

一种用于电压源型非线性负载谐波补偿的新型SAPF控制策略

并联型有源电力滤波器（Shunt Active Power Filter, SAPF）在补偿电压源型非线性负载时，存在负载谐波电流放大效应，且谐波补偿效果较差。针对上述问题，提出一种应用于电压型谐波源的新型SAPF控制策略。该策略采用负载谐波电流与公共连接点（PCC）谐波电压共同控制SAPF输出谐波补偿电流。理论分析和实验结果表明，所提新型SAPF控制方法，能够有效抑制负载谐波电流放大，改善SAPF对电压源型非线性负载的补偿效果。

许 胜/泰州学院船舶与机电工程学院
许杏桃/江苏省电力公司电力科学研究院

0 引言

有源电力滤波器作为一种先进的谐波治理装置，能够有效抑制非线性负载谐波^[1-3]。然而，近年来相关研究发现^[4-8]，有源电力滤波器与谐波源之间存在相互影响，为了获得理想的谐波补偿效果，串联型有源电力滤波器只适合于补偿电压源型非线性负载，而并联型有源电力滤波器（Shunt Active Power Filter, SAPF）适合于补偿电流源型非线性负载。当SAPF用于补偿电压源型非线性负载时，会增大整流器直流侧的电压纹波和交流侧电流峰值^[6]。为了改善SAPF在对电压源型非线性负载的补偿效果，抑制负载谐波电流放大，通常采用改变系统谐振频率范围和SAPF补偿带宽两种方法，前者主要在负载交流侧串联电抗器或并联电容器，存在工程应用不便以及增加设备体积和造价等问题；后者通

过对谐波的选择性补偿来消除谐振激励源，但降低了谐波补偿效果。

针对上述问题，本文提出了一种应用于电压型谐波源的新型SAPF控制方法。文章首先定量分析了SAPF对于电压源型非线性负载的谐波补偿特性。在此基础上，详细分析了所提新型控制策略的控制原理，并对该SAPF控制系统进行了分析和设计。

1 SAPF电压源型谐波补偿特性分析

1.1 系统结构

SAPF补偿电压源型非线性负载的系统主电路结构如图1所示。

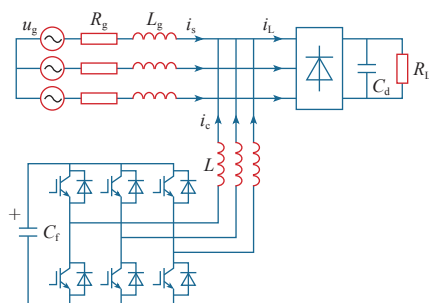


图1 SAPF补偿电压源型谐波负载系统主电路结构

图1中，SAPF采用三相桥整流器结构， C_f 、 L 分别为直流侧电容和网侧滤波电感；电压源型谐波负载为三相不控整流桥，直流侧滤波元件为电容 C_d ， R_L 为等效电阻负载； u_g 为电网电压， R_g 、 L_g 为电网等效阻感； i_s 、 i_c 和 i_L 分别为系统电流、SAPF补偿电流以及负载电流。

1.2 谐波补偿特性分析

根据图1，构建系统单次谐波等效电



许 胜/副教授

关键词/Keywords

并联型有源电力滤波器 ·
电压源型非线性负载 ·
谐波补偿 ·
谐波电流放大 ·

江苏省高校自然科学基金研究项目资助（14KJB470008），
泰州市科技支撑计划项目（TG201416）。

路模型, 设谐波次数为 h ($h \geq 2$), 如图2所示。鉴于电路的三相对称性, 以下均以单相为例分析问题。

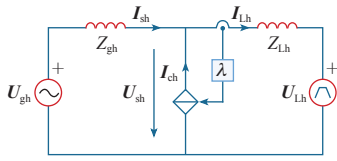


图2 SAPF补偿系统单相谐波等效电路模型

图2中, I_{sh} 为系统谐波电流; I_{ch} 为SAPF等效为受控谐波电流源; 理想谐波电压源 U_{Lh} 和等效谐波阻抗 Z_{Lh} 串联代表电压源型非线性负载^[5-6], I_{Lh} 为负载谐波电流; U_{sh} 为公共连接点 (Point of Common Coupling, PCC) 谐波电压。

根据图2, 建立系统时域谐波数学模型

$$\begin{cases} U_{gh} - U_{sh} = Z_{gh} I_{sh} \\ U_{sh} - U_{Lh} = Z_{Lh} I_{Lh} \\ I_{sh} + I_{ch} = I_{Lh} \end{cases} \quad (1)$$

为了简化分析, 设定SAPF能够实现对谐波指令电流的准确跟踪, 设谐波补偿率为 λ , 即 $I_{ch} = \lambda I_{Lh}$, 代入式 (1) 解得系统和负载谐波电流 I_{sh} 和 I_{Lh}

$$I_{sh} = \frac{U_{gh} - U_{Lh}}{Z_{gh} + Z_{Lh} / (1 - \lambda)} \quad (2)$$

$$I_{Lh} = \frac{U_{gh} - U_{Lh}}{(1 - \lambda) Z_{gh} + Z_{Lh}} \quad (3)$$

分析式 (2), 为了保证 $I_{sh} \approx 0$, 实现SAPF对电压源型谐波的有效补偿, 必须满足条件^[6]

$$|Z_{gh} + Z_{Lh} / (1 - \lambda)| \geq 1(\text{pu}) \quad (4)$$

然而, 由于电容器滤波整流负载等效的谐波电压源内阻抗非常低, $Z_{Lh} \approx 0$, 且系统阻抗通常小于10%, 因此式 (4) 很难满足。此外, 参照式 (3), 由于SAPF的谐波阻抗较低, 和 Z_{gh} 并联后总阻抗进一步变小, 造成负载谐波电流 I_{Lh} 增大; 并且, 随着 λ 的增加, I_{Lh} 也将进一步增大^[7-8]。

2 SAPF对电压源型非线性负载的谐波控制策略

2.1 传统解决方案

由以上分析可知, 由于整流桥的滤波大电容与变压器漏感及线路电感之间存在一定的谐振频

率范围, SAPF投入会激励谐振发生, 从而导致谐波放大。为了抑制谐波电流放大, 改善SAPF谐波补偿效果, 通常从系统电路参数和SAPF控制策略两个方面入手。

2.1.1 系统电路参数调整

通过改变系统电路参数, 一方面减缓谐波变化率, 降低系统谐波; 另一方面, 改变系统谐振频率范围, 避免SAPF谐波激励源引起的系统串并联谐振。包括以下两类方法。

(1) 负载交流侧串联电感

在负载交流侧串联电感, 最直接的效果是增大了负载交流侧阻抗 Z_{Lh} 。根据式 (2) ~ 式 (3), 此时可以有效降低谐波电流放大。该方法的主要问题是实际工程应用困难, 且要达到理想谐波抑制要求, 需要较大的电感值。

(2) 负载交流侧并联电容器

文献[6]根据对偶原则, 提出在负载交流侧并联电容器, 以达到与串联电抗器相同的效果。下面对该方法进行定量分析。

设并联电容器 C 的SAPF系统单相谐波等效电路如图3所示, 令 $Z_C = R_C + 1/sC$, R_C 为电容等效电阻。

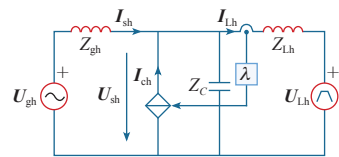


图3 并联电容器时的单相谐波等效电路模型

根据图3, 忽略电网谐波电压, 参照2.2节计算过程, 可解的SAPF投运后的 I_{sh} 为

$$I_{sh} = \frac{-U_{Lh}}{Z_{gh} + (1 + Z_{gh} / Z_C) Z_{Lh} / (1 - \lambda)} \quad (5)$$

同理, 当满足下式时, $I_{sh} \approx 0$, 即

$$|Z_{gh} + (1 + Z_{gh} / Z_C) Z_{Lh} / (1 - \lambda)| \geq 1(\text{pu}) \quad (6)$$

比较式 (4) 和式 (6) 可知, 由于谐波低阻抗 Z_C 的引入, 式 (6) 较容易满足, 实现SAPF对电压源型谐波的有效补偿, 抑制谐波放大。该方法的主要问题与串联电抗器相似, 需要并联较大的电容器, 不仅设备体积大, 且电容器产生较大的容性无功电流造成系统过补偿。

2.1.2 SAPF控制策略调整

此类方法主要通过对负载谐波电流的选择性补偿,来改变SAPF补偿带宽,从而避免系统谐振频段的谐波电流放大。此外,通过适当降低SAPF的谐波补偿率 λ ,也可以有效降低谐波电流放大倍数。

上述方法虽然一定程度上能够抑制谐波电流放大,但同时牺牲了装置的谐波补偿效果。

2.2 新型控制策略

针对上述情况,本文提出了一种针对电压源型非线性负载的新型SAPF控制策略。该控制策略在谐波指令电流中引入PCC谐波电压 U_{sh} ,采用负载谐波电流与 U_{sh} 共同控制SAPF输出谐波补偿电流,如图4所示。

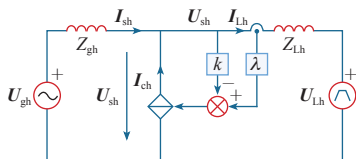


图4 新型SAPF控制策略示意图

图4中,谐波电压采用比例控制,比例系数设为 k 。实际上,该控制策略等效为在PCC处并联一个阻值为 $1/k$ 的谐波电阻,如图5所示。

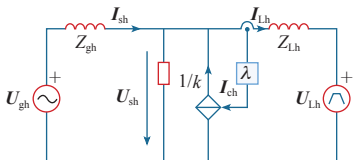


图5 基于新型控制策略的单相谐波等效电路模型

同理,忽略电网谐波电压,根据图5可解得SAPF投运后的 I_{sh} 值为

$$I_{sh} = \frac{-U_{Lh}}{Z_{gh} + (1 + kZ_{gh})Z_{Lh} / (1 - \lambda)} \quad (7)$$

显然,对照式(5)~式(7),由于 k 的存在,容易实现 $I_{sh} \approx 0$ 的目标,抑制谐波放大。

2.3 控制系统分析

下面详细分析该控制系统的性能。参照图1,将SAPF等效为受控谐波电压源 U 和电感 L 串联的电路模型。根据图4,可获得新型SAPF控制策略的结构框图,如图6所示。

图6中, L_L 为负载等效谐波电感,对应感抗

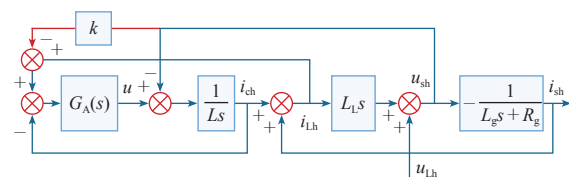


图6 基于新型SAPF控制策略的控制框图

Z_{Lh} ; $G_A(s)$ 为电流控制器,取PI控制,忽略系统控制各类延时,则

$$G_A(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (8)$$

同理,可获得图3的采用并联电容器方法的系统控制框图,如图7所示。

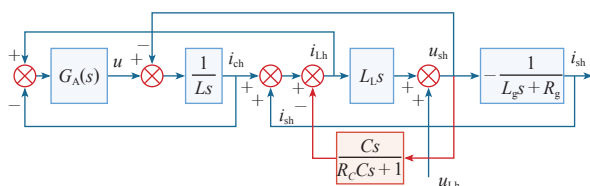


图7 并联电容器方法的系统控制框图

下面分析在负载谐波电压 U_{Lh} 激励下,传统方案和新型控制策略下系统谐波电流的幅频特性,系统参数设置参照如下表所示。

表 系统参数

参数	数值
APF网侧电抗器 L/mH	0.3
电网系统阻抗 L_g/mH	0.1
$R_g/m\Omega$	20
负载等效谐波电感 $L_L/\mu H$	5
整流器负载直流滤波电容与等效电阻 C_d/mF	7
R_L/Ω	10
并联电容及等效电阻 C/mF	5
R_c/Ω	0.5
PI控制参数 K_p	5
K_i	10

(1) 负载交流侧串联电感

在图6中,令 $k=0$,通过增加负载等效谐波电感值 L_L ,来模拟负载交流侧串电感,则可获得不同 L_L 取值时的 I_{sh}/U_{Lh} 幅频特性图,如图8所示。

可见,当 $L_L=5 \mu H$,即没有串接电感时,由于 L_L 较小,在截止频率100 Hz附近系统谐波电流 i_{sh} 很大,幅值接近9 dB;当增加 L_L 值达到50 μH 时,幅

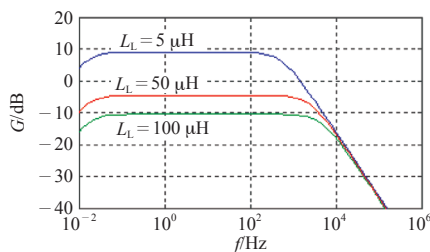


图8 L_L 不同取值时 I_{sh}/U_{Lh} 幅频特性图

值被抑制在 -5 dB左右, i_{sh} 被有效抑制。

(2) 负载交流侧并联电容器

图9为采用负载交流侧并联电容器方法的 I_{sh}/U_{Lh} 幅频特性图。控制系统结构参照图7。由图9可见,随着电容值 C 的增加,系统谐波电流 i_{sh} 的截止频率越来越低,从而使得更宽频带范围内的系统谐波电流被有效滤除。

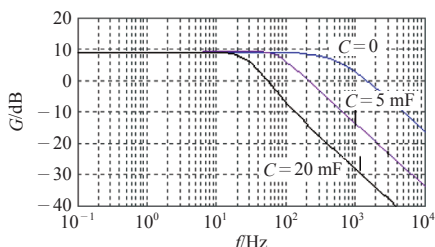


图9 C 不同取值时 I_{sh}/U_{Lh} 幅频特性图

(3) 新型控制策略

图10为基于所提新型控制算法的 I_{sh}/U_{Lh} 幅频特性,控制系统结构参照图6。

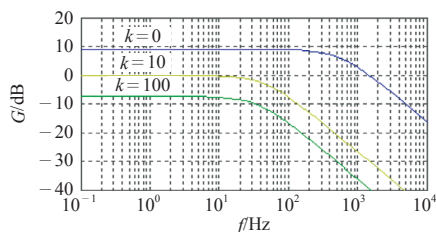


图10 k 不同取值时 I_{sh}/U_{Lh} 幅频特性图

分析图10,随着比例系数 k 的增加,一方面,系统谐波电流 i_{sh} 的幅值逐步降低;另一方面, i_{sh} 的截止频率越来越低。可见,该控制方法同时具有传统两种控制方案的优点,从而能够得到更好的谐波抑制效果。

3 仿真实验

仿真实验电路参照图1,系统电压为380 V,

有源电力滤波器直流侧滤波电容 $C_f = 5\,000\ \mu\text{F}$,系统其他参数按上表。基于所提新型SAPF控制策略的控制系统结构如图11所示,主要由谐波电流检测、PCC谐波电压检测、电流跟踪控制以及SVPWM脉冲调制等环节组成。

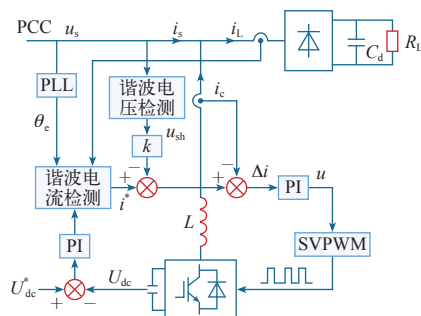


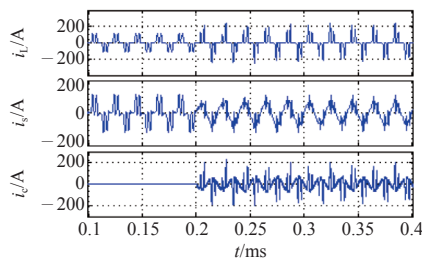
图11 SAPF控制系统结构图

图11中, θ_e 为与电网同步的相位信息,由数字锁相环PLL生成; i^* 为谐波指令电流; U_{dc} 、 U_{dc}^* 分别为有源电力滤波器直流侧电压及其参考值。

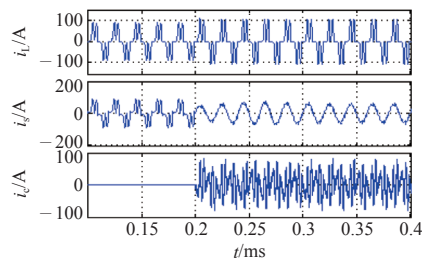
仿真实验分为采用传统方案和本文所提方案等四个部分,实验波形如图12所示。

图12a为未采用任何解决方案的SAPF补偿系统负载电流 i_L 、系统电流 i_s 和SAPF输出电流 i_c 波形。由图12a可见,SAPF启动后, i_L 被放大,电流峰值从起动前的115 A达到236 A,谐波放大倍数达105%。此外, i_s 总畸变率THD=24.8%。

图12b为采用负载交流侧串接电感方法的实验



(a) 未采取控制措施



(b) 采用负载交流侧串电感方法

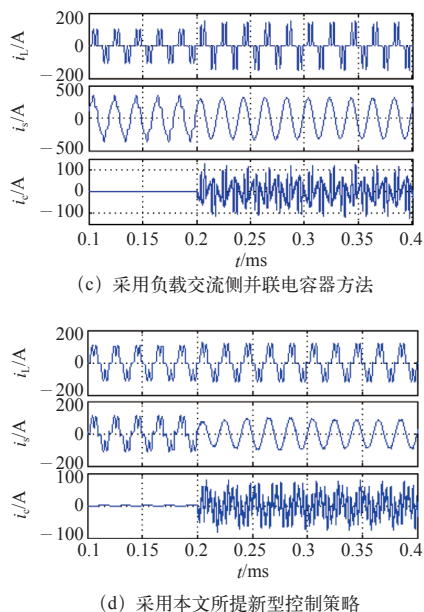


图12 SAPF补偿电压源型非线性负载仿真波形

电流波形, 串联电感值为 $150\ \mu\text{H}$ 。分析图12b, SAPF起动后的 i_L 峰值从起动前的 $90\ \text{A}$ 增长到 $106\ \text{A}$, 谐波放大倍数降为 17.8% ; i_s 总畸变率 $\text{THD}=7.9\%$ 。可见, 该方法有效抑制了负载谐波电流放大, 提高了谐波电流补偿效果。

图12c为采用负载交流侧并联电容器方法的实验电流波形, 并联电容值为 $5\ \text{mF}$ 。观察实验波形, SAPF起动后, i_L 峰值从起动前的 $115\ \text{A}$ 增长到 $139\ \text{A}$, 谐波放大倍数降为 20.8% , i_s 总畸变率 $\text{THD}=1.7\%$ 。相对于交流侧串电感方法, 该方法下的 i_s 谐波总畸变率较小, 主要是并联电容与线路阻抗的滤波作用。

上述两种方法, 当继续增加负载交流侧串联电感或并联电容值时, 效果会有更多的改善, 其中串接电感的效果更加明显。但随着电感和电容取值的增加, 一方面设备体积和造价增加, 带来较大的功率损耗; 另一方面, 大电感造成负载侧电压降落, 影响设备效率, 而电容器会增加系统的容性无功, 这一点从图12c中可以明显看出。

图12d为采用本文所提控制策略的实验电流波形, 谐波电压检测比例系数 $k=20$ 。由图12d可见, 起动后的 i_L 峰值从起动前的 $115\ \text{A}$ 增长到 $119\ \text{A}$, 谐波放大倍数降为 3.5% ; i_s 总畸变率 $\text{THD}=3.1\%$ 。可见, 该方法相对于两种传统解决方案, 在不添加

电感和电容器等硬件设备的情况下, 也能够取得较好的谐波抑制效果。

4 结束语

针对SAPF补偿电压源型非线性负载引起的负载谐波放大以及电网电流谐波含量较大的问题, 文章提出了一种新型SAPF控制方法。该控制策略采用负载谐波电流与PCC谐波电压共同控制SAPF输出谐波补偿电流, 等效为在PCC处并联一个谐波电阻。理论分析和实验结果表明, 所提新型SAPF控制方法, 能够有效抑制流入电网中的谐波电流, 并解决负载谐波电流放大问题。

参考文献

- [1] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 并联型有源电力滤波器对电动机和电容器谐波源补偿特性的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 83-87.
- [2] Dang Pengpai, Ellinger T, Petzoldt J. Dynamic interaction analysis of APF systems [J]. IEEE Transactions Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4467-4473.
- [3] 梅红明, 王一, 刘建政. 采用网侧电流闭环控制的电能质量综合补偿方法[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2369-2375.
- [4] Peng F Z. Application issues of active power filters [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1998, 4(5): 21-30.
- [5] 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.
- [6] 赵文强, 陈国柱. 并联型APF在容性非线性负载中的应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(12): 59-64.
- [7] 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.
- [8] 戴珂, 刘聪, 李彦龙, 等. 并联型APF对两类非线性负载的谐波补偿特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 80-85.

(收稿日期: 2015-05-12) EA