3 仿真结果

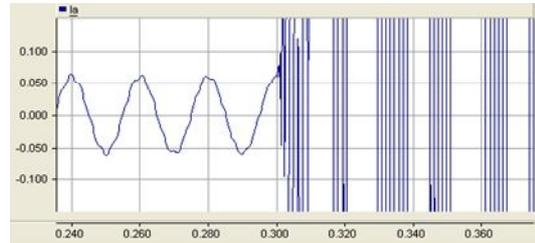
利用仿真软件 PSCAD 搭建仿真模型对系统进行仿真研究。仿真系统结构如图 1 所示，主要仿真参数如表 1 所示。

图 7 所示为不控整流桥交流侧并联电容容值为 600 μF 时的仿真结果。图 7(a)和图 7(b)分别表示网侧电流波形和负载侧电流波形，图 7(c)表示负载侧电流的频谱特性。

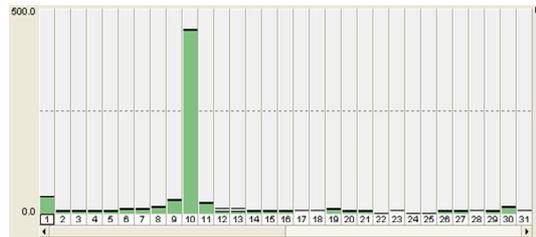
由图 7(a)和图 7(b)可知，APF 在 0.3 s 投入时，整个系统变得不稳定，网侧电流波形和负载侧电流波形出现严重振荡，且由图 7(c)负载电流频谱图可看出，负载侧电流在谐振频率处(500 Hz)被严重放大。



(a) APF 0.3 s 投入时网侧电流 I_s 波形(单位: 0.05 kA/div)



(b) APF 0.3 s 投入时负载电流 I_a 波形(单位: 0.05 kA/div)



(c) APF 投入后负载电流 I_a 频谱图

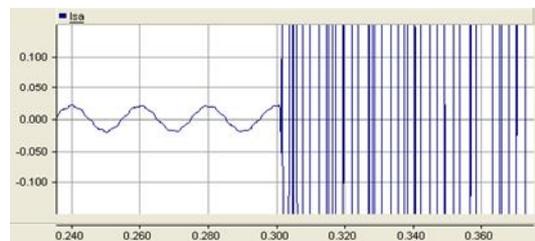
图 7 当 APF 0.3 s 投入时的仿真波形 (C=600 μF)

Fig. 7 Simulation result when APF is switched on at 0.3 s (C=600 μF)

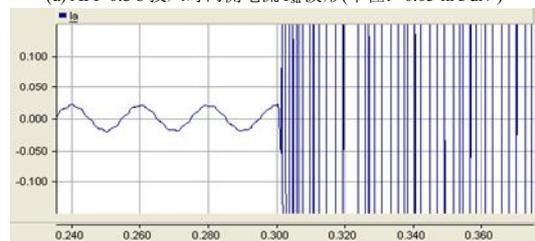
图 8 所示为不控整流桥交流侧并联电容容值为 200 μF 时的仿真波形。图 8(a)和图 8(b)分别表示网侧电流波形和负载侧电流波形，图 8(c)表示负载侧电流的频谱特性。

由图 7(a)和 7(b)可知，APF 在 0.3 s 投入时，整个系统不稳定，网侧电流波形和负载侧电流波形严重振荡，且由图 8(c)负载电流频谱特性图可知，负载侧电流在谐振频率(850 Hz)处被严重放大。

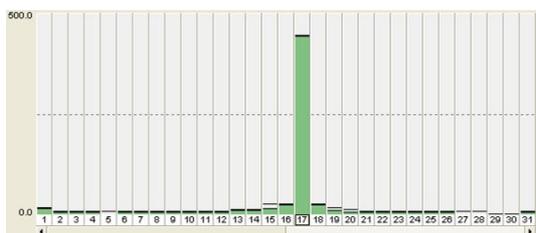
因此基于非线性负载交流侧并联不同电容值的仿真结果，进一步说明了输入和输出阻抗不匹配以及相互之间的影响是引起整个级联系统不稳定的根本原因，验证了理论分析的正确性。



(a) APF 0.3 s 投入时网侧电流 I_s 波形(单位: 0.05 kA/div)



(b) APF 0.3 s 投入时负载电流 I_a 波形(单位: 0.05 kA/div)

(c) APF 投入后负载电流 I_a 频谱图图 8 当 APF 0.3 s 投入时的仿真波形($C=200 \mu\text{F}$)Fig. 8 Simulation result when APF is switched on at 0.3 s ($C=200 \mu\text{F}$)

4 实验结果

为了验证上述理论分析的正确性, 在实验室搭建实验平台进行实验验证。主电路如图 1 所示, 整个实验系统结构如图 9 所示。

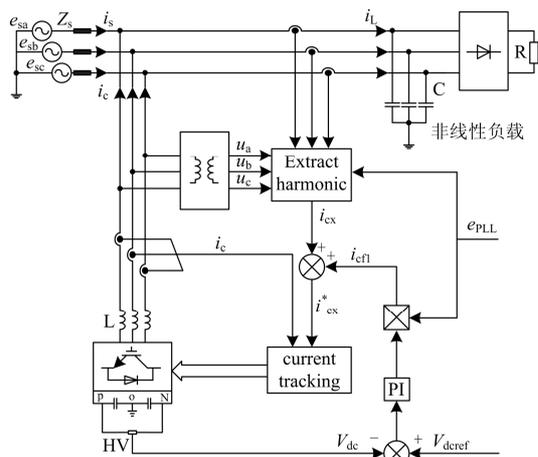


图 9 并联有源滤波器补偿容性非线性负载实验框图

Fig. 9 Configuration block diagram of experimental system

其中电网电压有效值 220 V, 电网频率 50 Hz, APF 直流母线电压参考值 780 V。实验中容性非线性负载由三相不控整流电路和交流侧并联无功电容器组成, 系统实验参数见表 1, 实验波形如图 10、图 11 所示。

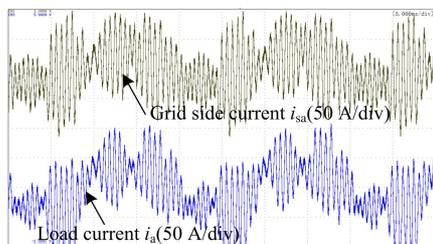
图 10 APF 投入时网侧电流和负载侧电流波形($C=600 \mu\text{F}$)Fig. 10 Experimental waveform when APF is switched on ($C=600 \mu\text{F}$)

图 10 所示为三相不控整流桥交流侧并联电容容值为 $600 \mu\text{F}$ 时的实验波形。

其中 i_{sa} 和 i_a 分别为 A 相网侧电流和 A 相负载侧电流。由图可知, 当 APF 投入后, 系统严重不稳定, 网侧电流波形和负载侧电流波形严重振荡, 谐振频率处其谐振峰值被严重放大。

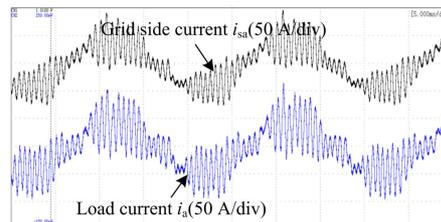
图 11 APF 投入时网侧电流和负载侧电流波形($C=200 \mu\text{F}$)Fig. 11 Experimental waveform when APF is switched on ($C=200 \mu\text{F}$)

图 11 所示为三相不控整流桥交流侧并联电容容值为 $200 \mu\text{F}$ 时的实验波形。

由图可知, 当 APF 投入后, 系统不稳定, A 相网侧电流波形和 A 相负载侧电流波形严重振荡, 谐振频率处其谐振峰值被严重放大。

因此, 基于并联不同电容值的非线性负载实验结果, 进一步验证了理论分析的正确性。

5 结论

本文研究了基于负载电流检测方式的并联型有源滤波器补偿容性非线性负载时的不稳定机理, 基于阻抗分析法推导级联系统的输入输出阻抗特性, 并根据级联系统稳定性判据的标准分析了不稳定产生的根本原因在于整个级联系统输入输出级阻抗不匹配, 存在相互影响, 最终仿真和实验结果验证了理论分析的正确性。针对谐波被严重放大的系统不稳定问题, 很多研究人员提出过解决方法, 其中有给并联电容器串接一定的电抗器, 改变原系统的固有谐振频率范围, 从而改变并联电容器与系统阻抗的谐振频率点的方法; 也有采用 FFT 算法变谐振点为开环控制从而降低补偿带宽, 补偿谐振点频率以外谐波的方法等, 上述几种解决方法具有一定的可借鉴性和实际意义。

参考文献

- [1] AKAGI H. Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 354-363.
- [2] 王群, 姚为正, 刘进军, 等. 谐波源与有源电力滤波器

- 的补偿特性[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 16-20.
- WANG Qun, YAO Weizheng, LIU Jinjun, et al. Harmonic source and compensation characteristics of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 16-20.
- [3] 刘聪, 戴珂, 张树全, 等. 并联型 APF 补偿电压源型非线性负载时谐波电流放大效应的研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 21-28.
- LIU Cong, DAI Ke, ZHANG Shuquan, et al. Harmonic current amplification effect of voltage-source type nonlinear load under compensation by shunt APF[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 21-28.
- [4] 张梦华, 程新功, 宗西举, 等. 基于电流电压内在关系的 SAPF 的 SVPWM 控制算法的研究及稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 1-8.
- ZHANG Menghua, CHENG Xingong, ZONG Xiju, et al. Research on SVPWM control algorithm and stability analysis of shunt active power filter based on the inner relationship between current and voltage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 1-8.
- [5] 郑丹, 廖敏, 刘振权, 等. 三相四线有源电力滤波器的三闭环控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 95-99.
- ZHENG Dan, LIAO Min, LIU Zhenquan, et al. Three closed loops control strategy of three-phase four-wire active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 95-99.
- [6] 易皓, 卓放, 翟灏. 基于矢量谐振调节器的有源电力滤波器网侧电流检测控制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 72-79.
- YI Hao, ZHUO Fang, ZHAI Hao. Research on source current detection type APF control scheme based on vector resonant regulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 72-79.
- [7] 张宸宇, 梅军, 郑建勇, 等. 基于内置重复控制器改进无差拍的有源滤波器双滞环控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 124-132.
- ZHANG Chenyu, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Active power filter double hysteresis method with improved deadbeat control based on built-in repetitive controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 124-132.
- [8] 马草原, 孙富华, 朱蓓蓓, 等. 神经网络算法的改进及其在有源电力滤波器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 142-148.
- MA Caoyuan, SUN Fuhua, ZHU Beibei, et al. Study on algorithm improvement of BP neural networks and its application in active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 142-148.
- [9] 吴涛, 阮新波. 分布式供电系统中负载变换器的输入阻抗分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 20-25.
- WU Tao, RUAN Xinbo. Input impedance analysis of load converters in the distributed power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(12): 20-25.
- [10] 吴隆辉, 卓放, 张鹏博, 等. 并联混合型有源电力滤波器稳定性及控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 54-60.
- WU Longhui, ZHUO Fang, ZHANG Pengbo, et al. Stability analysis and controller design of hybrid parallel active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 54-60.
- [11] 乔鸣忠, 夏益辉, 梁京辉, 等. 基于重复-PI 的复合控制应用于并联有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 54-59.
- QIAO Mingzhong, XIA Yihui, LIANG Jinghui, et al. Research on PI control based compound controller applying to shunt active filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 54-59.
- [12] 侯冲, 肖铁军, 范岩, 等. 并联型有源电力滤波器的 Matlab 仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(9): 11-17.
- HOU Chong, XIAO Tiejun, FAN Yan, et al. Research on shunt active power filter with Matlab simulation[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(9): 11-17.
- [13] 王兆安, 杨兆君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

收稿日期: 2015-08-14; 修回日期: 2015-12-23

作者简介:

李鹏(1979-), 男, 工程师, 研究方向为电能质量控制、光伏发电技术; E-mail: freemanlip@126.com

蒋晓明(1979-), 男, 副研究员, 研究方向为电力电子与电力传动;

黄俊华(1977-), 男, 信息系统项目管理师, 研究方向为电动汽车充电桩、光伏发电技术。

(编辑 葛艳娜)