

DOI: 10.7667/PSPC171100

有源电力滤波器指定次谐波补偿优化限流策略研究

张国澎¹, 周犹松¹, 郑征¹, 王喜华²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000;

2. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 为保障有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)在超过其额定容量的工况下稳定运行, 提出了一种基于负载谐波电流重构的限流策略, 实现有源滤波器输出指定次谐波电流的精确限流。根据补偿后电网电流总谐波畸变率(THD)最小原则构建补偿结果的评价体系, 通过对电流重构波形中各次谐波含量的调整, 提出了一种有源滤波器的最优补偿方案。最后利用半实物平台进行了相关实验, 对比分析了负载电流在稳态和动态下, 谐波电流重构与传统方法的限流与补偿效果, 验证了所提重构补偿方案的正确性与优越性。

关键词: 有源电力滤波器; 电流重构; 指定次谐波; 限流; 优化补偿

Research on current-limiting optimization strategy for specific harmonic compensation of active power filter

ZHANG Guopeng¹, ZHOU Yousong¹, ZHENG Zheng¹, WANG Xihua²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Mechanical Electrical & Information Engineering, China University of

Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to ensure the APF to operate stably under the condition that the compensating current exceeds its rated capacity, a novel current-limiting strategy based on load harmonic current reconstruction is proposed for realizing the accurate limitation of selective current outputted by active power filter. Based on the evaluation criteria of using the minimum Total Harmonic Distortion (THD) of the compensated grid current to construct compensation result, an optimal compensation scheme for active power filter is proposed by adjusting harmonic contents in the current reconstruction waveform. Finally, corresponding experiments are carried out by employing a semi-physical experiment platform, in which current limiting and compensation effect between traditional current limiting strategy and harmonic current reconstruction strategy are compared and analyzed in load current steady state and dynamic state. Experimental results validate the feasibility and superiority of the proposed strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1504518).

Key words: active power filter; current reconstruction; selective harmonic; current limiting; optimization compensation

0 引言

并联型有源电力滤波器作为新一代的电网谐波、无功补偿设备, 具有补偿实时性好、动态响应速度快、不易与电网发生谐振等优点, 已被越来越

广泛地应用于商业与工业场合^[1-7]。由于指定次谐波电流分频补偿技术可更加高效地利用有限的APF容量, 提高APF输出不同次谐波电流的控制精度, 使得该技术成为了当前APF应用的主流^[8-11]。文献[12]采用的基于PI控制器的谐波同步旋转坐标系下指定次补偿策略, 具有物理意义清晰、运算量相对较小、控制器设计简单等优点, 其控制框图如图1所示。但当负载谐波电流大于APF的额定容量时, 由于该方法是指令电流与APF输出电流先做差, 再提取各次谐波进行补偿, 使得APF输出限流控制较为困难。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1504518); 河南省教育厅高等学校重点科研项目资助(15A470015); 河南理工大学控制工程省重点学科开放实验室项目资助(KG2016-04); 河南省高等学校重点科研项目资助(17A470001)

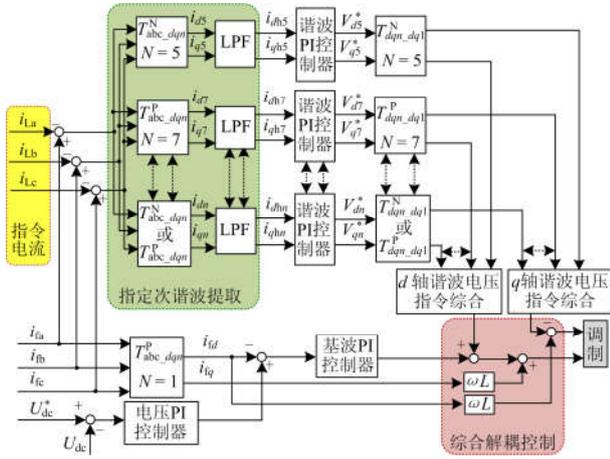


图 1 指定次谐波补偿控制框图

Fig. 1 Selective harmonic current compensation strategy

当前, 常见的限流策略可分为两类: 一类是截断限流, 即当指令电流 i_L 大于 APF 的最大设定电流 i_{max} 时发生截断, 使得指令电流 i_L 等于 APF 的最大设定电流 i_{max} , 从而保障 APF 的安全运行。但截断限流改变了指令电流的波形形状, 引入了新的谐波, 使得最终的补偿效果变差。

另一类是比例限流, 即将指令电流等比例地缩小到 APF 的补偿容量范围内。此类限流, 需计算限流系数, 计算时间为一定周期 T , 过小的 T 值会在负载电流稳态时影响 APF 输出波形的质量; T 值过大, 又会影响 APF 的动态性能, 在负载谐波电流波动时, APF 经常无法满功率输出^[13]。实际运行时, APF 限制输出的电流值为有效值, 以上两种限流策略均有较大的局限性。文献[14]结合比例限流的思路, 提出 APF 指定次谐波补偿电流有效值限流方法。但限流系数的计算受制于有效值的计算时间, APF 输出波形的质量受负载电流波动的影响较大。由于 APF 补偿谐波的频次不同, 按定义计算电流有效值的时间通常需要一个工频周期。文献[15]提出通过 dq 变换与低通滤波的方法分离各次谐波计算有效值, 这种方法可以提高有效值的计算时间, 但计算时间受制于低通滤波器的截止频率, 有效值计算延迟对 APF 输出波形的影响依然无法消除。

本文以并联型有源电力滤波器指定次谐波补偿的有效值限流方法为研究对象, 旨在消除限流系数的计算延迟对 APF 输出波形造成的影响, 实现 APF 输出各次谐波电流的优化限流。本文在传统比例限流的基础上, 结合加窗 FFT 算法, 提出了一种负载谐波电流重构的限流策略, 消除了限流系数计算延迟的影响; 根据补偿后电网电流总谐波畸变率(THD)最小原则构建补偿结果的评价体系, 提出了一种负

载电流重构波形的优化方案, 以实现 APF 指定次谐波的优化补偿; 最后, 对比传统 APF 限流补偿策略, 利用半实物平台对所提出的理论进行了验证。

1 基于谐波重构的指定次谐波限流策略

1.1 APF 比例限流过、欠流分析

当负载谐波电流大于 APF 的补偿容量时, 采用指令电流的有效值比例限流方法, 可最大程度地保留负载谐波电流的信息。在负载波动频繁的场所, 有着较为明显的限流优势。有效值比例限流如式(1)所示。

$$\begin{cases} \eta = I_{set} / I_L \\ I_L = \sqrt{\sum_{k=2}^n I_{L-k}^2} \\ i_{L_new} = \eta I_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_L 为负载电流瞬时值; i_{L_new} 为按比例缩小后的指令电流; η 为限流系数; I_{set} 为 APF 限流有效值; I_{L-k} 为 APF 所需补偿的第 k 次负载谐波电流有效值; I_L 为 APF 所需补偿的负载谐波电流有效值, $n \neq 1$, $n \in \mathbf{N}$ 。

稳态时, 式(1)的限流方法可有效地将负载谐波电流指令的有效值限制在 APF 的补偿容量范围内; 但当负载谐波电流波动时, APF 的稳定性很难保证。如当 i_L 突增阶跃跳变时, 由于有效值 I_L 存在计算延迟, 延迟时间内 η 将出现大于 1 的情况, 从而导致 APF 发生过流, 且有效值计算延迟的增加与阶跃幅值的增大会加剧过流现象, 严重时导致 APF 的损毁; 当 i_L 突减阶跃时, 有效值计算延迟的时间内 η 将出现小于实际限流系数的情况, 使得 APF 的输出电流小于额定容量, 这种现象同样会随着有效值计算延迟与跳变幅值的增大而加剧。若 i_L 连续地发生突增、突减波动, 传统方法限流的 APF 补偿系统将难以稳定, 甚至崩溃。

可见, 解决 APF 有效值比例限流的稳定问题可转变为, 解决指令电流瞬时值 i_L 与有效值 I_L 计算的同步问题。

1.2 负载谐波电流 FFT 滑窗重构算法

本文采用负载谐波电流有效值重构电流瞬时值的方法, 解决上述同步问题。将式(1)中的 i_L 改写为 i_{L_REC} , 如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_{L_REC} = \sum_{k=2}^n i_{L-k_REC} \\ i_{L-k_REC} = \sqrt{2} I_{L-k} \cdot \cos \theta_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{L_REC} 为 APF 输出补偿各次谐波的瞬时值之

和; $i_{L_k_REC}$ 为 APF 所需补偿的第 k 次负载谐波电流瞬时值; θ_k 为第 k 次谐波电流采样初始的角度值, $-\pi/2 \leq \theta_k \leq 3\pi/2$ 。

I_{L_k} 和 θ_k 可通过对负载电流的快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transformation, FFT) 获取, 具体过程可参考文献[9], 最终可得式(3)。

$$\begin{cases} I_{L_k} = \frac{\sqrt{2}}{N} M_k \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \\ \varphi_k = \arctan(B_k / A_k) \end{cases} \quad (3)$$

式中: N 表示每周期采样点数; A_k 、 B_k 分别为第 k 次谐波的实部与虚部; M_k 为第 k 次谐波幅值的校正系数; φ_k 为第 k 次谐波虚部与实部的反正切值, $-\pi/2 \leq \varphi_k \leq \pi/2$ 。 θ_k 与 φ_k 的对应关系如下。

当满足 $\tan \varphi_k > 0$ 与 $\sin \varphi_k > 0$, 或 $\tan \varphi_k \leq 0$ 与 $\sin \varphi_k \leq 0$ 时, θ_k 如式(4)所示。

$$\theta_k = \varphi_k + \Delta\varphi_k \quad (4)$$

当满足 $\tan \varphi_k > 0$ 且 $\sin \varphi_k < 0$, 或 $\tan \varphi_k \leq 0$ 且 $\sin \varphi_k \geq 0$ 时, θ_k 如式(5)所示。

$$\theta_k = \varphi_k + \pi + \Delta\varphi_k \quad (5)$$

式中, $\Delta\varphi_k$ 为修正角度。

为保障数据采集的完整性与实时性, FFT 采用滑窗法采集数据, 由于一次 FFT 的计算时间 t_{FFT} 通常会超过 APF 的开关周期 T_S , 因此需对传统的滑窗采样添加缓冲采样区, 如图 2 所示, 此时计算角度与实际重构角度的偏差需进一步修正。

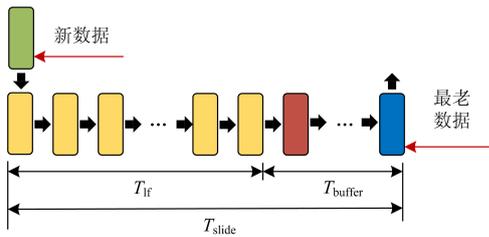


图 2 改进的滑窗采样法

Fig. 2 Improved slide window sampling strategy

图 2 中 T_{slide} 为滑窗周期, T_{buffer} 为缓冲周期, T_{1f} 为基波周期。新数据进入采样序列的最后一位, 其他数据依次向前移动一位, 剔除最前的一位数据, 由此形成采样滑窗, FFT 计算仅采用滑窗后 T_{1f} 内的数据。 T_{buffer} 与 APF 开关周期以及 FFT 的计算时间 t_{FFT} 相关, 具体如式(6)所示。

$$T_{buffer} = T_S \cdot \lceil t_{FFT} / T_S \rceil - T_{1f} \quad (6)$$

修正角度 $\Delta\varphi_k$ 如式(7)所示。

$$\Delta\varphi_k = \frac{2\pi T_{buffer}}{T_{1f}} k + \Delta\delta_k \quad (7)$$

式中: k 为谐波次数; $\Delta\delta_k$ 为各次谐波角度的微调值, 该值与角度的分辨率有关。

综合式(2)一式(7)可解决指令电流瞬时值 i_L 与有效值 I_L 计算的同步问题, 完成谐波电流的比例重构。

2 APF 谐波补偿的优化评价

APF 的补偿网络等效结构如图 3 所示, 图中: 负载为三相平衡的谐波负载, 负载相电流为 i_L , 电网侧电流为 i_S , APF 输出电流为 i_r ; Z_S 为系统等效阻抗, 其包含配电变压器漏感与输电线路的等效阻抗; Z_L 为公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)到负载的线路阻抗与负载交流侧等效阻抗之和。

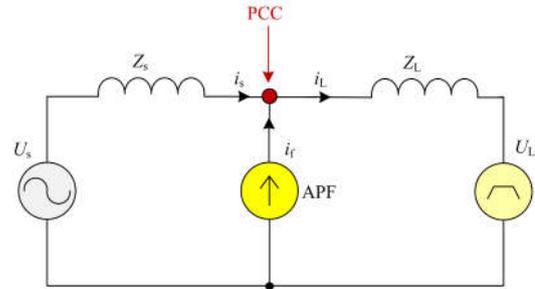


图 3 并联补偿网络等效结构图

Fig. 3 Equivalent circuit of the parallel compensation system

对 APF 的补偿结果应从两个方面来考虑: 一是补偿后负载谐波电流的放大效应; 二是补偿后电网电流的总谐波畸变率。

本文仅从补偿后电网电流总谐波畸变率最小的角度评价 APF 的优化方案。为减小补偿后负载谐波电流放大的影响。采取如下措施^[16-20]:

- 1) 指定次谐波补偿;
- 2) 忽略系统等效阻抗 Z_S , 增加 Z_L 的值。

3 重构谐波电流成分优化

负载谐波重构, 使得 APF 输出的谐波含量可根据优化评价的要求灵活调整。分析可知电网电流 THD 的补偿改善主要与三个补偿自由度相关:

- 1) 各次谐波补偿量配比;
- 2) 指定次谐波补偿对象;
- 3) 指定次谐波补偿数量。

下面将分别就这 3 个自由度对补偿后电网电流 THD 的影响进行探讨。

3.1 各次谐波补偿量最优配比

当负载谐波电流大于 APF 额定值时, APF 需按额定容量限流输出, 如式(8)所示, 下文均按此状况

进行讨论。

$$I_{\text{set}}^2 = \sum_{k=2}^n I_{f_k}^2 \quad (8)$$

式中, I_{f_k} 为 APF 输出的第 k 次谐波电流有效值。

补偿后电网电流 THD_A 如式(9)所示。

$$\begin{cases} \text{THD}_A = \frac{\sqrt{F(I_{f_k})}}{I_{L_1}} \\ F(I_{f_k}) = \sum_{k=2}^n (I_{L_k} - I_{f_k})^2 \end{cases} \quad (9)$$

考察 APF 输出各次谐波的最优配比, 使得 THD_A 值最小, 可转化为求 $F(I_{f_k})$ 的最小值问题。综合式(8)、式(9)可构建 Lagrange 函数, 如式(10)所示。

$$G(F, \lambda) = F(I_{f_k}) + \lambda \left(\sum_{k=2}^n I_{f_k}^2 - I_{\text{set}}^2 \right) \quad (10)$$

式中, λ 为 Lagrange 乘子。

分别对 $G(F, \lambda)$ 中的各次谐波电流 I_{f_k} 以及 λ 求偏导等零, 可得方程组(11)。

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial I_{f_2}} = 2(I_{L_2} - I_{f_2}) + 2\lambda I_{f_2} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial G}{\partial I_{f_n}} = 2(I_{L_n} - I_{f_n}) + 2\lambda I_{f_n} = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial \lambda} = \sum_{k=2}^n I_{f_k}^2 - I_{\text{set}}^2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

解得

$$I_{f_k} = \frac{I_{L_k}}{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_{L_k}^2}} \cdot I_{\text{set}} \quad (12)$$

由式(12)可得结论一: 在 APF 补偿容量确定的情况下, 采用负载谐波电流等比例缩小的谐波补偿方案, 补偿后电网电流 THD 最小。也就是说, 比例限流即为各次谐波补偿量的最优配比方案。

3.2 指定次谐波最优补偿对象

单次谐波补偿时, 若负载第 x 次谐波电流有效值 I_{L_x} 大于第 y 次谐波电流有效值 I_{L_y} , 对比第 x 次谐波与第 y 次谐波补偿后对电网电流 THD 的影响。设 THD_x 、 THD_y 分别为第 x 次、第 y 次谐波补偿后电网电流的 THD, 如式(13)所示。

由于 $I_{L_x} > I_{L_y}$, 由式(13)易得 $\text{THD}_x < \text{THD}_y$ 。由此可得结论二: 单次谐波补偿时, 补偿有效值最大次的谐波, 补偿后可获得电网电流 THD 最小值。

$$\begin{cases} \text{THD}_x = \frac{\sqrt{G_x}}{I_{L_1}} \\ \text{THD}_y = \frac{\sqrt{G_y}}{I_{L_1}} \\ G_x = (I_{L_x} - I_{\text{set}})^2 + I_{L_y}^2 + \cdots + I_{L_n}^2 \\ G_y = I_{L_x}^2 + (I_{L_y} - I_{\text{set}})^2 + \cdots + I_{L_n}^2 \end{cases} \quad (13)$$

多次谐波补偿时, 假设对 p 个谐波电流 a_1, \dots, a_p 次补偿后可获得最小的电网电流 THD, 对比对 q 个谐波 b_1, \dots, b_q 次的补偿。则 a_1, \dots, a_p 次谐波与 b_1, \dots, b_q 次谐波补偿后电网电流 THD 分别为 THD_a 、 THD_b , 其满足式(14)关系, 式中 I_{f_ak} 、 I_{f_bk} 分别为 APF 输出第 ak 次与第 bk 次谐波电流有效值。

$$\begin{cases} \text{THD}_a = \frac{\sqrt{G_a}}{I_{L_1}} \\ \text{THD}_b = \frac{\sqrt{G_b}}{I_{L_1}} \\ G_a = \sum_{k=1}^p (I_{L_ak} - I_{f_ak})^2 + \sum_{k=1}^q I_{L_bk}^2 + \cdots + I_{L_n}^2 \\ G_b = \sum_{k=1}^p I_{L_ak}^2 + \sum_{k=1}^q (I_{L_bk} - I_{f_bk})^2 + \cdots + I_{L_n}^2 \\ \text{THD}_a < \text{THD}_b \end{cases} \quad (14)$$

若采用比例限流方式, 其满足式(15)条件。

$$\begin{cases} I_{f_ak} = \frac{I_{L_ak}}{\sqrt{\sum_{k=1}^p I_{L_ak}^2}} \cdot I_{\text{set}} \\ \sum_{k=1}^p I_{f_ak}^2 = \sum_{k=1}^q I_{f_bk}^2 = I_{\text{set}}^2 \end{cases} \quad (15)$$

综合式(14)、式(15)易推得两组序列补偿需满足式(16)关系。

$$\sum_{k=1}^q I_{f_bk}^2 < \sum_{k=1}^p I_{f_ak}^2 \quad (16)$$

若 $p=q$, 使式(16)恒成立, 则需 $I_{f_ak} > I_{f_bk}$ 恒成立, 其中 $k=1, \dots, m$ 。由此可推得结论三: 在补偿多次谐波时, 依据各次谐波有效值的大小, 按由大到小顺序补偿即可获得补偿后电网电流 THD 的最小值。

3.3 指定次谐波最优补偿数量

若 $p \neq q$, 使式(16)恒成立, 则需在结论三的基础上附加条件 $p > q$ 。可得结论四: 在补偿多次谐波时, 按谐波有效值由大到小顺序补偿, 补偿谐波的个数越多, 补偿后电网电流的 THD 值越小。

实际补偿时，指定次谐波的补偿数量可根据 APF 自身补偿能力(可输出的最大指定次谐波)尽可能多地输出指定次谐波，即可在补偿数量这一自由度上获得最佳的补偿效果。

4 实验与结果分析

实验室利用 DSP28335 控制板与 NI Crio-9039 搭建了半实物平台，对上述理论进行验证。补偿网络如图 3 所示。忽略系统等效阻抗 Z_s ，PCC 点到负载的线路阻抗与负载交流侧等效阻抗之和 Z_L 为 0.1 mH，电网线电压有效值为 380 V；谐波源采用三相二极管整流桥，二极管整流桥直流侧电容容量为 220 mF；APF 额定容量为 50 A，APF 指定次谐波补偿为 5、7、11、13 次谐波。对比实验为文献[21]所述的传统比例截断限流法。实验波形数据导出后，利用 Matlab 的 FFT Analysis 进行处理分析。

4.1 稳态实验

二极管整流桥直流侧电阻 1.5 Ω ，负载相电流有效值为 268 A。APF 限流测试范围为 20~50 A，测试步长为 5 A。采样频率为 10 kHz，取样时长为 1 s。采用与平均数作均方差的方法对数据进行清洗。传统限流与重构优化限流的限流误差对比如图 4 所示，补偿后电网电流 THD 对比如图 5 所示。

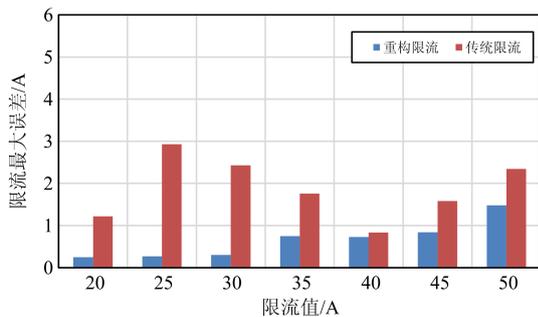


图 4 限流误差对比

Fig. 4 Comparison of current-limiting error

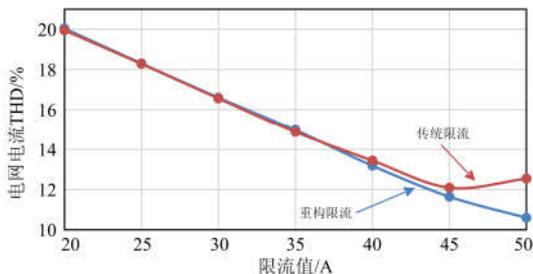


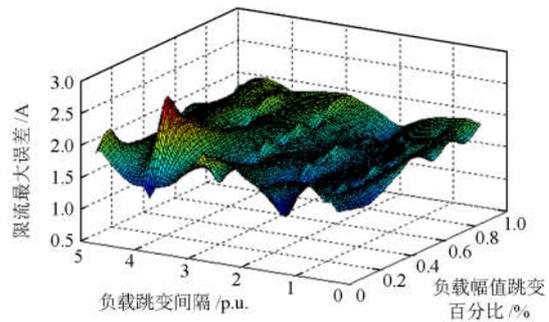
图 5 稳态限流补偿后电网电流 THD 对比图

Fig. 5 Grid current THD comparison after current-limiting compensation in static state

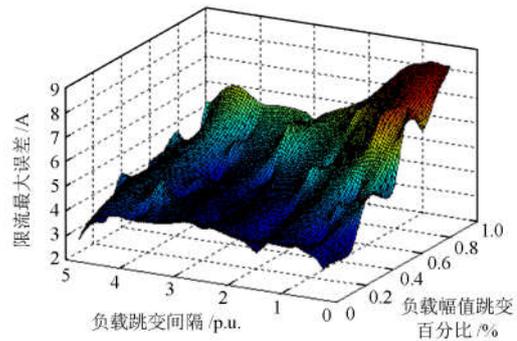
由图 4 和图 5 可知，稳态时重构限流策略较传统限流方法差别不大。在限流精度上重构限流由于对每次谐波进行了重构校准，使得限流精度比传统限流提高了 2%~10%。从电网电流 THD 的补偿效果来看，重构限流略好于传统限流，两者平均误差约为 2.6%。

4.2 动态实验

为考察两种方法的动态补偿效果，在二极管整流桥直流侧原 1.5 Ω 电阻上并联一个周期跳变的电阻，该电阻按照跳变周期投入与切除。跳变周期从 $0.5T_r$ 到 $5T_r$ ，步长 T_r ，其中 $T_r=0.02$ s；跳变幅值从 $0.1R_L$ 到 $1R_L$ ，步长 $0.1R_L$ ，其中 $R_L=1.5 \Omega$ ；APF 输出限流 50 A，补偿指定次谐波为 5 次、7 次、11 次、13 次。两种方法的动态限流最大误差如图 6 所示。



(a) 重构限流限流误差



(b) 传统限流限流误差

图 6 动态下重构限流与传统限流限流误差对比图

Fig. 6 Current-limiting error comparison between the proposed strategy and traditional one in dynamic state

由图 6 可看出：重构限流的限流误差基本恒定，且受负载波动影响小，限流误差均小于 5.2%；负载的周期跳变与幅值跳变对传统方法的限流均产生影响，尤其是负载的幅值跳变影响更加强烈。负载大范围跳变时，传统方法由于 APF 限流指令的有效值计算与瞬时值的不同步，使得 APF 限流波形未按预期等比例缩放，而是使指令电流发生了截断限流(负

载突增阶跃)和过度的缩小(负载突减阶跃), 导致最终的限流误差最大可达 16.26%。

图 7 为补偿前不同负载波动下, 电网电流的 THD 值。图中可见, 负载幅值跳变对电网电流 THD 影响较大。

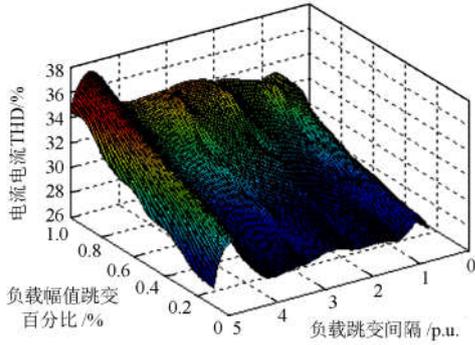
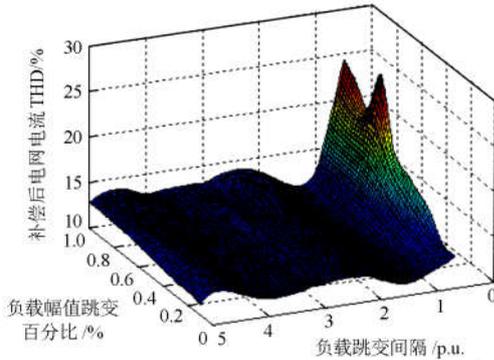


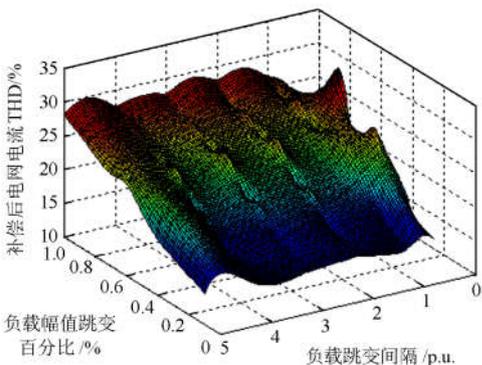
图 7 动态下补偿前电网电流 THD

Fig. 7 Grid current THD before compensation in dynamic state

图 8 为负载波动下两种限流方法对电网电流补偿后的 THD。重构限流虽然可获得较好的限流效果, 但由于有效值计算的延迟 T_r , 使得负载在大于



(a) 重构限流补偿电网电流 THD



(b) 传统限流补偿电网电流 THD

图 8 动态下重构限流与传统限流电网电流 THD 对比图

Fig. 8 Grid current THD comparison of two current-limiting strategies after compensation in dynamic state

有效值计算延迟的时间跳变时, 重构限流的补偿效果对负载跳变幅值与跳变周期均不敏感, 能够实现较好的电网电流 THD 补偿效果, 补偿后电网电流 $THD < 13.41\%$; 而在小于有效值计算延迟 T_r 的负载跳变, 重构限流的补偿效果对负载跳变的幅值和周期均敏感, 不能实现准确地补偿, 补偿后电网电流 THD 最大处位于负载跳变幅值最大、跳变周期最小处, 此刻电网电流 $THD = 24.36\%$ 。

传统限流方法的补偿效果, 对负载跳变幅值与跳变周期均敏感。由于负载大范围跳变时, 截断限流改变了 APF 指令电流的形状, 给指令电流注入了新的谐波, 导致传统方法的补偿效果变差, 补偿后的电网电流 $THD \geq 14.26\%$ 。由于传统限流同样受到有效值计算延迟 T_r 的影响, 负载在 T_r 内跳变时, 传统限流的补偿效果加剧变差, 补偿后的电网电流最差的 THD 值为 31.08%。

4.3 重构优化实验

为验证第3节所提重构优化补偿方法的优越性, 对比现场常用补偿方法: 固定补偿有效值最大的几次谐波电流, 考察稳态时不同负载下补偿后的电网电流 THD。

其中 APF 50 A 限流输出, 重构优化方法对谐波含量排前三的三次谐波进行指定次补偿, 分别为 5 次、7 次、11 次谐波电流, 传统方法仅对谐波大小占前两位的 5 次、7 次谐波电流进行指定次补偿, 两种方法均采用等比例限流, 仅考虑稳态补偿效果。谐波负载依然采用三相二极管桥, 负载电流有效值在 286 A 的基础上, 按 10% 递增, 可得不同负载电流下两种方法补偿后电网电流 THD 的对比图, 如图 9 所示。

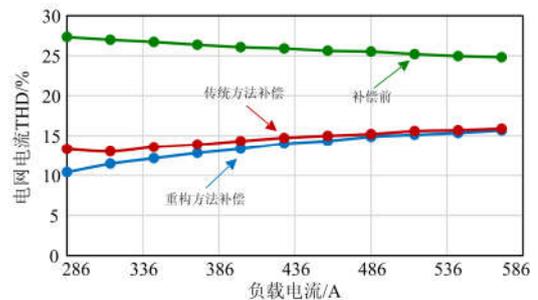


图 9 负载幅值跳变下重构限流与传统限流补偿电网电流 THD 对比图

Fig. 9 Grid current THD comparison of two current-limiting strategies in load amplitude abrupt change

由图 9 可见, 重构优化方法比传统补偿方法补偿后的电网电流 THD 略好, 在同样 APF 补偿容量下, 电网电流 THD 平均降低了 1 个百分点。

5 结论

本文针对有源电力滤波器指定次谐波补偿的限流问题开展了研究,详细论述了采用FFT重构负载谐波电流的限流方法,解决了APF限流时有效值计算与瞬时值采样的同步问题,最终实现了APF指定次谐波的精确限流补偿。在构建APF补偿评价的基础上,进一步论证了针对不同次谐波补偿时,APF指定次谐波的优化补偿方案,即根据APF可输出的特定次谐波能力,将负载各次谐波有效值按由大到小的优先补偿顺序排列,尽可能多地补偿特定次谐波的个数,按照等比例缩放的限流原则,利用负载电流谐波有效值重构负载谐波瞬时电流的方法进行补偿。实验结果证实:

1) 负载稳态时,重构限流的限流精度高于传统限流。采用重构限流补偿的电网电流THD比传统方法略有提高,平均提高了2.6%。

2) 负载动态时,重构限流无论是限流精度,还是补偿效果均全面优于传统限流方法。但由于两种方法都存在负载谐波电流有效值的计算延迟,有效值计算延迟内的负载跳变对两种方法的补偿效果均有影响,但重构限流的补偿效果依然优于传统限流。

3) 重构优化实验,证实重构优化补偿方法可在相同的APF容量下有效地提升电网电流的补偿效果。

参考文献

- [1] 许胜, 费树岷, 赵剑锋, 等. 多模块APF并联系统高频谐波环流分析与控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 60-68.
XU Sheng, FEI Shumin, ZHAO Jianfeng, et al. Analysis and control of high-frequency harmonic circular currents in multi-module APF parallel system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 60-68.
- [2] 许胜, 费树岷, 赵剑锋, 等. 基于同步旋转坐标系的有源电力滤波器控制延时动态预测补偿策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 161-169.
XU Sheng, FEI Shumin, ZHAO Jianfeng, et al. The dynamic predictive compensation strategy for the time delay of active power filter control system based on synchronous rotating frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 161-169.
- [3] XU Chen, DAI Ke, CHEN Xinwen, et al. Parallel resonance detection and selective compensation control for SAPF with square-wave current active injection[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2017, 64(10): 8066-8078.
- [4] 张栋梁, 谢业华, 刘娟, 等. 基于遗传算法的有源电力滤波器滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 69-74.
ZHANG Dongliang, XIE Yehua, LIU Juan, et al. Sliding mode control of active power filters based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 69-74.
- [5] 张艳军, 杨晟飞, 杨祯. 一种无谐波检测的中频有源电力滤波器[J]. 陕西电力, 2016, 20(12): 73-75.
ZHANG Yanjun, YANG Shengfei, YANG Zhen. Medium frequency active power filter without harmonic detection[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 20(12): 73-75.
- [6] 蒋美娜, 马晓春, 孙占龙, 等. 改进型STATCOM控制策略研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(12): 34-38.
JIANG Meina, MA Xiaochun, SUN Zhanlong, et al. Control strategy for improved STATCOM[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(12): 34-38.
- [7] 马鸿雁, 孙凯, 魏庆, 等. PWM逆变器相电流重构研究与误差分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 108-114.
MA Hongyan, SUN Kai, WEI Qing, et al. Phase current reconstruction method for PWM inverter and error analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 108-114.
- [8] 许胜, 费树岷, 赵剑锋. 同步旋转坐标系中谐波电流分次控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 154-162.
XU Sheng, FEI Shumin, ZHAO Jianfeng. Harmonic current frequency dividing control strategy based on synchronous rotating frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 154-162.
- [9] 张树全, 戴珂, 谢斌, 等. 并联型有源电力滤波器按容量比例分频端补偿并联控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 115-121.
ZHANG Shuquan, DAI Ke, XIE Bin, et al. Parallel control of shunt active power filters with capacity proportion frequency allocation compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 115-121.
- [10] 张树全. 基于分频控制的并联型APF关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
ZHANG Shuquan. Research on key techniques of shunt active power based on frequency dividing control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [11] 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.
- [12] 张树全, 戴珂, 谢斌, 等. 多同步旋转坐标系下指定次谐波电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 55-62.
ZHANG Shuquan, DAI Ke, XIE Bin, et al. Selective harmonic current control based on multiple synchronous rotating coordinate[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 55-62.
- [13] 万杰星. 模块化 APF 多台并联运行关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
WAN Jiexing. Key techniques research on operation of multi-modular shunt APF[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [14] 王异凡. 多模块并联 APF 关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
WANG Yifan. Research on key techniques of multi-module shunt APF[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [15] 姚芳. 多台 APF 并联技术及其实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
YAO Fang. Multiple APF parallel technology and implementation[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [16] 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.
- [17] CONZATTI R B, FERREIRA S C, DA SILVA C H. Hybrid active power filter applied to harmonic compensation of current-source type and voltage-source type nonlinear loads[C] // IEEE Power Electronics Conference, October 27-31, 2013, Gramado, Brazil: 1257-1262.
- [18] 李鹏, 蒋晓明, 黄俊华, 等. 并联型 APF 补偿容性非线性负载不稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 55-60.
LI Peng, JIANG Xiaoming, HUANG Junhua, et al. Instability mechanism study of shunt active filter in compensation of capacitive nonlinearity load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 55-60.
- [19] 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, July 5-8, 2009, Seoul, South Korea: 1835-1840.
- [20] 陆康, 刁倩. 有源滤波器在不同网络中的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 143-149.
LU Kang, DIAO Qian. Analysis of active power filter applications in different networks[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 143-149.
- [21] 杨振宇, 赵剑锋, 唐国庆. 并联型有源电力滤波器限流补偿策略研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(3): 21-24.
YANG Zhenyu, ZHAO Jianfeng, TANG Guoqing. Research on current limiting compensation scheme of shunt APF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(3): 21-24.

收稿日期: 2017-07-23; 修回日期: 2017-09-09

作者简介:

张国澎(1981—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电能质量、大功率变流技术; E-mail: hpoyz@163.com

周犹松(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量、大功率直流变换技术。E-mail: z2410767638@163.com

(编辑 周金梅)