有源滤波器就近补偿对邻近负载的影响

为保证系统安全运行，主要研究了并联型电力有源滤波器（Shunt Active Power Filter，SAPF）就近补偿对同一配电网系统中邻近负载影响的问题。采用等效电路的方法研究了各种非线性负载组合情况下，SAPF就近补偿投入前后邻近负载谐波电流的变化，并对谐波电流进行了公式推导。研究发现，SAPF在就近补偿时，系统有发生谐振以及邻近负载的谐波电流有发生放大的可能；在此基础上，从系统结构和控制策略两方面采用不同的措施来抑制谐波放大与避免谐振的发生。最后，在Simulink中搭建基于PI调节的指定次谐波无静差控制的SAPF仿真模型与实验，验证了上述分析的正确性。

冯振保　龙　洁　曹海斌／国网焦作供电公司

冯振保／教授级高工

关键词／Keywords
就近补偿·
邻近非线性负载·
谐波放大·
谐振·
抑制措施·

0　引言

随着工业的发展，大功率非线性负载在工业中被广泛应用，由非线性负载产生的谐波会引起电压、电流波形畸变，电气设备的共振、干扰和过早老化等问题[1-2]。在治理谐波方面，指定次补偿的并联型有源滤波器（Shunt Active Power Filter，SAPF）由于其安装方便、谐波补偿效果好、易于维护且具有很大的灵活性等优势被越来越多地使用。

近年来，关于SAPF指定次补偿的研究多集中于谐波的提取方法与系统控制方法等方面，而对于应用层面的分析研究较少[3]。SAPF在工业现场环境中的应用不仅要考虑其补偿效果，还需考虑其是否对同一电网中的其他相邻或相连负载可能造成不利影响。文献[4]采用等效电路的方法研究了当邻近负载是电压源型负载，就近补偿电流源型非线性负载时对邻近负载的谐波电流有放大效应的影响，并提出改变系统参数或改变补偿频带的方法来抑制谐波放大，但没有考虑负载交流侧等效阻抗的因素，而且对其他不同负载情况没有详细阐述。

本文在考虑负载交流侧等效阻抗的基础上，采用等效电路的方法，详细分析了SAPF就近补偿电压源型负载，邻近负载为电流源型负载或电压源型负载和SAPF就近补偿电流源型负载，邻近负载为电流源型负载或电压源型负载这四种情况下邻近负载谐波电流的变化，并对邻近负载的谐波电流进行了公式推导，在此基础上从系统结构和控制策略两方面考虑，采用不同措施抑制了SAPF就近补偿对邻近负载的影响。最后，通过搭建Simulink仿真模型与实验验证了上述分析的正确性。

1　SAPF谐波补偿的基本原理

SAPF谐波补偿的基本原理是SAPF通过检测负载谐波电流i_r，并使之发出一个与负载谐波幅值相等、相位相反的电流i_c。SAPF系统控制示意图如图1所示。

2　SAPF就近补偿研究

通常，非线性负载可分为电流源型非线性负载和电压源型非线性负载，其典型的结构分别是电感滤波型三相二极管不可控整流电路和电容滤波型三相二极管不可控整流电路，其中电流源型非线性负载可以等效为谐波电流源与负载等效阻抗并联，电压源型非线性负载等效为谐波电压源与负载等效阻抗串联[5-7]，其等效电路分别如图2所示。

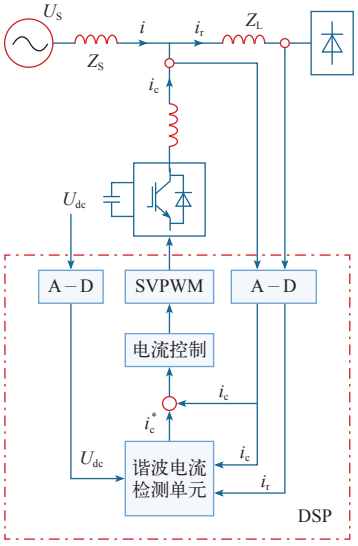
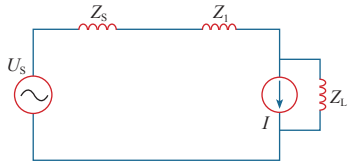
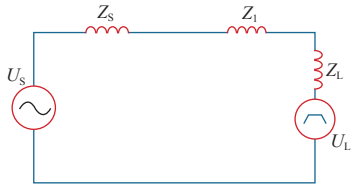


图1　SAPF系统控制示意图



（a）电流源型非线性负载等效电路



（b）电压源型非线性负载等效电路

图2　系统单相等效电路

SAPF的补偿方式分为就地补偿和集中补偿，在谐波源较大、较集中场合采用就地治理，在谐波源较多、较分散的场合采用集中治理[8]。SAPF采用就地补偿时，实际电网存在两种状况：①就近补偿单一负载，邻近负载较远。由于输电线路有寄生电感，对邻近负载影响较小，可忽略不计。②就近补偿单一负载，邻近负载较近。由于缺少输电线路的寄生电感，此状况可能对邻近负载影响较大。

在电网中，非线性负载可能是电压源型非线性负载或电流源型非线性负载，还可能两种负载同时存在，下文将对上述情况作一一分析。

1）SAPF补偿电压源型负载，邻近负载为电流源型负载。

当SAPF补偿电压源型负载，邻近负载为电流源型负载时，其等效电路如图3所示。其中，U_S为电网谐波电压；Z_S为电网侧等效阻抗；Z_1为负载交流侧等效阻抗；I_S为电网谐波电流；I_1为系统一支路的谐波电流；I_2为系统另一支路的谐波电流；I_3、I_4和Z_{L2}为电流源型非线性负载等效电路的谐波电流与等效阻抗；U_L、Z_{L1}为电压源型非线性负载等效电路的谐波电压与等效阻抗；I_c为SAPF补偿电流；G为谐波补偿率。

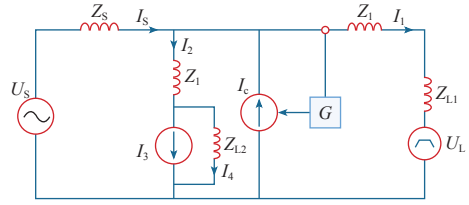


图3　情况1的单相系统谐波等效电路

根据基尔霍夫定理可得

$$\begin{cases} U_S - Z_S I_S = (Z_1 + Z_{L1}) I_1 + U_L \\ U_S - Z_S I_S = Z_1 I_2 + Z_{L2} I_4 \\ I_S + I_c = I_1 + I_2 \\ I_c = G I_1 \qquad 0 < G < 1 \\ I_2 = I_3 + I_4 \end{cases} \tag{1}$$

解得

$$I_2 = \frac{(G-1)(U_L Z_S + Z_S I_3 Z_{L2}) - (U_S + I_3 Z_{L2})(Z_1 + Z_{L1})}{(G-2)Z_S Z_1 + (G-1)Z_S Z_{L2} - Z_1^2 - Z_1 Z_{L2} - Z_{L1} Z_S - Z_1 Z_{L1} - Z_{L1} Z_{L2}} \tag{2}$$

由于Z_{L2}为电流源型非线性负载的等效阻抗，因此，在理想状态下，$Z_{L2} \to \infty$，则：$Z_{L2} \geqslant Z_{L1}$、$Z_{L2} \geqslant Z_S$，式（2）可化简为

$$I_2 = \frac{(G-1)(U_L Z_S + Z_S I_3 Z_{L2}) - (U_S + I_3 Z_{L2})(Z_1 + Z_{L1})}{[(G-1)Z_S - Z_1 - Z_{L1}]Z_{L2}} \tag{3}$$

由于Z_{L1}是电压源型非线性负载的等效阻抗，所以Z_{L1}呈容性特性。由式（3）可知当满足$(G-1)\cdot Z_S - Z_2 - Z_{L1} = 0$时，$I_2 = \infty$。即：可能由电网等效阻抗$Z_S$、负载交流侧等效阻抗$Z_1$和负载等效阻抗$Z_{L1}$三者共同的作用使系统发生共振，导致$I_2$激增，严重危害负载的正常运行；当负载为理想的电压

源型负载与理想的电流源型负载时，$Z_{L1}=0$，$Z_{L2}=\infty$，则式（3）又可化简为：$I_2=I_3$，此时邻近电流源型负载的谐波电流不受影响。

2）SAPF补偿电压源型负载，邻近负载为电压源型负载。当SAPF补偿电压源型负载，邻近负载为电压源型负载时，其等效电路如图4所示，U_L、Z_L为电压源型非线性负载等效电路的谐波电压与等效阻抗，为方便计算，此系统中两个电压源型负载完全相同。

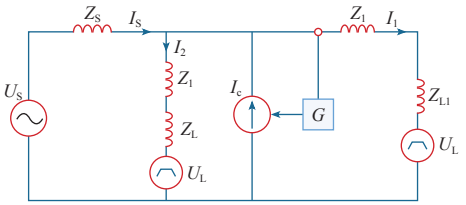


图4　情况2的单相系统谐波等效电路

根据基尔霍夫定理可得

$$\begin{cases} U_S - Z_S I_S = (Z_1 + Z_L) I_1 + U_L \\ U_S - Z_S I_S = (Z_1 + Z_L) I_2 + U_L \\ I_S + I_c = I_1 + I_2 \\ I_c = G I_1 \qquad 0 < G < 1 \end{cases} \tag{4}$$

解得

$$I_1 = I_2 = \frac{U_S - U_L}{Z_S(2-G) + Z_1 + Z_L} \tag{5}$$

由式（5）可知当满足$Z_S(2-G)+Z_1+Z_L=0$时，系统会发生谐振并导致I_2激增，严重危害电网。但由于Z_L的阻抗值一般较小，系统不会发生谐振。

另外，分析式（5）可知：邻近负载谐波电流I_2随补偿率G的增大而增大，即当SAPF补偿电压源型负载时，邻近电压源型非线性负载会发生谐波放大的现象。当负载为理想电压源型非线性负载时，$Z_L=0$，此时式（4）可化简为

$$I_2 = \frac{U_S - U_L}{Z_S(2-G) + Z_1} \tag{6}$$

式中，I_2依然随补偿率G的增大而增大，并且其放大与电网等效阻抗Z_S和负载交流侧等效阻抗Z_1有关。

3）SAPF补偿电流源型负载，邻近负载为电压源型负载。当SAPF补偿电流源型负载，邻近负载为电压源型负载时，其等效电路如图5所示，U_L、Z_{L2}为电压源型非线性负载等效电路的谐波电压与等效阻抗，I_3、I_4和Z_{L1}为电流源型非线性负载等效电路的谐波电流与等效阻抗。

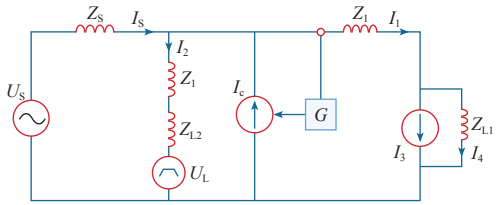


图5　情况3的单相系统谐波等效电路

根据基尔霍夫定理可得

$$\begin{cases} U_S - Z_S I_S = Z_1 I_1 + Z_{L1} I_4 \\ U_S - Z_S I_S = (Z_1 + Z_{L2}) I_2 + U_L \\ I_S + I_c = I_1 + I_2 \\ I_c = G I_1 \qquad 0 < G < 1 \\ I_1 = I_3 + I_4 \end{cases} \tag{7}$$

解得

$$I_2 = \frac{(1-G)(Z_{L1}I_3Z_S + U_L Z_S) + (U_L - U_S)(Z_1 + Z_{L1})}{(G-2)Z_S Z_1 + (G-1)Z_S Z_{L2} - Z_1^2 - Z_{L2}Z_1 - Z_1 Z_{L1} - Z_S Z_{L1} - Z_{L1}Z_{L2}} \tag{8}$$

由于Z_{L1}为电流源型非线性负载的等效阻抗，因此，在理想状态下，$Z_{L1}\to\infty$，则$Z_{L1}\geqslant Z_{L2}$且$Z_{L2}\geqslant Z_S$，综上式（8）可化简为

$$I_2 = \frac{(1-G)(Z_{L1}I_3Z_S + U_L Z_S) + (U_L - U_S)(Z_1 + Z_{L1})}{(Z_1 + Z_S + Z_{L2})Z_{L1}} \tag{9}$$

由于Z_{L2}是电压源型非线性负载的等效阻抗，所以Z_{L2}呈容性特性。由上式可知当满足$Z_1+Z_S+Z_{L2}=0$时，$I_2=\infty$，即：电网等效阻抗Z_S、负载交流侧等效阻抗Z_1和负载等效阻抗Z_{L2}三者共同的作用可能使系统发生共振，导致I_2激增，严重危害负载的正常运行。

由式（9）可知：邻近负载谐波电流I_2随补偿率G的增大而减小，即当SAPF补偿电流源型负载谐波时，邻近的电压源型负载谐波含量会降低。

4）SAPF补偿电流源型负载，邻近负载为电流源型负载。当SAPF补偿电流源型负载，邻近负载为电流源型负载时，其等效电路如图6所示，I_3、I_4和Z_L为电流源型非线性负载等效电路的谐波电流与

等效阻抗。为方便计算，此系统中两个电流源型负载完全相同。

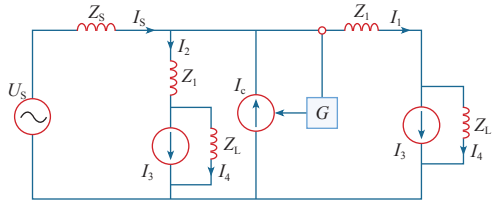


图6　情况4的单相系统谐波等效电路

根据基尔霍夫定理可得

$$\begin{cases} U_S - Z_S I_S = Z_1 I_1 + Z_L I_4 \\ U_S - Z_S I_S = Z_1 I_2 + Z_L I_4 \\ I_S + I_c = I_1 + I_2 \\ I_c = GI_1 \qquad 0 < G < 1 \\ I_1 = I_3 + I_4 \end{cases} \tag{10}$$

解得

$$I_1 = I_2 = \frac{U_S + Z_L I_3}{Z_S(2-G) + Z_1 + Z_L} \tag{11}$$

若系统无电网电压谐波，即$U_S=0$，则式（11）可化简为

$$I_2 = \frac{I_3}{\frac{Z_S(2-G)+Z_1}{Z_L}+1} \tag{12}$$

由于Z_L是电流源型非线性负载的等效阻抗$Z_L \to \infty$，所以$I_2 \approx I_3$，即当邻近负载是电流源型非线性负载时，邻近负载的谐波电流基本不受影响。

3　抑制影响的措施

由式（5）可知当SAPF补偿电压源型负载谐波时，邻近的电压源型负载会发生谐波放大的现象。下面将从系统结构和控制策略两方面采取措施来抑制此现象的发生。

1）负载交流侧串电抗。此方法改变了负载交流侧等效阻抗Z_1的值，使系统的谐振频率调整到一个适当的范围，防止系统发生谐振，同时又抑制了谐波放大。

2）减小谐波补偿率。此方法既可减小谐波畸变率（THD），也可抑制谐波放大，同时又不增加成本，经济性较好。

4　仿真分析与实验验证

本文采用如图7所示的基于PI调节的指定次谐波无静差控制。首先使负载电流i_r与SAPF补偿电流i_c做差，其差值相当于系统电流；然后将差值电流通过与指定次谐波同步的旋转坐标变换转化到dq坐标下，再通过低通滤波器求得指定次谐波在dq坐标下的直流分量；最终通过对该直流分量进行PI调节，可做到对指定次谐波的无静差控制[9-10]。

为验证以上分析的正确性，本文采用如图7所

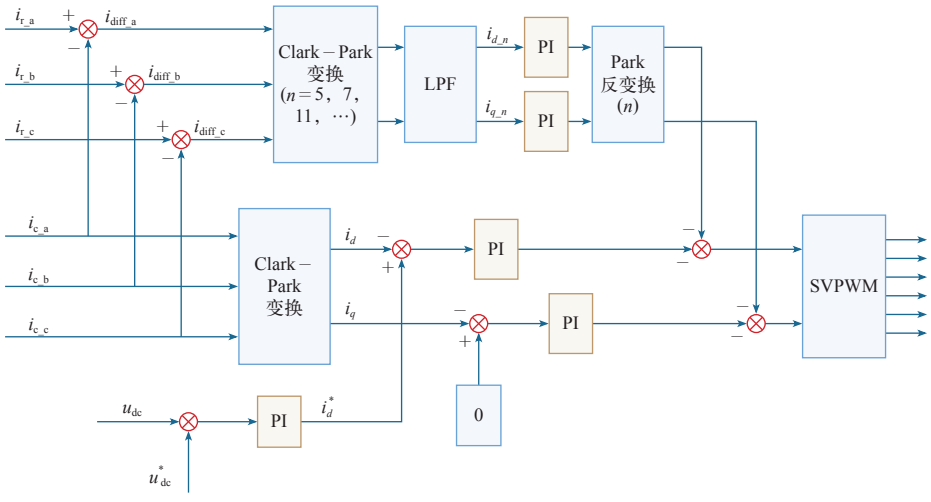


图7　基于PI调节的指定次谐波无静差控制

示的控制策略，并只补偿系统中谐波含量比较高的5次、7次和11次谐波。系统主要参数如表1所示。

表1 系统主要参数

参数	数值
网侧等效阻抗/μH	50
负载交流侧等效阻抗/μH	100
电流源型负载直流侧电阻/Ω	10
电流源型负载直流侧电感/mH	1
电流源型负载直流侧电阻/Ω	10
电流源型负载直流侧电容/mF	5
SAPF直流侧电压/V	700
滤波电感/mH	0.45
采样/开关频率/kHz	9.6

1）SAPF补偿电压源型负载，邻近负载为电流源型负载的仿真分析。如图8所示，0.2 s时，SAPF投入系统运行，在0.2 s之前负载电流峰值约为52.7 A，0.2 s之后负载电流峰值约为53.5 A，谐波畸变率由28.66%变为27.38%。因此，在SAPF补偿前后负载电流没有发生过大变化，即SAPF补偿电压源型负载时，对邻近电流源型负载基本没有影响。

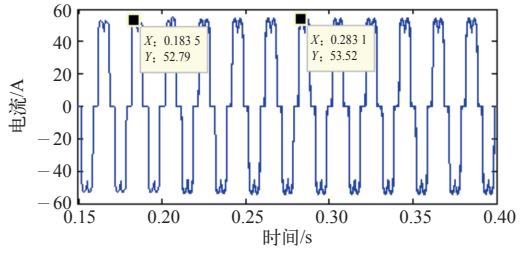


图8 情况1时的邻近负载电流

2）SAPF补偿电压源型负载，邻近负载为电压源型负载的仿真分析。当SAPF补偿电压源型负载，邻近负载为电压源型负载时，邻近负载电流如图9所示。0.2 s时，SAPF投入系统，在0.2 s之前负载电流峰值约为100.9 A，0.2 s之后负载电流峰值约为110.6 A，谐波畸变率由76.02%上升为80.49%。由此可知，SAPF补偿前后负载电流变大，其谐波畸变率增加，即SAPF补偿电压源型负载时，会造成邻近电压源型负载谐波电流放大的现象。

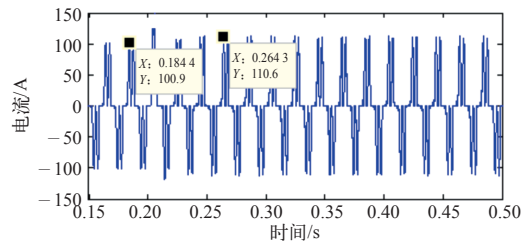


图9 情况2时的邻近负载电流

3）SAPF补偿电流源型负载，邻近负载为电压源型负载的仿真分析。如图10所示，0.2 s时，SAPF投入系统，在0.2 s之前负载电流峰值约为69.9 A，0.2 s之后负载电流峰值约为68.4 A，谐波畸变率由41.48%下降为36.89%。由此可知，SAPF补偿前后负载电流略微下降，其谐波畸变率减小，即SAPF补偿电流源型负载时，会使邻近电压源型负载谐波电流减小。

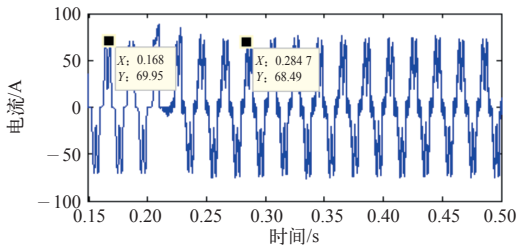


图10 情况3时的邻近负载电流

4）SAPF补偿电流源型负载，邻近负载为电流源型负载的仿真分析。如图11所示，0.2 s时，SAPF投入系统，在0.2 s之前负载电流峰值约为53.6 A，0.2 s之后负载电流峰值约为53.7 A，谐波畸变率由28.12%变为27.41%。由此可知，SAPF补偿前后负载电流与其谐波畸变率基本不变，即SAPF补偿电流源型负载时，对邻近电流源型负载基本没有影响。

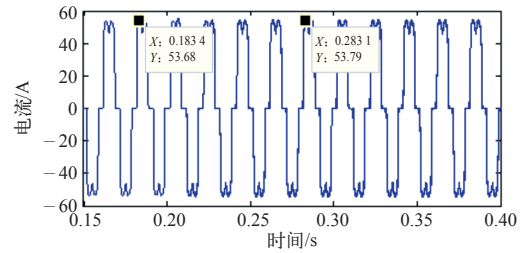


图11 情况4时的邻近负载电流

5）谐波放大抑制措施。为验证上述谐波放大抑制措施，以SAPF补偿电压源型负载，邻近负载为电压源型负载为例，从系统结构与控制策略两方面考虑分别作出仿真分析，其仿真数据如表2和表3所示。

表2　负载交流侧串电抗

Z_l/μH	SAPF投入前 负载支路电流/A	SAPF投入后 负载支路电流/A	放大倍数
50	110	125	1.13
100	100	110	1.1
150	92	100	1.08

表3　谐波补偿率对负载谐波的影响

G	SAPF投入前 负载支路电流/A	SAPF投入后 负载支路电流/A	放大倍数
0.9	101	110	1.09
0.7	101	108	1.07
0.5	101	106	1.05

从表2可以得出，随着负载交流侧阻抗的增加，负载谐波电流放大倍数在减小；从表3可以得出，随着谐波补偿率的减小，负载谐波电流放大倍数在减小。由此可得减小谐波补偿率和增加负载交流阻抗可以适当减小谐波放大。

为验证以上仿真的正确性，本文以SAPF补偿电压源型负载，邻近负载为电压源型负载为例进行实验验证，电压源型负载采用三相全桥不控整流电路，其参数为直流侧电容$C=5$ mF，$R=30$ Ω。

由图12、图13可知，当SAPF补偿电压源型负载时，其邻近的电压源型负载电流最大值由50 A上升为63 A，即发生了谐波放大。下面分别采取串电抗和减小补偿率的方法抑制谐波放大。

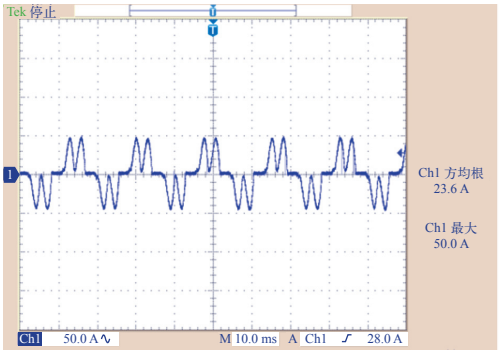


图12　补偿前邻近负载电流

由图13、图14可知，当串电抗时，邻近负载电流由63 A减小为58 A；由图13、图15可知，当减小补偿率的方法时，邻近负载电流由63 A减小为54 A。综上可知，串电抗和减小补偿率可有效抑制谐波放大。

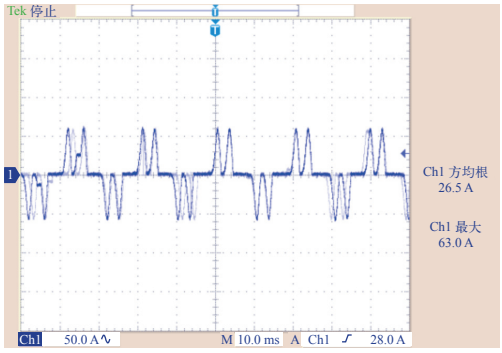


图13　补偿后邻近负载电流

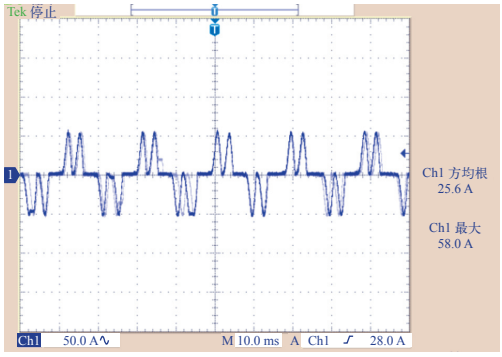


图14　串电抗时邻近负载电流

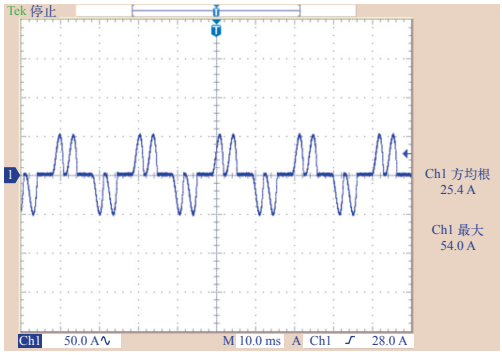


图15　减小补偿率时邻近负载电流

5　结束语

通过分析补偿对象与邻近负载的各种负载组合可以发现。

1）只有当补偿对象与邻近负载都是电压源型非线性负载时，邻近负载的谐波电流不会因为系统谐振而使电流激增，但是由于电压源型非线性负载的等效电阻非常小，邻近负载的谐波电流会发生放大。

2）当邻近负载是电流源型非线性负载时，

其受影响较小；邻近负载是电压源型非线性负载时，其受影响较大，其谐波发生放大或减小受被补偿负载特性的影响。

3）当邻近的电压源型非线性负载发生谐波放大时，可以采取改变系统结构和控制策略的方法来抑制谐波放大。

参考文献

[1] Asiminoaei L，Rodriguez P，Blaabjerg F．Application of discontinuous PWM modulation in active power filters [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2008，23 (4)：1692-1706．

[2] Verma V，Singh B．Design and implementation of a current-controlled parallel hybrid power filter [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2009，45 (5)：1910-1917．

[3] Gary W Chang，Shin-kuan Chen．An analytical approach for characterizing harmonic and inter-harmonic currents generated by VSI-fed adjustable speed drives [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2005，20 (4)：2555-2593．

[4] 赵文强，梁少华，徐兵，等．SAPF安装点的选择及对邻近负载影响的分析 [J]．电力电子技术，2013，47 (5)：81-84．

[5] 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)：79-85．

[6] Zhao Wenqiang，Chen Guozhu．Approaches to shunt active power filter for application with capacitive nonlinear load [C]．Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics，Seoul，IEEE，2009：1835-1840．

[7] 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．

[8] 马永，蔡建华．APF采样点的选取对滤波效果影响的研究 [J]．建筑电气，2013 (3)：48-52

[9] 张树全，戴珂，谢斌，等．多同步旋转坐标系下指定次谐波控制 [J]．中国电机工程学报，2010，30 (3)：55-62．

[10] 张树全，戴珂，谢斌，等．并联型有源电力滤波器指定次无静差控制策略 [J]．电力电子技术，2009 (3)：33-38．

（收稿日期：2017－03－11）EA

(上接第40页)

字控制的LLC变换器 [C]．中国电机工程学会第十三届青年学术会议论文集，2014：363-366．

[6] 陈良亮，张蓓蓓，周斌，等．电动汽车非车载充电机充电模块的研制 [J]．电力系统自动化，2011，35 (7)：81-85．

[7] 耿中星．基于谐振并联均流模块化高频充电机的研究与设计 [D]．南京：南京理工大学，2014．

[8] 黄志武，唐明明．LLC谐振全桥变换器在交流传动电力机车充电机中的应用 [J]．通信电源技术，2009，26 (1)：1-4．

[9] 陈新，姬秋华，刘飞．基于微网主从结构的平滑切换控制策略 [J]．电工技术学报，2014，29 (2)：163-170．

[10] 吴卫民，何远彬，耿攀，等．直流微网研究中的关键技术 [J]．电工技术学报，2012，27 (1)：98-106．

[11] 张强，姚绪梁，张敬南．大功率直流电源并联运行的均流控制 [J]．电力电子技术，2011，45 (3)：73-75．

[12] 符赞宣，瞿文龙，张旭．平均电流模式 DC/DC变换器均流控制方法 [J]．清华大学学报：自然科学版，2003，43 (3)：337-340．

[13] 罗伟伟，李忠志，王振民，等．全数字化特种电源实时并机系统研究 [J]．电力电子技术，2012，46 (6)：73-76．

[14] 杜海江，李玉凯．小型嵌入式系统的分析方法-IFSM [J]．单片机与嵌入式系统应用，2006，6 (4)：17-19．

（收稿日期：2016－09－06）EA