

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201177

混合型多 APF 系统建模及共振抑制方案研究

杨剑锋, 王晓庆

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对多台 APF 系统相关的共振和稳定性问题, 建立了常规混合多 APF 系统的数学模型。基于该模型进行了其动态交互的数学理论分析, 提出了一种针对混合多 APF 系统削弱共振和提高系统稳定性的方案。其中多 APF 系统是由不同类型的模块 APF 组成, 每种模块具有不同的 LCL 滤波器参数、开关频率、载流量。在分析混合型多 APF 的动态交互的基础上, 得出了增加 LCL 滤波器电感可有效抑制不同模块 APF 之间的共振和耦合的结论。与目前传统模块化 APF 相比, 该混合型多 APF 系统可提供较宽的电流跟踪带宽、快速的动态响应速度以及较高的容量利用率。同时理论研究和仿真结果证明了该混合型多 APF 系统的共振抑制方案的可行性。

关键词: 有源电力滤波器; 数学模型; 动态交互; LCL 滤波器

Study on modeling of a hybrid multi-APFs system and resonance suppression scheme

YANG Jianfeng, WANG Xiaoqing

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To address the resonance and stability issues associated with a multi-APFs system, a mathematical model of the conventional hybrid multi-APFs system is established. Based on the model, a mathematical theory and dynamic interaction analysis are developed. A scheme for weakening resonance and improving system stability for the hybrid modular APF system is proposed. The multi-APFs system is composed of different types of modular APF. Each module has different LCL filter parameters, switching frequency, and current carrying capacity. Based on the analysis of the dynamic interaction of the hybrid multi-APFs, it is concluded that increasing the output filter inductance can effectively suppress the resonance and coupling between the APFs of different modules. Compared with the current traditional modular APF, the hybrid multi-APFs system can provide a wider current tracking bandwidth, a fast dynamic response speed, and higher capacity utilization. At the same time, theory and simulation results prove the feasibility of the resonance suppression scheme.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61863023).

Key words: active power filter; mathematical model; dynamic interaction; LCL filter

0 引言

随着大功率非线性负载在电网中的增加及用户对供电质量需求的提高, 无源和有源谐波抑制技术早已经成为研究的热点^[1-3]。但随着电力机车、大型冶炼炉等大功率非线性负荷的增加, 所需的谐波补偿容量也在快速增长。受限于器件容量, 传统单台三相并联型有源滤波器(Shunt Active Power Filter, SAPF)很难满足大容量谐波补偿的需求^[4-5]。目前 APF 扩容方面的技术手段有多电平级联、多重化主

电路结构以及混合型 APF 等, 上述方案应用在大容量谐波补偿场合中大都存在结构复杂、控制繁琐、实效性差等问题^[6]。

模块化 APF 可灵活应用于不同容量的谐波抑制场合。且具有较宽的电流跟踪带宽和快速的动态响应速度^[7-8], 但会遇到不同 APF 之间的 LCL 滤波器耦合和系统谐振等问题。文献[7]提出一种均流型模块化 APF, 其补偿电流在多个模块之间均匀分布, 与传统集中式 APF 结构相比在跟踪精度和动态响应方面明显增强, 但忽略了模块化 APF 共振和稳定问题, 很难在快速动态响应和稳定控制性能之间达到最佳平衡且容量利用率偏低。文献[8]提出一种模

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61863023)

块化 APF 数学建模思想, 分析得出模块化 APF 具有更宽的控制带宽, 但存在多模块并联运行时 LCL 滤波器耦合、线路阻抗变化、系统易谐振等问题。文献[9]中提出了两种简单的谐振抑制方案, 第一种方法以降低补偿精度为代价来降低重复控制强度, 第二种方法旨在通过增加一个阻尼电阻进而加强无源阻尼效应, 但产生了更多的功率损耗。文献[10]中提出一种多并联逆变器等效电路建模思想。在异步载波下分析了多并联逆变器的谐振特性, 通过改变 LCL 参数进而研究对多并联逆变器之间的共振影响, 但没有明确地提出如何改变系统控制参数会消除或者抑制共振现象。

针对上述模块化 APF 系统的谐振及稳定性问题, 本文提出一种针对混合型多 APF 系统削弱共振和提高系统稳定性的方案。首先基于 APF 的等效电路得出单台 APF 的等效输出阻抗, 进而构建常规混合型多 APF 系统的数学模型, 该模型体现不同类型的模块 APF, 每种模块具有不同的 LCL 滤波器参数、开关频率、载流量等。其次进行数学理论推导, 多 APF 系统稳定性验证以及不同模块 APF 之间的动态交互分析。最后得出增加 LCL 滤波器电感可有效抑制混合型多 APF 系统中不同模块 APF 之间的共振和耦合。理论研究和仿真结果证明该混合型模块 APF 系统与目前传统模块化 APF 相比, 可提供较宽的电流跟踪带宽和快速的动态响应速度, 同时验证了混合模块化 APF 系统的共振抑制方案的可行性。

1 APF 的等效输出阻抗

三台三相三线并联型 APF 系统拓扑结构如图 1 所示。APF 通过 LCL 滤波器并联接入公共连接点 (Point of Common Coupling, PCC)。其中 Z_{abc} 主要包括 L_{fi} 、 C_i 、 L_{cai} 、 Z_{cai} , 分别表示 APFi 的输出电感、滤波器电容、网侧电感、线阻抗。

根据图 1 的多 APF 系统结构, 以最常见非线性负载则是整流器为例, 负载的模型已在相关文献^[11]中进行了研究。采用输出阻抗法求解单台 APF 的等效输出阻抗, 为了便于分析, 负载简化为电流源 i_L 。由于三相三线制 APF 系统是对称的, 可使用单相电路进行研究^[12]。APF 的单相电路图如图 2 所示。

其中 $G_c(s)$ 和 $G_{pwm}(s)$ 分别为电流控制器的传递函数和脉宽调制功能 (PWM) 的传递函数。 i_f 、 i_{ref} 、 $i_L(s)$ 、 $i_0(s)$ 、 $U_0(s)$ 和 $z_f(s)$ 依次为等效电流源回路的有源滤波器输出电流、APF 输出电流的参考谐波电流、负载电流、系统的输出电流、系统的输出电压

和 APF 的输出阻抗。

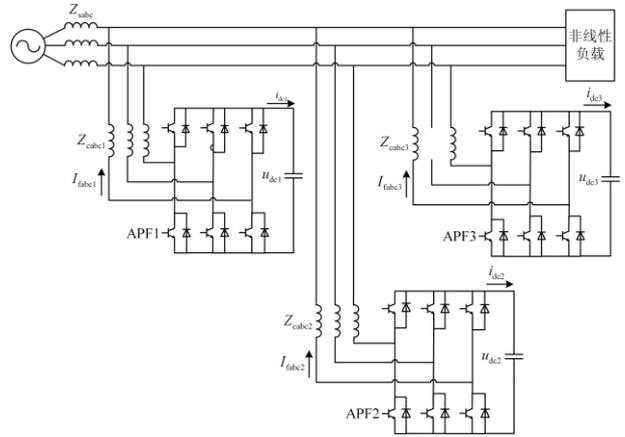


图 1 多台有源电力滤波器拓扑结构

Fig. 1 Topology of multiple active power filters

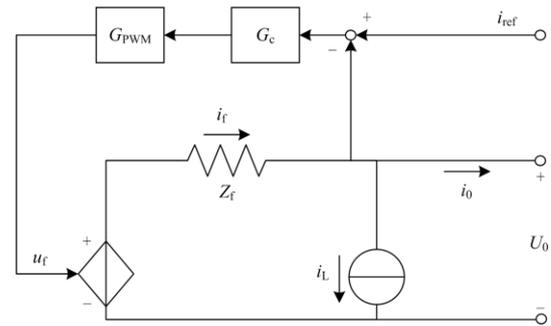


图 2 APF 单相等效电路图

Fig. 2 Single phase equivalent circuit of APF

式(1)为 APF 单相电路图的输出电压表达式。

$$U_0(s) = G_c(s)G_{pwm}(s)i_{ref}(s) - (G_c(s)G_{pwm}(s) + z_f(s))i_0(s) - (G_c(s)G_{pwm}(s) + z_f(s))i_L(s) \quad (1)$$

$$G_{pwm}(s) = \frac{k_{d1}}{T_{d1}s + 1} \quad (2)$$

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_r s}{s^2 + \omega^2} \quad (3)$$

由式(1)到式(3), 根据输出阻抗的定义得出 APF 的等效输出阻抗为式(4)^[13]。

$$z_{oi}(s) \Big|_{i_{ref}=0, i_L=0} = -\frac{U_0}{i_0} = G_c(s)G_{pwm}(s) + z_f(s) \quad (4)$$

由式(4)可知, 等效输出阻抗 $z_{oi}(s)$ 大小取决于 APFi 的输出电感 L_{fi} 、网侧电感 L_{cai} 、PWM 延迟时间、电流控制器等主要参数上。

2 多台 APF 数学模型

三台并联 APF 系统的单相电路图如图 3 所示。

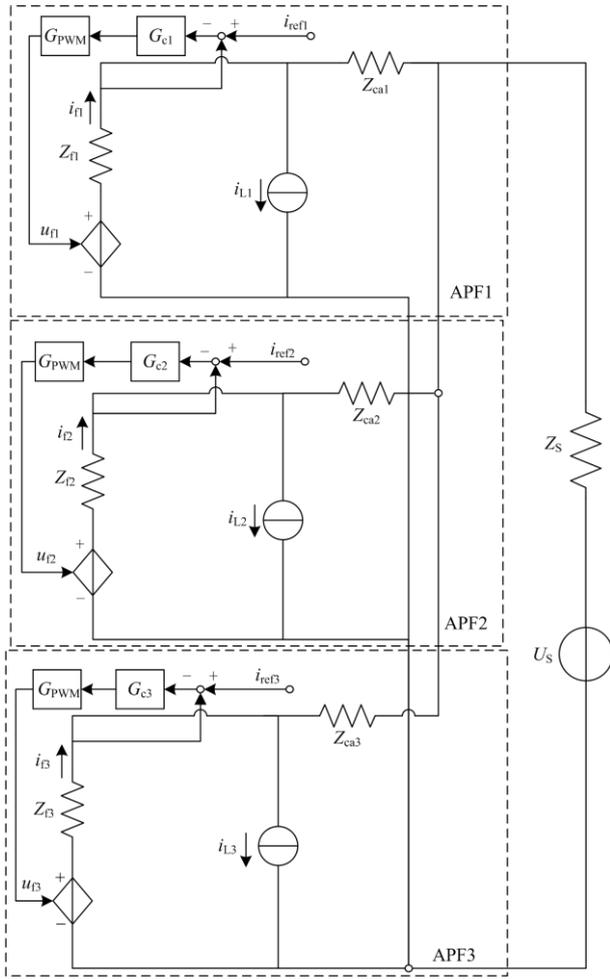


图 3 多台并联 APF 系统的单相电路图

Fig. 3 Single phase equivalent circuit of multiple parallel APFs system

同时对多台并联 APF 系统的单相电路图中的 APF2、APF3 进行了等效阻抗替换如图 4 所示。其中用等效输出阻抗 z_{oi2} 、 z_{oi3} 分别代替 APF2、APF3。依据基尔霍夫的电律和基尔霍夫的电律列写以下回路方程式。

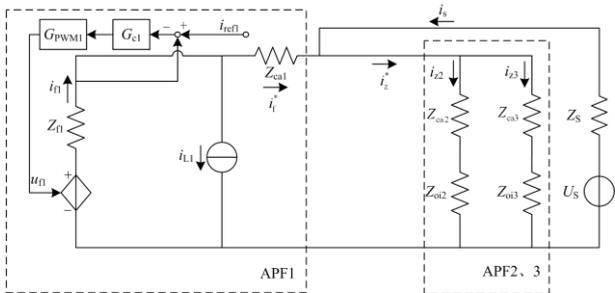


图 4 多台并联 APF 系统等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of multiple parallel APFs system

$$i_{f1}(s) = i_{L1}(s) + i_f^*(s) \quad (5)$$

$$i_z^*(s) = i_f^*(s) + i_s(s) \quad (6)$$

$$i_z^* = i_{z2} + i_{z3} \quad (7)$$

$$u_1(s) = i_{z2}(z_{oi2} + z_{ca2}) = i_{z3}(z_{oi3} + z_{ca3}) = \left[\frac{(z_{oi2} + z_{ca2})(z_{oi3} + z_{ca3})}{z_{oi2} + z_{ca2} + z_{oi3} + z_{ca3}} \right] i_z^*(s) \quad (8)$$

$$u_s(s) - u_1(s) = z_s(s)i_z(s) \quad (9)$$

$$u_{f1}(s) - u_1(s) = z_{f1}i_{f1}(s) + z_{ca1}i_f^*(s) \quad (10)$$

式中： u_s 是电网电压； z_s 是电网阻抗； i_{L1} 是 APF1 的负载电流； z_{f1} 是 APF1 输出滤波器阻抗； z_{ca2} 和 z_{ca3} 是 APF2 和 APF3 的 a 相线阻抗； z_{oi2} 和 z_{oi3} 分别是 APF2、APF3 的等效输出阻抗； u_{f1} 和 u_1 依次为 APF1 的输出电压和端口电压。式(11)为 APF1 的输出电流 i_{f1} 。

$$i_{f1}(s) = G_1(s)u_{f1}(s) + G_2(s)i_{L1}(s) - G_3(s)u_s(s) \quad (11)$$

$$G_1(s) = \frac{1}{\frac{z_s z_{o2,3}}{(z_s + z_{o2,3})} + (z_{f1} + z_{ca1})} \quad (12)$$

$$G_2(s) = \frac{\frac{z_s z_{o2,3}}{(z_s + z_{o2,3})} + z_{ca1}}{\frac{z_s z_{o2,3}}{(z_s + z_{o2,3})} + z_{ca1} + z_{f1}} \quad (13)$$

$$G_3(s) = \frac{1}{z_s} \cdot \frac{1}{\frac{(z_{f1} + z_{ca1})z_{o2,3}}{(z_{f1} + z_{ca1})} + z_{o2,3}} \quad (14)$$

$$z_{o2,3} = \frac{(z_{oi2} + z_{ca2})(z_{oi3} + z_{ca3})}{z_{oi2} + z_{ca2} + z_{oi3} + z_{ca3}} \quad (15)$$

其中， $z_{o2,3}$ 为 z_{oi2} 和 z_{oi3} 并联等效阻抗。多台并联型 APF 系统的开环传递函数应满足式(16)。

$$G_{oz1}(s) = \frac{i_{f1}}{i_{ref}} = G_1(s)G_{pwm}(s)G_c(s) = \frac{1}{\frac{z_s z_{o2,3}}{(z_s + z_{o2,3})} + (z_{f1} + z_{ca1})} \cdot \frac{k_{d1}}{T_{d1}s + 1} \cdot \left(k_p + \frac{k_r s}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (16)$$

将图 4 中三台 APF 并联等效电路图推广到 N 台 APF 并联运行时，其中 $z_{o2,3}$ 被 z_{oN} 替换。若想得到 N 台 APF 并联系统中第 i 个 APF 受剩余 $N-1$ 台 APF 的等效阻抗动态影响时，并联型 APF 系统的开环传递函数应满足式(17)，且 z_{oN} 需满足式(18)。

$$G_{oz_i}(s) = \frac{i_{fi}}{i_{ref}} = \frac{1}{\frac{z_s z_{oN}}{(z_s + z_{oN})} + (z_{fi} + z_{cai})} \quad (17)$$

$$\frac{k_{di}}{T_{di}s + 1} \cdot \left(k_{pi} + \frac{k_{ri}s}{s^2 + \omega^2} \right)$$

$$\frac{1}{z_{oiN}} = \frac{1}{z_{oi2} + z_{ca2}} + \dots + \frac{1}{z_{oi(i-1)} + z_{cai-1}} + \frac{1}{z_{oi(i+1)} + z_{cai+1}} + \dots + \frac{1}{z_{oin} + z_{can}} \quad (18)$$

3 混合型多 APF 系统动态交互

3.1 APF 等效输出阻抗的影响因子

通过建立混合型多 APF 系统的数学模型, 由多台并联型 APF 系统的开环函数式(16)可明确得出 APF1 的稳定性不单单取决于 APF1 自身参数, 同时也取决于 APF2、APF3 的等效输出阻抗、由电流控制器参数和 PWM 所引起的 APF2、APF3 所产生的延迟变化以及 APF2、APF3 的输出滤波器参数^[14]。

由式(4)可得出 APF 的等效输出阻抗的特性主要取决于输出电感 L_f 、网侧电感 L_{ca} 、PWM 延迟时间以及电流控制器参数^[15-16]。由于电流控制器参数和 PWM 延时函数较为固定, 所以对式(4)中各参数设定 $k_p=11$, $k_r=5$, $k_d=1$, $T_d=2$ ms 之后对单台 APF 进行波德图分析。本文主要考虑输出电感和网侧电感对 APF 等效输出阻抗的影响。从图 5 和图 6 所示的波德图可以看出, APF 的等效输出阻抗在中频范围内表现出电容特性, 随着频率的增加会体现出电感特性。同时得出使用较小的输出电感 L_f 和网侧电感 L_{ca} 可以增强 APF 等效阻抗的电容特性, 但该特性会影响另一个 APF 的动态补偿性能。

3.2 多 APF 系统动态交互分析

多台并联型 APF 系统的开环传递函数如式(16)所示, 进而可得到相应的波德图如图 7 和图 8。其中主要变量参数为 $L_{f2,3}$ 、 $L_{ca2,3}$ 。图 7 中当 $L_{f2,3}$ 变

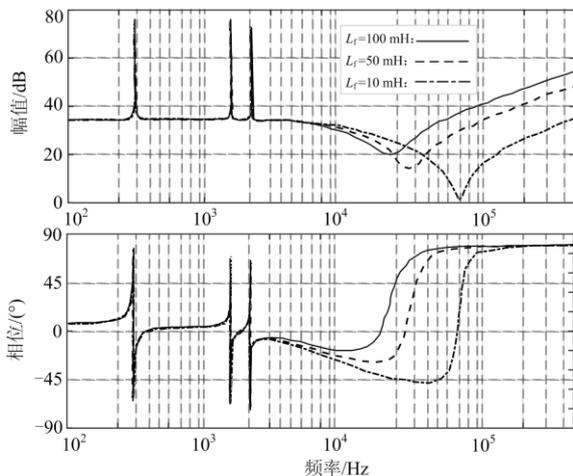


图 5 不同 L_f 情况下 APF 等效输出阻抗的波德图
Fig. 5 Bode diagram of APF equivalent output impedance When L_f varies

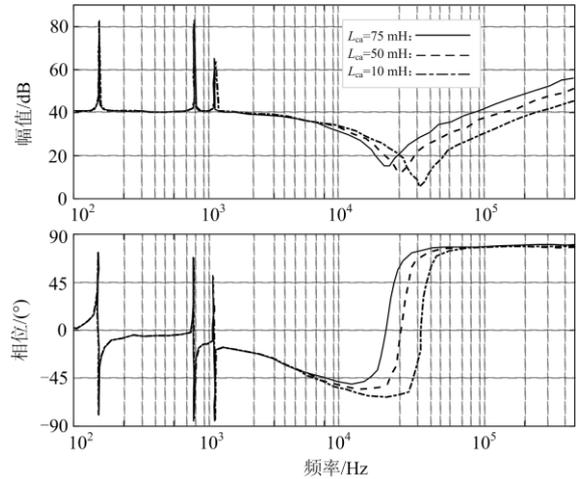


图 6 不同 L_{ca} 情况下 APF 等效输出阻抗的波德图
Fig. 6 Bode diagram of APF equivalent output impedance when L_{ca} varies

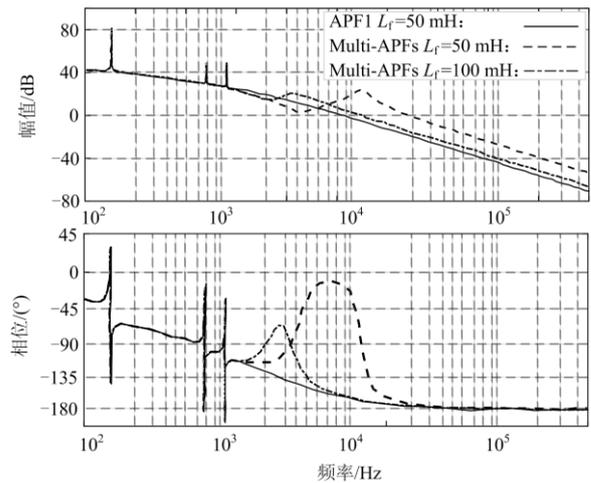


图 7 不同 $L_{f2,3}$ 时, APF1 和 APF1 与 APF2、APF3 并联的波德图
Fig. 7 Bode diagram of APF1 and APF1 in parallel with APF2, APF3 when $L_{f2,3}$ varies

化时, 其 APF2、APF3 的等效输出阻抗也在变化。与单台 APF1 相比, APF2、APF3 并行系统中的 APF1 由于 APF2、APF3 输出阻抗的影响, 会导致其带宽增加, 相位裕量减小, 此时 APF1 会趋于不稳定。当 L_{f2} 、 L_{f3} 值分别同时为 100 mH 和 50 mH 时, APF1 的相角裕量 γ 分别为 19° 和 10°, 幅值裕量 K_g 分别为 18 dB 和 3 dB。

图 8 为不同 $L_{ca2,3}$ 时, APF1 和 APF1 与 APF2、APF3 并联系统的波德图。与单台 APF1 相比, 考虑到 APF2、APF3 输出阻抗的影响, 多 APF 并联系统中 APF1 的相位裕量减小。同时, 混合型 APF 系统中 APF1 稳定性随着 $L_{ca2,3}$ 的减少而变差。当 L_{ca2} 、

L_{ca3} 值分别同时为 75 mH 和 37.5 mH 时, 多 APF 并联系统中 APF1 的相角裕量 γ 分别为 22° 和 13°。幅值裕量 K_g 分别为 35 dB 和 33 dB。

经验表明, 为了使系统具有良好的动态过程。相角裕量 γ 应在 30° 到 60°, 幅值裕量 K_g 应大于 6 dB^[17-20]。分析图 7 和图 8, 增大 $L_{f2,3}$ 和 $L_{ca2,3}$ 的数值可使多 APF 系统中的 APF1 趋于稳定。

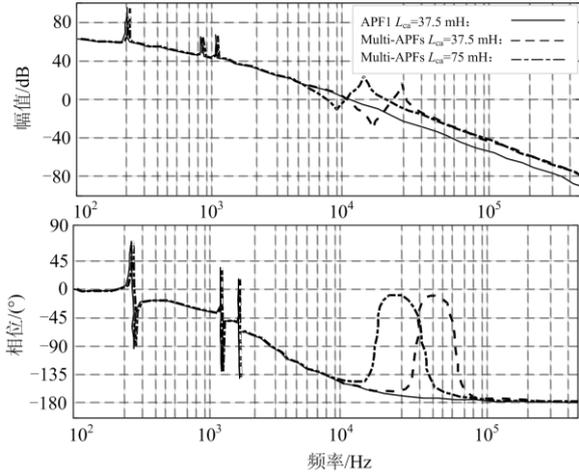


图 8 不同 $L_{ca2,3}$ 时, APF1 和 APF1 与 APF2、APF3 并联的波德图

Fig. 8 Bode diagram of APF1 and APF1 in parallel with APF2, APF3 when L_{ca2}, L_{ca3} varies

4 仿真实验

利用仿真软件 PLECS, 基于图 1 所示拓扑结构基础上搭建多台三相三线制并联 APF 仿真系统。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 多 APF 部分仿真参数

Table 1 Simulation parameters of multi-APFs

参数	数值
电源有效值 U/V	220
电源频率/Hz	50
逆变器开关频率 f/kHz	20、20、40、40
(100 A, 100 A, 50 A, 50 A)	
LCL 参数 $L_f/mH, C/\mu F, L_{ca}/mH$	(200, 20, 75)、(200, 20, 75)、
(100 A, 100 A, 50 A, 50 A)	(100, 10, 50)、(100, 10, 50)
APF 直流侧电容 $C/\mu F$	4 700
负载电阻 R/Ω	0.2
负载电感 L/mH	0.4
直流侧电容电压 U_{dc}/V	800

表 1 中大容量 APF 其额定电流为 100 A, 主要补偿低于 13 次的低次谐波, 小容量 APF 其额定电流为 50 A, 补偿高于 13 次的谐波^[21-23]。针对不同输出滤波器电感对不同容量 APF 的影响, 则额定电流为 100 A 的 APF 控制参数 $k_p=11, k_d=1, k_r=5,$

$T_d=2$ ms。额定电流为 50 A 的 APF 控制参数 $k_p=8, k_d=1, k_r=2.5, T_d=2$ ms。

图 9 为补偿前负载侧电流及其频谱, 总谐波畸变率为 24.65%。图 10 为 APF1、APF3、APF4 的输出补偿谐波, 其中 0.1~0.16 s 时 APF1 和 APF3 并联运行, 在 0.16 s 时并入额定电流为 50 A 的 APF4。在并入额定电流为 50 A 的 APF4 之后, 多 APF 并联系统侧输出谐波波形和补偿后谐波波形出现明显共振现象, 整个系统稳定性降低。图 11 为 0.16 s 之后 APF1、APF3、APF4 并联运行的系统负载侧电流及频谱, 其总谐波畸变率为 8.21%。

图 12 为 APF1、APF2、APF3 的输出补偿谐波, 补偿前负载侧电流及其频谱依旧如图 9 所示。其中 0.1~0.13 s 之间为 APF1、APF3 同时运行, 如图 12(a) 和图 12(d) 所示, 此时总谐波畸变率为 5.48%。在 0.13 s 时, 并入额定电流为 100 A 的 APF2。0.13 s 到 0.16 s

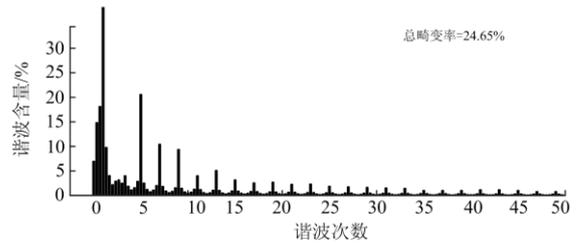
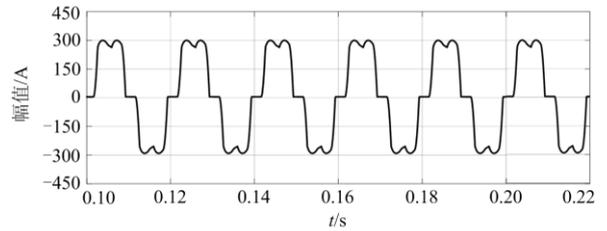
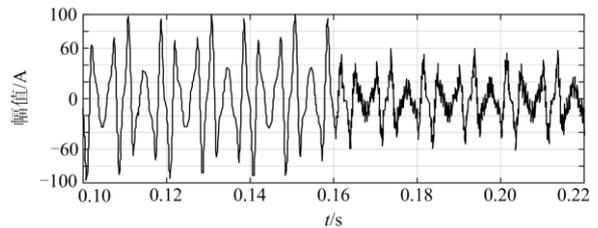
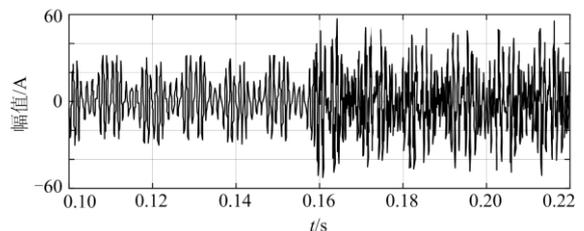


图 9 补偿前负载电流及频谱

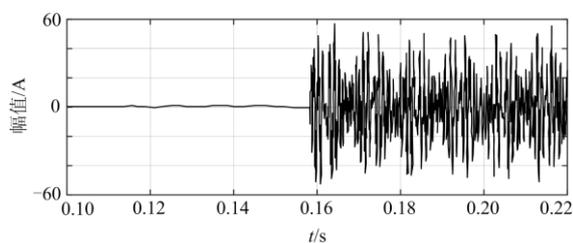
Fig. 9 Load current and spectrum before compensation



(a) APF1 补偿 13 次以下谐波的输出波形



(b) APF3 补偿剩余次谐波的输出波形



(c) APF4 并入系统的输出波形

图 10 APF1、APF3、APF4 的输出补偿谐波

Fig. 10 Output compensation harmonics of APF1, APF3, APF4

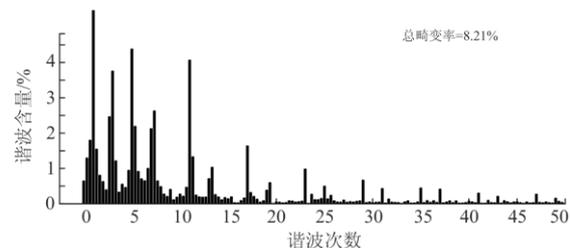
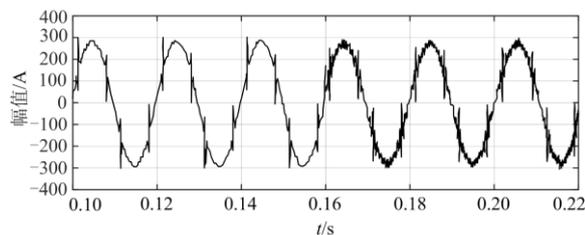
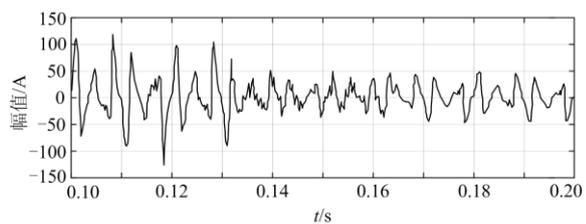
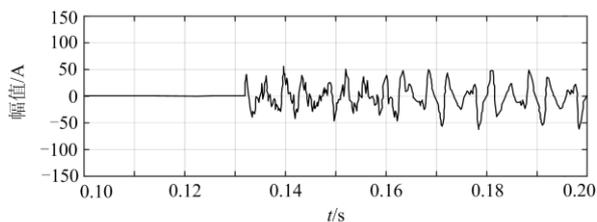


图 11 0.16 s 后 APF1、APF3、APF4 同时并入补偿后电流波形及频谱

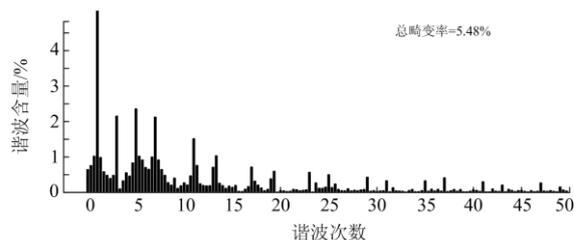
Fig. 11 Current waveform and spectrum after APF1, APF3 and APF4 are merged into the compensated current waveform at 0.16 s



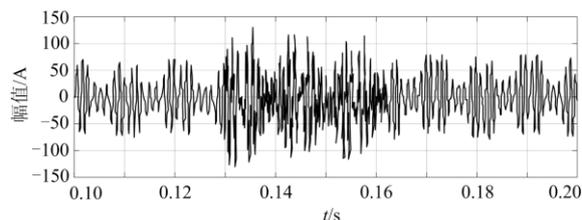
(a) APF1 补偿 13 次以下谐波的输出波形



(b) APF2 补偿 13 次以下谐波的输出波形



(c) 0.13 s 前 APF1 和 APF3 同时并入补偿后电流频谱



(d) APF3 补偿剩余次谐波的输出波形

图 12 APF1、APF2、APF3 的输出补偿谐波

Fig. 12 Output compensation harmonics of APF1, APF2, APF3

之间多 APF 并联系统侧输出谐波波形和补偿后谐波波形出现明显共振现象且整个系统稳定性降低。0.16 s 时, 通过增加 APF2、APF3 的滤波器电感 L_f 、 L_{ca} , 其 L_{f2} 从 200 mH 增大到 225 mH, L_{ca2} 从 75 mH 增大到 100 mH, L_{f3} 从 100 mH 增大到 125 mH, L_{ca3} 从 50 mH 增大到 75 mH。0.16 s 之后, APF1、APF2 趋于稳定。图 13 为 0.16 s 之后 APF1、APF2、APF3 并联运行的系统负载侧电流波形, 其总谐波畸变率为 2.69%。相比 0.1 s 到 0.13 s 之间 APF1、APF3 同时运行时的总谐波畸变率降低了 50.9%。

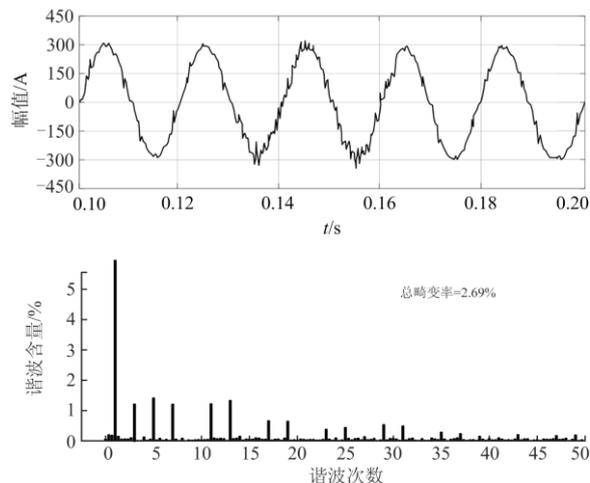


图 13 0.16 s 后 APF1、APF2、APF3 同时并入补偿后电流波形及频谱

Fig. 13 Current waveform and spectrum after APF1, APF2 and APF3 are merged into the compensated current waveform at 0.16 s

5 结论

本文中提出一种混合型多 APF 系统, 每个 APF 可拥有不同的载流量、LCL 滤波器参数以及开关频率。所涉及的混合型多 APF 系统与传统模块化 APF 相比, 不同容量 APF 搭配更加灵活且 APF 的容量利用率更高。由于模块化 APF 均存在共振和稳定性问题, 需对该混合型多 APF 系统进行稳定性分析。首先对常规混合型多 APF 系统进行数学模型分析, 将 APF 等效为输出阻抗并且通过波德图分析确定影响 APF 等效阻抗的因素。其次将 APF 等效阻抗连接到弱电网中, 进行多个不同容量 APF 的动态交互作用理论分析和仿真实验验证。

最后得出在不改变 APF 内部电流控制器和 PWM 电路结构的前提下, 可通过增加输出滤波器电感进而有效抑制不同模块 APF 之间的共振和耦合。所提出的分析方法不仅可以用于混合型多 APF 系统的动态交互, 也可适用于连接到弱电网中的其他多并联逆变器系统。

参考文献

- [1] 杨剑锋, 姜爽, 石戈戈. 基于分段改进 S 变换的复合电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 64-71.
YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Classification of composite power quality disturbances based on piecewise-modified S transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 64-71.
- [2] 王雪, 高云广, 吝伶俐, 等. 有源电力滤波器的研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 177-186.
WANG Xue, GAO Yunguang, LIN Lingyan, et al. Research status and prospects of active power filters[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 177-186.
- [3] 黄玉辉, 张涛, 刘东, 等. 基于模态分析的电动汽车充电站并网谐振研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(6): 617-624.
HUANG Yuhui, ZHANG Tao, LIU Dong, et al. Grid-connected resonance of electric vehicle charging station based on modal analysis[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 617-624.
- [4] 余攀, 瞿李锋, 杨泽洲, 等. 级联 H 桥混合型有源电力滤波器直流电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4866-4875, 4988.
YU Pan, QU Lifeng, YANG Zezhou, et al. Improved DC voltage control method for H-bridge-based hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4866-4875, 4988.
- [5] 胡忠山, 吴秋媚, 龚英明, 等. 谐波对高压直流输电系统换流站锁相环性能影响[J]. 广东电力, 2020, 33(11): 91-101.
HU Zhongshan, WU Qiumei, GONG Yingming, et al. Influence of harmonics on the performance of phase locked loop in HVDC converter station[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(11): 91-101.
- [6] 寇磊, 罗安, 楚焱. 具备多类型谐波治理能力的新型串联混合型有源滤波器[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2024-2029.
KOU Lei, LUO An, CHU Lang. A novel series hybrid active power filter capable of suppressing various types of harmonics[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2024-2029.
- [7] XU Q, CHEN G. A novel control strategy for multi-modular shunt active power filter system[C] // 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, June 9-12, 2015, Sydney, NSW, Australia: 1007-1012.
- [8] FENG Ling, WANG Yong. Modeling and resonance control of modular three-level shunt active power filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7478-7486.
- [9] WANG Y, XU Q, CHEN G. Simplified multi-modular shunt active power filter system and its modeling[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(6): 967-976.
- [10] WU Longhui, ZHUO Fang, ZHANG Pengbo, et al. Stability analysis and controller design of hybrid compensation system with parallel active power filter and parallel capacitors[C] // 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, FL, USA: 1105-1111.
- [11] CORRADINI L, MATTAVELLI P, CORRADIN M, et al. Analysis of parallel operation of uninterruptible power supplies loaded through long wiring cables[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(4): 1046-1054.
- [12] YAN X, WANG F, BORROYEVICH D, et al. DC-link voltage control of a full power converter for wind generator operating in weak grid systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(9): 2178-2192.
- [13] DANG P, PETZOLDT J, EILIGER T. Stability analysis of multi-parallel APF systems[C] // Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, August 30-September 1, 2011, Birmingham,

- UK: 1-8.
- [14] AGORRETA J L, BORREGA M, LÓPEZ J, et al. Modeling and control of paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 770-785.
- [15] ZHANG Y, MA H. Theoretical and experimental investigation of networked control for parallel operation of inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(4): 1961-1970.
- [16] LU M, WANG X, LOH P, et al. Resonance interaction of multi-parallel grid-connected inverters with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 894-899.
- [17] YU C, ZHANG X, LIU F, et al. Modeling and resonance analysis of multi-parallel inverters system under asynchronous carriers conditions[J]. IEEE transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 3192-3205.
- [18] YEPES A G, VIDAL A, LOPEZ O, et al. Evaluation of techniques for cross-coupling decoupling between orthogonal axes in double synchronous reference frame current control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3527-3531.
- [19] 林磊, 温步瀛. 基于动态特性的改进型 VSG 电压控制策略[J]. 广东电力, 2020, 33(11): 44-50.
LIN Lei, WEN Buying. Improved voltage control strategy of VSG based on dynamic characteristics[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(11): 44-50.
- [20] 李咸善, 董鑫, 程杉, 等. 微电网群频率调整的分层协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 1-14.
- LI Xianshan, DONG Xin, CHENG Shan, et al. Hierarchical coordinated control strategy for frequency adjustment of microgrid groups[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 1-14.
- [21] 游云峰, 李媛, 方番, 等. 级联多电平准 Z 源逆变器的无差拍并网控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 48-53.
YOU Yunfeng, LI Yuan, FANG Fan, et al. Deadbeat grid-connected control strategy of quasi-Z-source cascaded multilevel inverter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 48-53.
- [22] 郑征, 金建新, 陶海军, 等. 交直流混合微电网虚拟 APF 的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 11-17.
ZHENG Zheng, JIN Jianxin, TAO Haijun, et al. Research on virtual APF of AC/DC hybrid microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 11-17.
- [23] WU Y H, DONG X Z, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
-
- 收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-12-01
作者简介:
杨剑锋(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为先进控制技术, 电能质量控制理论; E-mail: jfyang@mail.lzjtu.cn
王晓庆(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。E-mail: 18634336824@163.com
(编辑 魏小丽)