

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210729

## 配网并串补模块交互影响分析与并补协同策略研究

贾东强<sup>1</sup>, 傅哲<sup>1</sup>, 陈泽西<sup>1</sup>, 孙玉树<sup>2</sup>, 刘洋<sup>3</sup>, 汪伟<sup>1</sup>

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100031; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;  
3. 国网黑龙江省电力有限公司超高压公司, 黑龙江 哈尔滨 150006)

**摘要:** 针对串并联电能质量补偿装置联合运行时潜在的谐波交互影响问题, 以串联电压型补偿装置 DVR、并联电流型补偿装置 APF 为例, 分析延迟效应的非线性因素对电网残余谐波电流的影响。构建基于 DVR 与 APF 联合运行的简化等效阻抗模型, 分析潜在并联谐振问题, 并给出解决方案。针对常态化重要负荷的谐波补偿问题, 对比分析单台式、阵列式 APF 等两类运行模式的特点及适用场合。针对模块化 APF 阵列运行损耗问题, 提出了基于等损耗微增率补偿策略的集中控制模式, 并开展了 APF 阵列的工程应用案例分析。

**关键词:** 非线性; 谐波; 交互影响; 阻抗模型; 并联谐振; 阵列式 APF; 等损耗微增率

### Interaction analysis between a series and parallel power quality conditioner as well as a parallel compensation strategy

JIA Dongqiang<sup>1</sup>, FU Zhe<sup>1</sup>, CHEN Zexi<sup>1</sup>, SUN Yushu<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>3</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Extrahigh Voltage Company, State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150006, China)

**Abstract:** The paper looks at the harmonic interaction between series and parallel power quality conditioner compensation. The voltage power quality conditioner DVR and parallel APF are taken as examples, and an analysis is carried out on the harmonic effect caused by the nonlinear nature of delayed effects. Simplified equivalent impedance models based on DVR and APF are built, potential parallel resonance is analyzed, and several solutions are presented. For the harmonic compensation of normal important loads, the features and suitable occasions of single/array APF are also analyzed and compared. For the operating losses of array APF, a centralized control mode based on the equal loss incremental rate compensation strategy is proposed, and then an engineering study related to array APF is carried out.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFE0123600).

**Key words:** nonlinear; harmonic; interaction; impedance model; parallel resonance; array APF; equal loss incremental rate

## 0 引言

随着我国高精尖等敏感工业的迅速发展, 电能质量问题已成为该领域日益关切的问题<sup>[1-5]</sup>, 而各种电力电子补偿装置已成为维持敏感负荷正常运行、保证重要工业园区电能质量需求的可靠保障<sup>[6-7]</sup>。然而, 电力电子装置本身也是一种谐波源, 当某敏感负荷所在馈线支路同时带有多种电力电子装置时, 很可能由于装置之间缺乏相应的协调控制, 装置之

间相关参数不匹配导致了不必要的交互影响<sup>[8-11]</sup>。鉴于谐振问题会对配电网电能质量治理装置的补偿效果甚至系统的稳定性有重要影响, 本文以串联电压型补偿装置动态电压恢复器(DVR)<sup>[12-17]</sup>、并联电流型补偿装置有源滤波器(APF)<sup>[18-28]</sup>不共直流母线的运行方案为例, 研究了两者之间潜在的并联谐振耦合问题, 分析其产生机理并提出了相应的解决方案, 并结合时域仿真对相关结论进行验证; 最后以重要负荷的谐波电流补偿为例, 研究阵列式 APF 模块的联合运行模式, 从而可为多台 DFACTS 装置的联合运行提供部分参考依据及理论指导。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2019YFE0123600)

## 1 串并联补偿装置建模

### 1.1 DVR 与 APF 联合运行拓扑结构模型

DVR 与 APF 联合运行的单相拓扑结构示意图如图 1 所示, 其中  $i_s$ 、 $i_L$  分别表示电网侧、负荷侧电流。 $V_s$ 、 $V_L$  分别表示电网侧、负荷侧电压。 $L_1$ 、 $R_1$ 、 $C_1$  分别表示 DVR 的滤波电感、等效电感电阻及滤波电容,  $L_2$ 、 $R_2$  分别表示 APF 的连接电抗器及电阻,  $i_1$ 、 $i_2$  分别表示 DVR、APF 的滤波电感电流。而敏感负荷端为线性与非线性的混合负载。

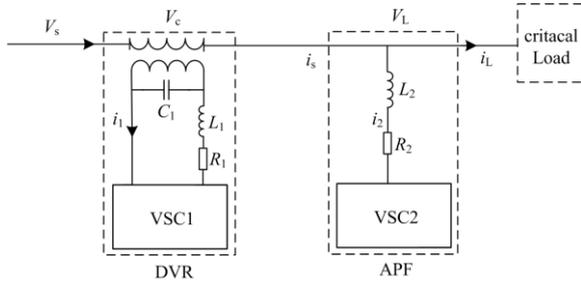


图 1 DVR 与 APF 联合运行拓扑示意图

Fig. 1 Topological schematic of DVR and APF combined operation

当  $V_s$  出现跌落时, DVR 将从旁路状态切换至运行状态, 注入相应的补偿电压  $V_c$ , 从而使得负荷端敏感负荷电压  $V_L$  维持在正常范围内。而 APF 始终处于补偿状态, 若将 DVR 与 APF 的变流器分别等效为理想电压源  $E_1$ 、 $E_2$ , 则图 1 可简化为图 2。

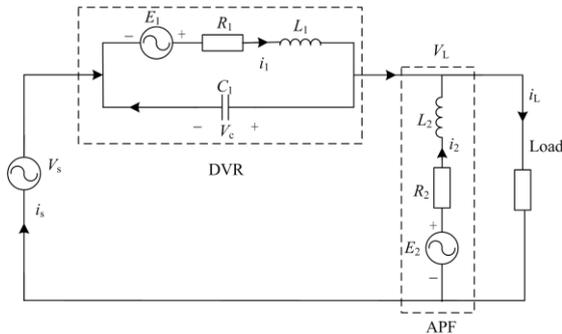


图 2 DVR 与 APF 联合补偿等效示意图

Fig. 2 Equivalent schematic of DVR and APF combined compensation

### 1.2 DVR 与 APF 联合运行的输出阻抗模型

#### 1.2.1 DVR 等效输出阻抗模型

在重要用户电压质量治理方面, 实际工程应用对装置的响应速度要求较高, 本文以 DVR 采用开环控制策略为例进行分析, 则有

$$V_c = \frac{1}{L_1 C_1 S^2 + R_1 C_1 S + 1} E_1 - \frac{L_1 S + R_1}{L_1 C_1 S^2 + R_1 C_1 S + 1} i_s \quad (1)$$

将图 1 中电网侧 DVR 等效为电压源  $u_1$  与输出阻抗  $Z_1$  串联, 将 APF 等效为电流源  $i_{APF}$  与相应的阻抗  $Z_{APF}$  并联, 如图 3 所示。

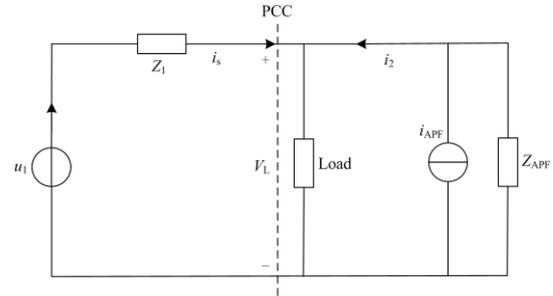


图 3 DVR 与 APF 联合运行的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of DVR and APF combined operation

则负荷电压可表示为

$$V_L = u_1 - Z_1 i_s \quad (2)$$

其中等效电压源  $u_1$ , 等效输出阻抗  $Z_1$  表达式分别为

$$u_1 = \frac{1}{L_1 C_1 S^2 + R_1 C_1 S + 1} E_1 + V_s \quad (3)$$

$$Z_1 = \frac{L_1 S + R_1}{L_1 C_1 S^2 + R_1 C_1 S + 1} \quad (4)$$

#### 1.2.2 APF 等效输出阻抗模型

如图 3 和图 4 所示, 当 APF 采用最简单的 PI 控制策略时, 令参考电流  $i_{ref}$  为 0, 则 APF 的输出阻抗  $Z_{APF}$  为

$$Z_{APF} = L_2 S + R_2 + K_{p2} + K_{i2} / S \quad (5)$$

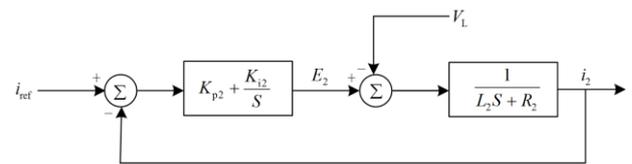


图 4 APF 控制回路

Fig. 4 Control circuit of APF

## 2 DVR 与 APF 并联谐振

### 2.1 非线性因素对 APF 性能的影响

#### 2.1.1 APF 非线性因素分析

APF 虽然是一种改善电流电能质量的补偿装置, 但由于其本身就是电力电子装置, 其固有的死区效应、器件的非线性特性均会引起一定的谐波电流; 同时由于 APF 采用数字控制, 其采样、检测运算以及补偿等控制环节均存在着一定的延时, 也导致了补偿后的电网电流存有一定的谐波残余。

#### 2.1.2 APF 死区效应对补偿性能的影响

单台逆变器死区时间占开关周期比例较小, 但

是多台装置并联时不能忽略死区因素引起的低次谐波积累, 已有文献将死区效应及器件非理想特性引起输出电压波形损失以平均误差电压近似, 即相当于一个幅值不变、方向由变流器交流电流决定的谐波电压扰动量<sup>[29]</sup>。

### 2.1.3 APF 滞后效应对补偿性能的影响

跟负荷侧谐波电流相比, 采用数字控制的 APF 补偿的谐波电流会出现一定的相位滞后<sup>[30-31]</sup>, 这种滞后是由于数字控制及硬件固有的缺陷造成, 具体可分为以下 3 个方面。

1) 在负载侧电流检测环节, 电流传感器根据电磁感应原理检测的负荷电流相对实际负荷电流存在一定的相位滞后。

2) APF 在提取谐波电流阶段, 由于其数字式控制器(例如 DSP)至少需要一个采样周期的运算时间, PWM 变流器自身建立电压需要一定的时间, 很可能导致算法中  $d/q$  变换与  $q/d$  变换的角度发生变化, 进而引起检测电流滞后。

3) APF 在电流补偿阶段, 由于开关管的死区效应及导通、关断等因素的影响, 造成了补偿电流存在一定的滞后。

以三相整流桥非线性负载为例, 设其交流侧方波的幅值为  $I_d$ , 通过傅里叶分解, 可得 a 相非线性负载电流  $i_{La}$  可表示为

$$i_{La} = I_1 \sin \omega t - I_5 \sin 5\omega t - I_7 \sin 7\omega t + I_{11} \sin 11\omega t + I_{13} \sin 13\omega t - I_{17} \sin 17\omega t - I_{19} \sin 19\omega t + \dots \quad (6)$$

其中基波、 $n$  次谐波幅值表达式分别为

$$\begin{cases} I_1 = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \\ I_n = \frac{I_1}{n} \end{cases} \quad (7)$$

若 APF 输出的电流相位滞后  $\Delta t$ , 并且不考虑其本身死区效应引起的电流谐波, 则 APF 输出的  $n$  次谐波电流  $i_{can}$  可表示为

$$i_{can} = I_n \sin n\omega(t - \Delta t) \quad (8)$$

则补偿后电网侧  $n$  次残余谐波  $i_{san}$  可表示为

$$i_{san} = I_n \sin n\omega t - I_n \sin n\omega(t - \Delta t) = \frac{2}{n} I_1 \sin \frac{n\omega\Delta t}{2} \cos \left( n\omega t - \frac{n\omega\Delta t}{2} \right) \quad (9)$$

令  $n$  次残余谐波占负荷基波电流幅值的比例为  $M_{Isan}$  为

$$M_{Isan} = \left| \frac{2}{n} \sin \frac{n\omega\Delta t}{2} \right| \quad (10)$$

作出  $M_{Isan}$  随谐波次数  $n$ 、延迟时间  $\Delta t$  变化关联关系示意图, 如图 5 所示。

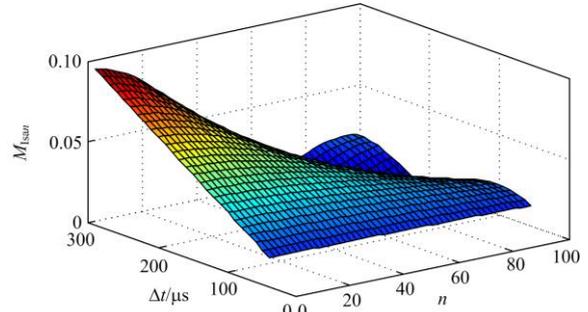


图 5  $M_{Isan}$  随  $n$ 、 $\Delta t$  变化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of  $M_{Isan}$  with  $n$  and  $\Delta t$  change

由图 5 可知, 残余谐波电流与延迟时间有较大关联。假设延迟时间在  $300 \mu s$  内, 则随着延迟时间的增加, 低次谐波残余电流的幅值将增加, 而高次谐波电流幅值随延迟时间的增加呈波动变化。

## 2.2 DVR 与 APF 联合运行的输出阻抗模型

由上文可知, APF 在补偿非线性负荷时会使得电网侧电流存在一定的谐波残余, 尤其是当 APF 并联的数量较多时, 其注入的谐波电流累积效应将会对 DVR 的补偿效果造成严重影响。若将混合负载中的非线性部分等效为电流源  $i_{L2}$ , 则图 3 可简化为图 6。

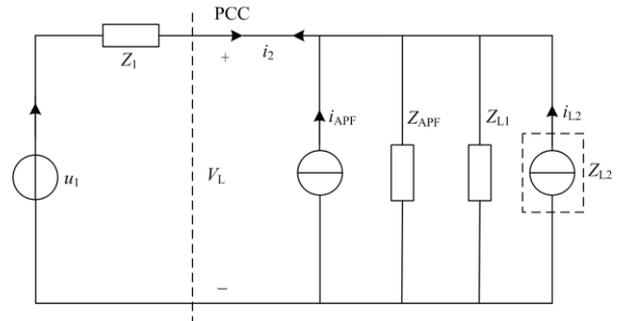


图 6 DVR 与 APF 联合运行的简化等效电路

Fig. 6 Equivalent simplified circuit of DVR and APF combined operation

图 6 中  $Z_{L1}$  表达式为

$$Z_{L1} = R_z + L_z S \quad (11)$$

$Z_{L1}$  表示混合敏感负荷中的线性负荷,  $Z_{L2}$  表示非线性负荷, 等效为电流源  $i_{L2}$ 。

## 2.3 DVR 与 APF 联合运行并联谐振分析

若不考虑图 3 中电压源  $u_1$  的作用, 将混合负载中的线性部分  $Z_{L1}$  与 APF 等效阻抗  $Z_{APF}$  并联等效为阻抗  $Z_2$ , 将非线性负载  $Z_{L2}$  与 APF 电流源  $i_{APF}$  进一步等效为电流源  $i_{2s}$ , 则图 6 可简化为图 7。

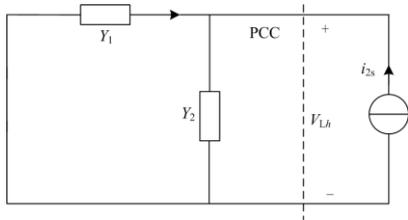


图7 并联谐振等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of parallel resonance

其中等效谐波电流源  $i_{2s}$  为

$$i_{2s} = i_{APF} + i_{L2} \quad (12)$$

导纳  $Y_1$ 、 $Y_2$  分别与阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  对应, 其表达式分别为

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{1}{Z_1} \\ Y_2 = \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{APF}} \end{cases} \quad (13)$$

图7中阻抗  $Y_1$  与  $Y_2$  构成一个新的并联系统, 若设并联后的总阻抗为  $Z_h$ , 则由电流源  $i_{2s}$  引起的电压可表示为

$$V_{Lh} = i_{2s} Z_h = \frac{i_{2s}}{Y_1 + Y_2} \quad (14)$$

由式(14)可知, 若  $Y_1$  与  $Y_2$  在某频率处幅值接近相等, 相位接近相反时, 总并联等效导纳最小, 电路在谐波源  $i_{2s}$  的激励下引起准并联谐振, 严重时甚至导致负荷电压畸变, 系统失稳。

表1表征了 DVR、APF 以及混合负载(线性部分)的相关参数, 负载的非线性部分以三相整流桥予以模拟。在表1的参数下, 分别作出  $Y_1$ 、 $Y_2$  的导纳 Bode 图和  $Z_1$ 、 $Z_h$  的阻抗 Bode 图, 如图8、图9所示。

从图8、图9可知, 在约 550 Hz(11 次谐波)处系统总导纳最小, 由谐波电流源引起的谐波电压最大。同时, 由于 DVR 输出阻抗  $Z_1$  在大部分频段远小于等效负载  $Z_2$ , 则系统的并联总阻抗  $Z_h$  的 Bode 图近似于  $Z_1$  的 Bode 图。系统的并联谐振频率、谐振峰值也与  $Z_1$  的谐振频率与峰值有较大关联。

表1 DVR、APF 及负荷参数

Table 1 Parameters of DVR, APF and loads

装置/负荷	参数类型	数值
DVR	$R_1$	0.2 $\Omega$
	$L_1$	2 mH
	$C_1$	40 $\mu$ F
APF	$R_2$	0.1 $\Omega$
	$L_2$	2 mH
	$K_{P2}$	100
负荷 (线性部分)	$R_c$	100 $\Omega$
	$L_c$	20 mH

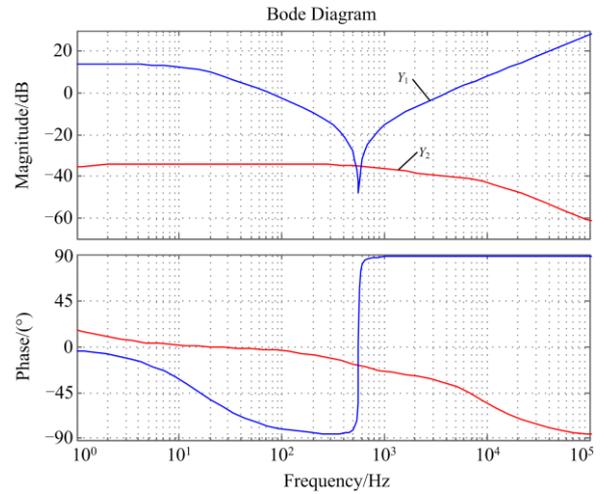

 图8  $Y_1$ 、 $Y_2$  的导纳 bode 图

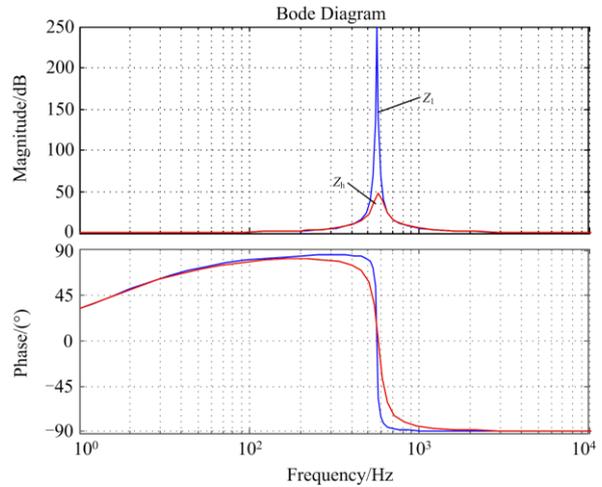
 Fig. 8 Admittance bode diagram of  $Y_1$  and  $Y_2$ 

 图9  $Z_1$ 、 $Z_h$  的阻抗 Bode 图

 Fig. 9 Impedance Bode diagram of  $Z_1$  and  $Z_h$ 

由式(4)可知,  $Z_1$  在角频率  $\omega_n$  处的幅值可表示为

$$|Z_1| = \sqrt{\frac{R_1^2 + (L_1 \omega_n)^2}{(R_1 C_1 \omega_n)^2 + (1 - L_1 C_1 \omega_n^2)^2}} \quad (15)$$

对式(15)求导, 可得系统的并联谐振频率近似为

$$\omega_{res} = \sqrt{-\left(\frac{R_1}{L_1}\right)^2 + \sqrt{\frac{2R_1^2}{L_1^3 C_1} + \frac{1}{L_1^2 C_1}}} \quad (16)$$

将表1中数据代入式(16), 可得谐振频率  $\omega_{res}$  约为 562 Hz, 即系统将在 11 次谐波处发生并联谐振, 与图8、图9处分析结果相符合。

## 2.4 仿真验证

为验证 DVR 与 APF 联合运行时出现的并联谐振现象, 利用 PSIM 软件搭建两补偿装置的平均模型, 并且对两装置联合运行的环境进行仿真。仿真

参数同表 1, a 相仿真结果见图 10。

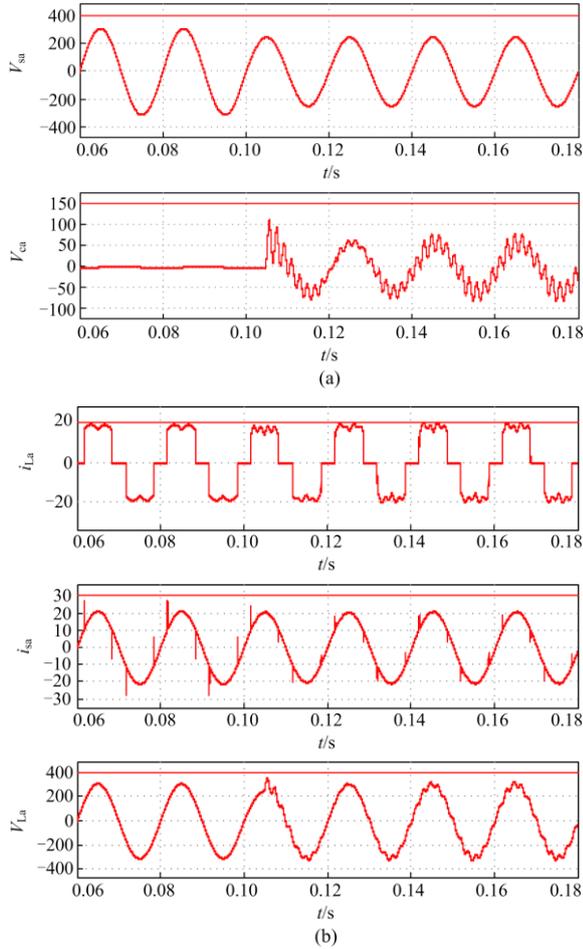


图 10 APF 与 DVR 联合运行的补偿结果  
 Fig. 10 Compensation results of APF and DVR combined operation

图 10(a)自上而下分别表示电网侧电压  $V_{sa}$ 、DVR 补偿的电压  $V_{ca}$ ；图 10(b)图自上而下分别为负荷侧电流  $i_{La}$ 、APF 补偿后的电网侧电流  $i_{sa}$  以及负荷侧电压  $V_{La}$ ，三者所对应的频谱见图 11，所对应的 THD 分别为 30.82%、4.43% 和 7.75%。

从图 10、图 11 中可知， $V_{sa}$  在 0.1 s 处出现 20% 跌落，DVR 投入运行。由于受到 APF 与非线性负荷等效谐波电流源  $i_{2s}$  的激励，系统在 11 次谐波处出现谐振，从而使得  $V_{ca}$  中叠加了 11 次谐波电压。此时，虽然经过 APF 补偿后的电网电流  $i_{sa}$  满足要求 ( $THD < 5\%$ )，但是经过 DVR 补偿后的负荷电压  $V_{La}$  出现了畸变 ( $THD > 3\%$ )。

### 2.5 解决方案

由上文可知，系统的并联谐振频率、峰值主要取决于 DVR 输出阻抗的谐振频率、峰值。因此可以从谐波源、DVR 输出阻抗两方面降低并联谐振对

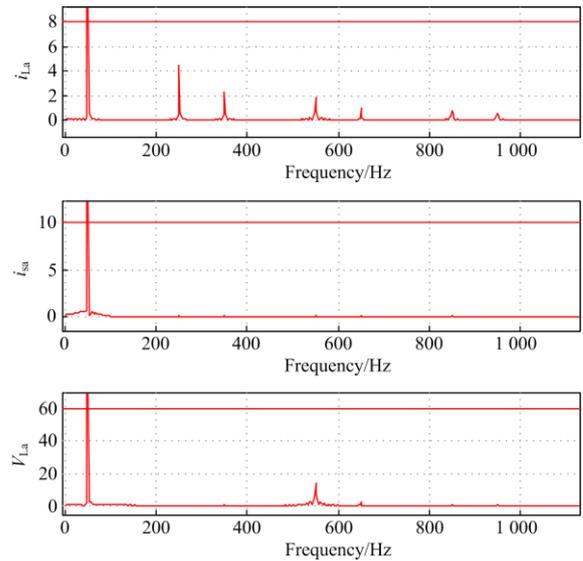


图 11  $i_{La}$ 、 $i_{sa}$  及  $V_{La}$  频谱分析示意图  
 Fig. 11 FFT analysis of  $i_{La}$ 、 $i_{sa}$  and  $V_{La}$

负荷电压的影响。

谐波源方面：APF 检测、补偿等造成的延迟效应、开关器件的死区效应及非理想特性都会使得电网侧出现谐波电流，因此改进 APF 的检测算法，采用各种补偿非线性因素的控制算法均可有效降低等效谐波电流源的影响。

输出阻抗方面：DVR 采用开环控制时，其输出阻抗的谐振峰值较大，因此可采取措施增加 DVR 输出滤波器的阻尼，包括硬件本身的无源阻尼和各种改进控制算法所对应的有源阻尼<sup>[32]</sup>，从而有效地降低系统并联谐振的谐振峰值。

## 3 模块化 APF 阵列

### 3.1 APF 运行模式

在配网负载端由于非线性因素产生谐波电流时，可采用 APF 进行补偿，形式上可采用单台大容量 APF 独立补偿、阵列式 APF 模块协同补偿等模式。

当负载端敏感重要程度较高，例如谐波电流会造成严重的社会经济影响时，需考虑补偿装置的冗余备用和返修更换的便捷性。两种模式的特点对比分析如下。

#### 3.1.1 单台 APF 独立补偿模式

1) 可靠性：单台装置日常运行操作相对简单，缺点是冗余备用功能，若出现故障，则需整体退出运行，存在谐波补偿的真空期，设备检修或部件更换的成本较高。

2) 灵活性：无法根据电网中负荷的变化或者现

场工程需求, 调整所投入的模块数量, 补偿的灵活性较低。

3) 适用场合: 适用于负载侧敏感重要程度较低、谐波扩散影响较轻的场所。

### 3.1.2 阵列式 APF 模块协同补偿模式

1) 可靠性: 多 APF 模块化并联运行需协同运行, 具备冗余备用功能。如果其中一台 APF 模块发生故障或者需要检修, 则其余模块可以继续分担补偿功能, 可实现全部或者部分补偿功能, 设备检修或部件更换的成本较低, 提高了补偿的可靠性。

2) 灵活性: 可根据负荷的增加, 分期分批次安装 APF 模块, 减少初期投资; 可根据电网中负荷的变化或者现场工程需求, 灵活调整所投入的模块数量, 提高补偿的灵活性和运行效率。

3) 适用场合: 适用于负载侧敏感重要程度较高、谐波扩散影响较强的场所。

## 3.2 模块化 APF 阵列

重要用户负载端如有谐波电流扩散进入电网时, 可能会对用电造成潜在不良影响。因此本节主要以重要用户的谐波电流补偿为目标, 研究阵列式 APF 模块的协同运行方法。

当 APF 阵列采用集中式控制策略时, 如何分配参考补偿电流成为重点。由于 APF 长期挂网运行, 设备的损耗会影响设备的使用寿命, 本文拟从损耗的角度研究多 APF 模块的协同运行方案。

装置的变流器损耗包括 IGBT 损耗和反并联二极管损耗, 以三相四线式的 APF 为例, 在三相平衡的情况下, 经过理论推导, 单台 APF 在某次谐波处的损耗可简单近似为

$$P_{\text{loss}_k} = a_k I_m^2 + b_k I_m \quad (17)$$

式中:  $I_m$  为 APF 注入该频次谐波电流幅值;  $k$  为 APF 编号; 系数  $a_k$ 、 $b_k$  与 IGBT 曲线、反并联二极管特性等参数相关。

在负荷侧总谐波电流一定的情况下, 基于模块化 APF 阵列所补偿的总谐波为定值。但是由于各 APF 所采用的功率器件等硬件参数的区别, 导致了 APF 的自身损耗会存在着差异。因此, 可将总运行损耗作为主要的考量因素对 APF 模块分配参考电流。

在电力系统的经济运行理论中, 等微增率准则在发电厂间有功功率负荷的经济分配中有着广泛的应用。因此, 可采用类似的思路将多台 APF 并联运行时参考电流的分配问题转化为损耗的经济分配问题。其目的在于: 在多台 APF 补偿系统提供定额补

偿电流的前提下, 使得单位时间里的总运行损耗最少。

以图 12 为例, 对每台 APF 而言, 某频次谐波导致的损耗实际上可以表示为其输出电流的数学函数, 所对应的目标函数可表示为

$$P_{\text{loss}} = \sum_1^n P_{\text{loss}_k} = \sum_1^n (a_k I_k^2 + b_k I_k) \quad (18)$$

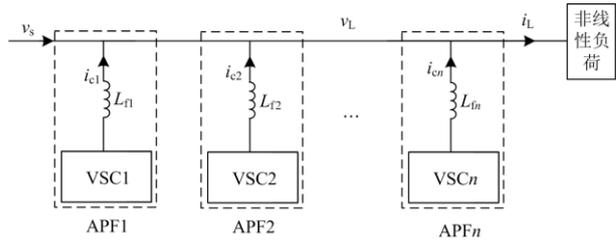


图 12 阵列式 APF 运行模式

Fig. 12 Operation mode of array APF

式(18)中,  $P_{\text{loss}}$  表示由  $n$  台 APF 组成的补偿系统在某频次引起的近似运行损耗。考虑到每台 APF 的输出电流也有其上下限。等式与不等式约束条件可表示为

$$\begin{cases} \sum_1^n I_k - I_{Lh} = 0 \\ 0 \leq I_k \leq I_{k\text{max}} \quad (1 \leq k \leq n) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $I_{Lh}$  为总负荷电流在某次谐波频率处对应的幅值;  $I_{k\text{max}}$  表征了编号为  $k$  的 APF 在该工况下对应输出的上限电流参数。

数学上求解该类经济分配问题时, 经常采用的方法是拉格朗日乘数法, 进而可以求得  $n$  台 APF 应该输出的电流参考值。

当 APF 阵列采用分布式控制策略时, 可采用限幅控制方法, 仍以图 12 为例, 由  $\text{APF}_n$  以其最大补偿能力补偿谐波, 剩余的由  $\text{APF}_{n-1}$ 、 $\text{APF}_{n-2}$  等依次补偿, 这样可大幅降低 APF 模块彼此之前的互动要求, 在工程应用上简单便捷, 易于实现。

## 3.3 APF 阵列应用案例

以某重要用户为例, 其非线性负载接线示意图如图 13 所示。当该敏感负荷启动时, 上级站室配电柜出现异响与振动, 声音集中在主进断路器及母联断路器处。

测试结果见图 14 与表 2, 分析如下: 敏感负载(非线性)运行时电流 THD 值可达 95%, 主要包含 5 次、7 次谐波电流。因此在配电室挂壁处安装阵列式 APF, 采用分散控制方法, 防止负荷侧谐波扩散进入电网。

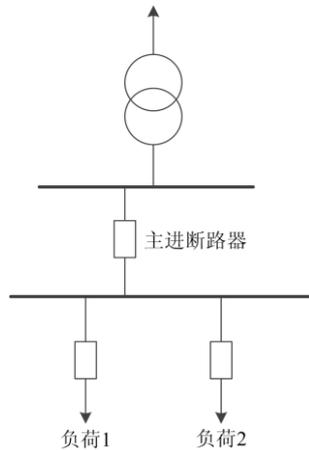


图 13 非线性负载接线示意图

Fig. 13 Connection diagram of non-linear load

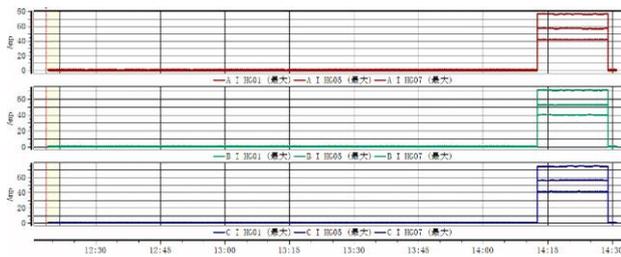


图 14 3、5、7次谐波波形图

Fig. 14 Current 3/5/7-harmonic waves

表 2 谐波电流测试值

Table 2 Parameters of harmonic current measurements

电流类型	值/A
基波	76
3次谐波	4
5次谐波	57
7次谐波	42
11次谐波	15

效果分析：投入 APF 后，电流 THD(总谐波畸变率)降低明显；5、7 次谐波电流由 57 A、42 A 分别降至 4.2 A、3.9 A，如图 15、图 16 所示。解决了



图 15 治理后 5 次谐波

Fig. 15 The 5-harmonic current after harmonic suppression

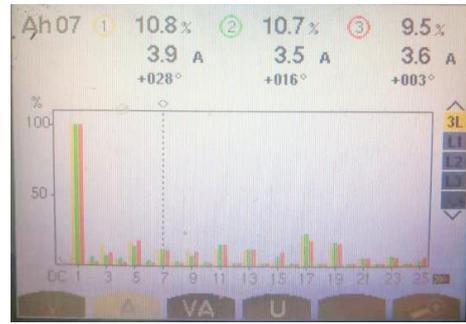


图 16 治理后 7 次谐波

Fig. 16 The 7-harmonic current after harmonic suppression

由负载谐波电流过大造成的主进断路器异响与振动的问题。

#### 4 结论

1) APF 在补偿非线性负荷时，随着延时时间的增加，低次谐波残余电流的幅值将增加，而高次谐波电流幅值随延迟时间的增加呈波动变化。

2) 在 DVR 与 APF 分别采用最简单的开环、PI 控制时，特定工况下 APF 与非线性负载作为等效谐波电流源会引起系统并联谐振，其谐振频率、峰值主要取决于 DVR 输出阻抗的谐振频率、峰值。

3) 可从 APF 与非线性负荷的等效谐波电流源、DVR 的输出阻抗两方面改善系统并联谐振对负荷电压的影响，阻抗分析法在 DFACTS 领域具有较好的适用性。

4) 模块化 APF 阵列在采用集中式控制模式时，可采用基于等损耗微增率的模式分配参考电流，以减少装置的运行损耗。

#### 参考文献

[1] 王燕. 电能质量扰动检测的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 174-186.  
WANG Yan. Review of research development in power quality disturbance detection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 174-186.

[2] LI R, WONG P, WANG K, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 183-189.

[3] 武昭旭, 杨岸, 祝龙记. 基于循环神经网络的电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 88-94.  
WU Zhaoxu, YANG An, ZHU Longji. Power quality disturbance recognition based on a recurrent neural

- network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(18): 88-94.
- [4] 张树楠, 罗海云, 程晓绚, 等. 基于双 dq 变换正负序提取及锁相环的 FPGA 实现[J]. *高压电器*, 2020, 56(3): 182-189.  
ZHANG Shunan, LUO Haiyun, CHENG Xiaoxuan, et al. Realization of positive & negative sequence component picking up and phase locked loop using FPGA based on dual-dq transform[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(3): 182-189.
- [5] 康鹏, 郭伟, 黄伟钢, 等. 区域电网电能质量问题及治理关键技术综述[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(24): 1-12.  
KANG Peng, GUO Wei, HUANG Weigang, et al. Review of the power quality problem and key treatment technology of regional power grid[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(24): 1-12.
- [6] 梁振锋, 祖莹, 刘伟, 等. 基于用电信息采集数据的电能质量分析[J]. *供用电*, 2020, 37(10): 58-64.  
LIANG Zhenfeng, ZU Ying, LIU Wei, et al. Power quality analysis based on power consumption information acquisition data[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(10): 58-64.
- [7] 宋道军, 王杰, 虎啸, 等. 改进粒子群算法的无功补偿方案优化以及对配电网电能质量的改善[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(18): 18-23.  
SONG Daojun, WANG Jie, HU Xiao, et al. Optimization of reactive power compensation scheme based on improved particle swarm optimization algorithm and improvement of power quality of distribution network[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(18): 18-23.
- [8] 冯兴田, 孙添添, 马文忠. 应用诺顿等效模型的 APF 并网交互影响分析[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(2): 8-14.  
FENG Xingtian, SUN Tiantian, MA Wenzhong. Analysis on interactions among grid-connected APFs using norton equivalent model[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(2): 8-14.
- [9] 唐振东, 杨洪耕, 袁林. 弱电网下多逆变器并网控制通道间的交互影响分析[J]. *电网技术*, 2016, 40(11): 3524-3531.  
TANG Zhendong, YANG Honggeng, YUAN Lin. Analysis on interactive influences among control loops of multi inverters connected to weak-structured power system[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(11): 3524-3531.
- [10] 郑蒙. 分布式潮流控制器多串联变流器间交互影响分析及协调控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
ZHENG Meng. Research on interaction analysis and coordinated control for the multi-series converter of DPFC[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [11] 申洪明, 宋璇坤, 姚玉海, 等. 规模化电力电子装置接入对换流变保护策略的影响分析及对策研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(3): 230-233, 252.  
SHEN Hongming, SONG Xuankun, YAO Yuhai, et al. Effect of large-scale power electronic equipment on converter transformer protection strategy and countermeasure[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(3): 230-233, 252.
- [12] 刘子维, 涂春鸣, 姜飞, 等. 线间多功能 DVR 的工作机理及仿真分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(21): 41-47.  
LIU Ziwei, TU Chunming, JIANG Fei, et al. Mechanism and simulation analysis of multi-functional interline DVR[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(21): 41-47.
- [13] 李正明, 李文文, 张国松, 等. 一种补偿电网电压凹陷的 DVR 优化补偿策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(17): 139-145.  
LI Zhengming, LI Wenwen, ZHANG Guosong, et al. An optimized compensation strategy of DVR for grid voltage sag compensation[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(17): 139-145.
- [14] 张志文, 彭政, 王卿卿, 等. 风电场下储能式高功率型 DVR 优化补偿策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(18): 69-77.  
ZHANG Zhiwen, PENG Zheng, WANG Qingqing, et al. Research on an optimal compensation strategy of an energy storage high power DVR with wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(18): 69-77.
- [15] 王艺博, 蔡国伟, 刘闯, 等. 基于双极性直接式 AC/AC 变换的单相动态电压恢复器[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(6): 171-177.  
WANG Yibo, CAI Guowei, LIU Chuang, et al. Single-phase dynamic voltage restorer based on bipolar direct AC/AC conversion[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(6): 171-177.
- [16] 余浩, 肖彭瑶, 林勇, 等. 大规模海上风电高电压穿越研究进展与展望[J]. *智慧电力*, 2020, 48(3): 30-38.  
YU Hao, XIAO Pengyao, LIN Yong, et al. Review on high voltage ride-through strategies for offshore doubly-fed wind farms[J]. *Smart Power*, 2020, 48(3): 30-38.
- [17] OMAR A I, ALEEM S H E A, EL-ZAHAB E E A, et al. An improved approach for robust control of dynamic voltage restorer and power quality enhancement using

- grasshopper optimization algorithm[J]. ISA Transactions, 2019, 95.
- [18] 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 prospect of active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 177-186.
- [19] 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.
- [20] 周卫平, 杨宣访, 师维, 等. 三相三线有源电力滤波器新型控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 55-60.  
ZHOU Weiping, YANG Xuanfang, SHI Wei, et al. A novel control approach of three-phase three-wire active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 55-60.
- [21] SAHLI A, KRIM F, LAIB A, et al. Model predictive control for single phase active power filter using modified packed U-cell (MPUC5) converter[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 180.
- [22] MARINI A, GHAZIZADEH M S, MORTAZAVI S S, et al. A harmonic power market framework for compensation management of DER based active power filters in microgrids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 113: 916-931.
- [23] FEREIDOUNI A, MASOUM M, SMEDLEY K M. Supervisory nearly constant frequency hysteresis current control for active power filter applications in stationary reference frame[J]. IEEE Power & Energy Technology Systems Journal, 2016, 3(1): 1-12.
- [24] ZHONG C, LUO Y, MIAO C. Control and performance of a cascaded shunt active power filter for aircraft electric power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3614-3623.
- [25] SHYU K K, YANG M J, CHEN Y M, et al. Model reference adaptive control design for a shunt active-power-filter system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 97-106.
- [26] ZOU Z X, ZHOU K, WANG Z, et al. Frequency adaptive fractional order repetitive control of shunt active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1659-1668.
- [27] QASIM M, KHADKIKAR V. Application of artificial neural networks for shunt active power filter control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(3): 1-12.
- [28] KANJIYA P, KHADKIKAR V, ZEINELDIN H H. Optimal control of shunt active power filter to meet IEEE Std. 519 current harmonic constraints under nonideal supply condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 724-734.
- [29] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71, 187.  
XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71, 187.
- [30] 郭鑫, 袁海文, 郑盾, 等. 独立电源系统有源滤波器输出电流相位对其补偿性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 33-39.  
GUO Xin, YUAN Haiwen, ZHENG Dun, et al. APF output current phase effect on the compensation performance of isolated power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 33-39.
- [31] 鲁挺, 赵争鸣, 张颖超, 等. 采样延迟和误差对三电平 PWM 整流直接功率控制性能的影响及其抑制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 66-72.  
LU Ting, ZHAO Zhengming, ZHANG Yingchao, et al. Effect of sampling delay and error on direct power control performance of three-level PWM rectifier and its restraining method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 66-72.
- [32] VILATHGAMUWA M, PERERA A R, CHOI S S. Performance improvement of the dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current-mode control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5): 824-834.

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-10-09

作者简介:

贾东强(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 从事供电可靠性与电能质量领域的研究; E-mail: jdq2020@126.com

孙玉树(1987—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电能质量、电力储能与可再生能源发电等。E-mail: yushusun@mail.iee.ac.cn

(编辑 周金梅)