

基于虚阻尼控制的 T-SAPF 滤波系统谐振抑制研究

魏家昊¹, 宋海洋¹, 赵玉林², 常鑫瑞³

(1. 国网泰州供电公司, 江苏 泰州 225300;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

3. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了降低整流桥、变频器等强非线性负载向电网引入的谐波污染,提出一种由并联型有源电力滤波器(SAPF)与晶闸管投切滤波器(TSF)构成的 T-SAPF 混合滤波系统。针对 TSF 可能与电网发生并联谐振的问题,在对谐振机理进行分析的基础上,提出一种可以抑制系统并联谐振的 SAPF 虚阻尼控制策略,将自调谐滤波算法应用于阻尼电流指令的提取,并根据三个约束条件来界定阻尼系数的有效值域。仿真结果表明,该虚阻尼控制策略能够有效抑制系统的并联谐振,降低谐振时 PCC 电压的畸变程度,同时保证谐波电流的补偿效果。

关键词:T-SAPF; 虚阻尼控制; 阻尼系数; 谐振抑制; 谐波补偿

中图分类号:TM714

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)03-0048-07

0 引言

随着电力电子装置在工业中的大量运用,电网的谐波污染问题日益严重。并联型有源电力滤波器(shunt active power filter, SAPF)具有优异的谐波补偿效果,但受到目前电力电子器件的容量限制,单台 SAPF 的补偿容量较小,在大电流场合下,需要采用多台 SAPF 并联或多重化、多电平技术来扩充补偿容量,经济成本极高^[1-5]。晶闸管投切滤波器(thyristor switched filter, TSF)具有较低的成本、较高的补偿容量,可以滤除特定次数的谐波电流,同时兼具无功补偿功能,控制灵活且装置寿命更长。但 TSF 本质上属于由电感、电容元件构成的无源滤波器,易与电网发生谐振,所以不能单独投入使用^[6-8]。

为了降低谐波污染治理成本,保证谐波电流的补偿精度及电网的稳定运行,本文将 SAPF 与 TSF 并联构成 T-SAPF 混合滤波系统,并提出一种适用于 SAPF 的虚阻尼控制策略从而抑制 TSF 与电网的并联谐振。基于 Simulink 仿真环境搭建 T-SAPF 系统模型并进行仿真分析,验证虚阻尼控制策略对抑制系统谐振及提升谐波补偿效果的有效性。

1 T-SAPF 运行机理及谐振现象分析

本文提出的 T-SAPF 混合滤波系统拓扑结构及运行机理如图 1 所示。在 0.38 kV 低压配电网中,采用 SAPF 与 TSF 并联的 T-SAPF 拓扑结构具有明

显的优势。通过设置多组滤波通道,TSF 可以滤除整流桥等非线性负载产生的某几次含量较高的谐波电流,从而降低对 SAPF 补偿容量的需求,当冲击性负载投入时又能够实现 SAPF 逆变桥的保护。同时,SAPF 可以对 TSF 未滤尽的谐波电流进行精细化补偿,进一步降低网侧电流的总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)。因此,考虑到安全性、经济性与高效性,TSF 与 SAPF 必须结合使用。

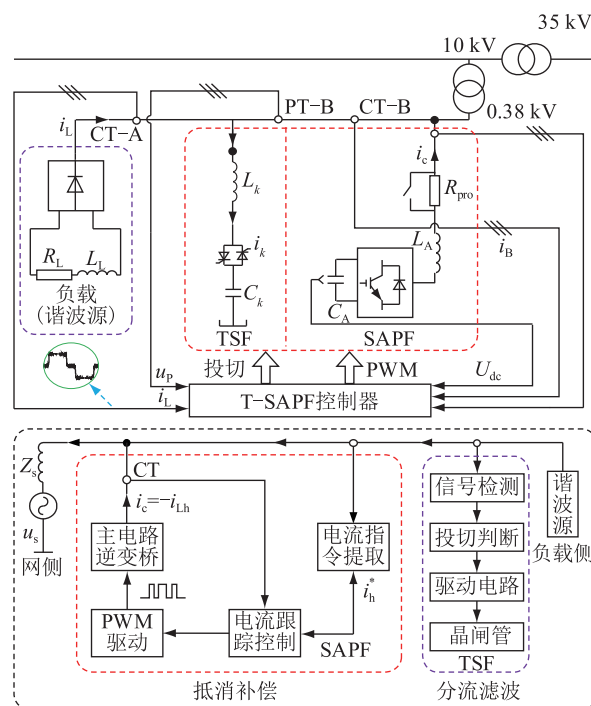


图 1 T-SAPF 混合滤波系统拓扑结构及运行机理
Fig.1 Topology structure and operation mechanism of T-SAPF filtering system

在 T-SAPF 控制系统中,SAPF 控制回路由谐波

收稿日期:2018-01-17;修回日期:2018-03-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177028)

电流检测环节、电流跟踪控制环节以及驱动电路构成。通过电流跟踪控制使主电路逆变桥向电网注入一个与负载谐波电流幅值相等、相位相反的补偿电流,与负载侧产生的谐波电流相互抵消,从而使网侧电流仅含有工频正弦的基波分量^[9-12]。TSF 通过信号检测、投切判断等环节确定要投切的滤波器组,再通过驱动电路控制晶闸管的导通或关断完成投切过程。晶闸管导通时,TSF 主电路可等效为一个单调谐 LC 滤波器,根据串联谐振准则, k 次 TSF 滤波通道的电感 L_k 与电容 C_k 存在如式(1)所示的关系^[13-15]。

$$L_k = \frac{1}{k^2 \omega_1^2 C_k} \quad (1)$$

式中: ω_1 为电网基波角频率。

由式(1)可知,该通道在除 k 次外其他次谐波频率处的等效阻抗 Z_T 很大,而在 k 次谐波频率处 Z_T 几乎为零,发生串联谐振,可以旁路需要滤除的谐波,达到谐波抑制的目的。然而由于电网感性阻抗的存在,TSF 滤波通道的 LC 元件可能与其发生并联谐振,引发一系列可能危害电力系统正常运行的问题。系统并联谐振原理如图 2 所示^[16-17]。

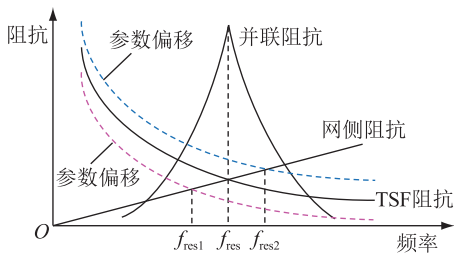


图2 TSF 与电网并联谐振原理图

Fig.2 Schematic diagram of parallel resonance between TSF and the grid

由图 2 可知,在谐振频率处,系统的并联阻抗达到极大值,如果非线性负载向电网注入与谐振频率同频的谐波电流,公共连接点 (point of common coupling, PCC) 上将产生极大的谐波电压,PCC 电压严重畸变,同时线路电流谐波污染更加恶化。例如,三相不控整流桥负载在工业中应用广泛,其产生的阶梯形电流含有极高的 5、7 次谐波成分,因此 T-SAPF 系统需设置 5、7 次两组 TSF 滤波通道。在系统参数设计时,应选取合适的 TSF 通道参数值使系统避开 5、7 次谐振点。但随着使用时间的增长及外部环境的变化,TSF 通道参数可能发生偏移,其与电网的并联谐振点可能被重新拉回 5 或 7,从而使系统在 5、7 次谐波频率处发生谐振。

为简化分析,仅以 5 次 TSF 滤波通道投入运行为例,得到 T-SAPF 系统的单相谐波等效电路,如图

3 所示。

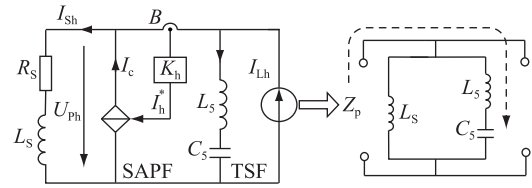


图3 T-SAPF 系统单相谐波等效电路

Fig.3 Single-phase harmonic equivalent circuit of T-SAPF system

由图 3 可以推导出负载谐波电流经过的系统并联阻抗 Z_p 的表达式,如式(2)所示。

$$Z_p = \frac{Z_T Z_S}{Z_T + Z_S} = \frac{\omega^3 L_5 L_S C_5 - \omega L_S}{\omega^2 (L_5 + L_S) C_5 - 1} \quad (2)$$

式中: Z_S 为电网阻抗; L_S 为网侧等效电感; L_5 为 5 次 TSF 通道电感; C_5 为 5 次 TSF 通道电容。

令式(2)的分母为 0,经推导可得到系统的并联谐振点 γ_p ,如式(3)所示。

$$\gamma_p = \frac{1}{2\pi f_N \sqrt{(L_5 + L_S) C_5}} \quad (3)$$

式中: f_N 为电网工频,我国为 50 Hz。

取网侧等效电感为 0.03 mH,设定 5 次 TSF 通道电感值为 0.192 mH,电容值为 2.122 mF。将以上参数代入式(3)可得此时系统的并联谐振点为 4.64,代入式(2)可得系统在 5 次谐波频率处的等效阻抗几乎为 0,此时系统不会发生并联谐振,PCC 电压也不会产生畸变。

当 5 次 TSF 通道的电感参数 L_5 偏移时,系统在 5 次谐波频率处的等效并联阻抗如图 4 所示。

图4 TSF 电感参数偏移时的系统等效并联阻抗

Fig.4 Equivalent shunt impedance of system when the inductance parameter of TSF is shifted

由图 4 可知,当 5 次 TSF 通道的电感参数由 0.192 mH 偏移至 0.182 mH,即偏移-5%时,系统在 5 次谐波频率处的等效并联阻抗陡增至 5000 Ω ,由于负载产生的谐波电流中 5 次谐波含量很高,此时 PCC 电压中的 5 次谐波分量会被剧烈放大,线路电流波形也会恶化,网侧谐波污染更加严重。

2 SAPF 虚阻尼控制策略

由于 TSF 与电网发生并联谐振时,PCC 电压会

产生严重畸变,不满足 0.38 kV 电压等级下 PCC 电压 $\text{THD} \leq 5\%$ 的标准,故以此作为系统并联谐振的判据。通过给 T-SAPF 系统中的 SAPF 增加阻尼功能,可以有效抑制并联谐振水平。适用于 SAPF 的虚阻尼控制策略原理如图 5 所示。

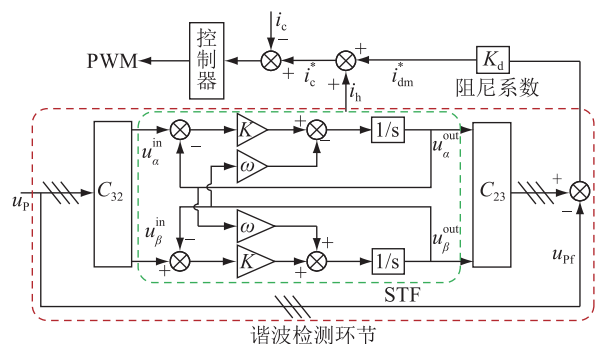


图 5 SAPF 虚阻尼控制策略原理框图

Fig.5 Principle block diagram of virtual damping control strategy of SAPF

当谐振发生时,SAPF 的谐波检测环节从 PCC 畸变电压中提取出基波分量,用畸变电压减去此基波分量得到 PCC 谐波电压分量,将其与阻尼系数 K_d 相乘可得到阻尼电流指令,最终通过电流跟踪环节完成阻尼电流的闭环控制,向 PCC 注入阻尼电流,从而实现系统并联谐振的抑制。虚阻尼控制下的 T-SAPF 系统单相谐波等效电路如图 6 所示。

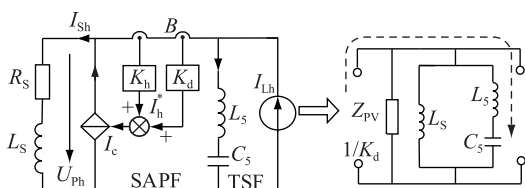


图 6 虚阻尼控制下 T-SAPF 系统单相谐波等效电路

Fig.6 Single-phase harmonic equivalent circuit of T-SAPF system under virtual damping control strategy

由图 6 可以推导出,加入虚阻尼控制后,系统的并联等效阻抗如式(4)所示。

$$Z_{pv} = \frac{\frac{1}{K_d} Z_p}{\frac{1}{K_d} + Z_p} < \frac{1}{K_d} \quad (4)$$

由式(4)可知,谐振时的系统并联阻抗 Z_p 可视为无穷大,在虚阻尼控制下 SAPF 可等效成一个与系统并联阻抗 Z_p 并联的虚拟电阻,此时系统的并联阻抗变为 Z_{pv} ,其值小于阻尼系数的倒数。通过设定合适的阻尼系数,即可将并联阻抗 Z_{pv} 限制在一定范围内,从而抑制 PCC 谐波电压放大倍数,达到系统谐振抑制的目的。

本算法将自调谐滤波器(self-tuning filter, STF)

应用到阻尼指令电流的提取中,优点在于避免了传统检测方法所需要的同步旋转坐标变换环节,减小了运算量,同时 STF 的频率响应与带通滤波器相仿,可以几乎无衰减地提取期望的频率信号,且检测精度更高。由图 6 可知,PCC 三相畸变电压经过 Clark 变换,在 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下的表达式为:

$$\begin{cases} u_{\alpha}^{\text{out}}(s) = \frac{Ks + K^2}{(s + K)^2 + \omega^2} u_{\alpha}^{\text{in}}(s) - \frac{K\omega}{(s + K)^2 + \omega^2} u_{\beta}^{\text{in}}(s) \\ u_{\beta}^{\text{out}}(s) = \frac{K\omega}{(s + K)^2 + \omega^2} u_{\alpha}^{\text{in}}(s) + \frac{Ks + K^2}{(s + K)^2 + \omega^2} u_{\beta}^{\text{in}}(s) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_{\alpha}^{\text{in}}(s), u_{\beta}^{\text{in}}(s)$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下 STF 的输入电压; $u_{\alpha}^{\text{out}}(s), u_{\beta}^{\text{out}}(s)$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下 STF 的输出电压; ω 为截止频率。为了在截止频率处得到幅值为 1 且相位延迟为 0 的频率响应而引入了辅助参数 K 。

由式(5)可整理得 STF 的传递函数为:

$$G_{\text{STF}}(s) = K \frac{(s + K) + j\omega}{(s + K)^2 + \omega^2} \quad (6)$$

由式(6)可以绘制出不同 K 值下 STF 的幅频响应和相频响应曲线,如图 7 所示。

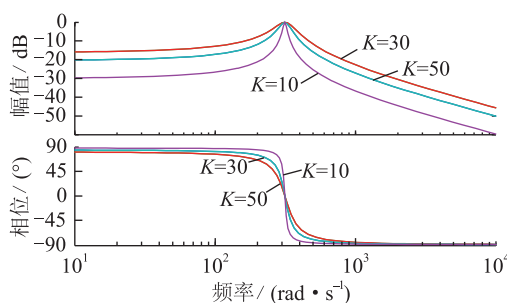


图 7 STF 的幅频响应和相频响应曲线

Fig.7 Bode diagram of STF

由图 7 可知,在 50 Hz 频率处,信号经过 STF 处理不会发生相移,同时幅频响应为 1,STF 可以从畸变的 PCC 电压信号中完整地提取出基波分量,进而得到 PCC 谐波电压,从而获得阻尼电流指令,本文中取 $K=10$ 。

3 阻尼系数的值域界定

阻尼电流指令需要限定在一定范围内才能确保 T-SAPF 与电网稳定、可靠运行,因此需要确定阻尼系数的值域。本文以谐振抑制效果、谐波补偿效果及 SAPF 补偿容量限制为约束条件来界定 K_d 的有效值域。

加入虚阻尼后的 T-SAPF 的等效控制框图如图 8 所示。

为了抑制 PCC 谐波电压 U_{pi} 放大倍数,根据图

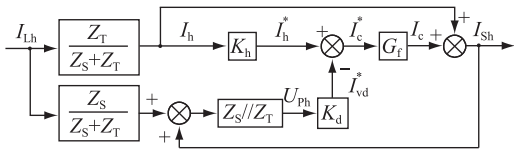


图8 加入虚阻尼后的 T-SAPF 等效控制框图

Fig.8 Equivalent control block diagram of T-SAPF with virtual damping

8 可以推导出负载谐波电流 I_{Lh} 对 PCC 谐波电压的影响,忽略电流跟踪环节的误差,即令 $G_f=1$,得到式(7)。

$$\frac{U_{ph}}{I_{Lh}} = \frac{s^3(1+K_h)L_S L_5 C_5 + s(1+K_h)L_S}{s^2(L_S+L_5)C_5 + sK_d L_S + 1} \quad (7)$$

式中: K_h 为谐波补偿系数。式(7)含有振荡环节,其分母可化为式(8)所示的形式。

$$s^2 + s \frac{K_d L_S}{(L_S+L_5)C_5} + \frac{1}{(L_S+L_5)C_5} \quad (8)$$

由式(8)可得系统阻尼比 ξ 如式(9)所示。

$$\xi = \frac{K_d}{2} \sqrt{\frac{(L_S+L_5)}{C_5}} \quad (9)$$

当阻尼比 $\xi \geq \sqrt{2}/2$ 时式(7)幅频特性上的谐振峰完全消失,即 U_{ph} 不会被放大,由式(9)可得阻尼系数的第一值域,如式(10)所示。

$$K_d \geq \sqrt{\frac{2C_5}{(L_S+L_5)}} \quad (10)$$

在 0.38 kV 电压等级下,PCC 电压与网侧电流 THD 的期望值为分别为 5% 和 8% (IEEE 519 标准)^[18]。由于系统谐振点被拉低至 5,加入阻尼控制后的 5 次谐波电压 U_5 与基波电压 U_1 需满足式(11)。

$$\frac{U_5}{U_1} = \frac{Z_{PV} I_5}{U_1} < 0.5 \frac{Z_{PV} I_1}{U_1} \times 8\% < 2.5\% \quad (11)$$

式中: I_1 为网侧基波电流有效值。

根据式(11)可知,加入虚阻尼控制后的系统并联等效阻抗需满足式(12)。

$$Z_{PV} < \frac{U_1}{3.2I_1} \quad (12)$$

联立式(4)及(12),要想使电压、电流 THD 达到期望值,阻尼系数的第二值域需满足式(13)。

$$K_d > \frac{3.2I_1}{U_1} \quad (13)$$

考虑本文设计的 SAPF 容量限制,设其补偿电流上限为 I_{c-max} ,阻尼系数的第三值域应满足:

$$K_d < \frac{I_{c-max}}{0.1U_1} \quad (14)$$

综上所述,阻尼系数的取值范围需同时满足式

(10)、(13)及(14),本文 TSF 仅设置一组 5 次滤波通道,因此阻尼系数的有效值域如式(15)所示。

$$\max \left[\frac{3.2I_1}{U_1}, \sqrt{\frac{2C_5}{(L_S+L_5)}} \right] < K_d < \frac{I_{c-max}}{0.1U_1} \quad (15)$$

4 仿真结果及分析

基于 MATLAB/Simulink 平台搭建 T-SAPF 系统的仿真模型,采用晶闸管整流桥带阻感性负载作为谐波源,电流 THD 达 24%。PCC 电压 U_p 设定为 380 V,系统其余关键参数如表 1 所示。

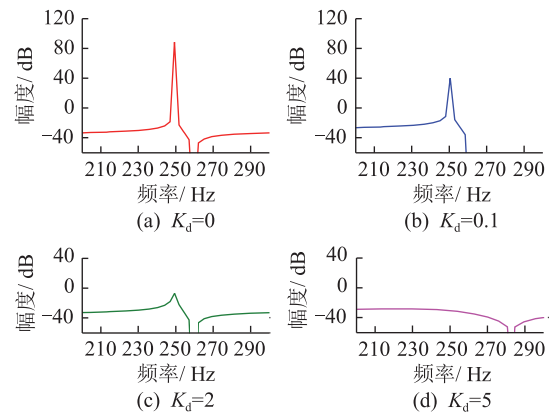
表 1 T-SAPF 系统仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of T-SAPF system

参数名称	符号	数值
SAPF 交流侧连接电抗/mH	L_A	2.0
SAPF 直流母线电压/V	U_{dc}	800
SAPF 直流母线电容/ μ F	C_A	1000
SAPF 主电路开关频率/kHz	f_{sw}	10
SAPF 补偿电流上限/A	I_{c-max}	200
网侧等效电感/mH	L_S	0.03
TSF 通道电感(偏移后)/mH	L_5	0.182
TSF 通道电容/mF	C_5	2.122

在 $I_1 \leq 530$ A 条件下,将表 1 各参数代入式(15)可得阻尼系数的有效值域为 $4.47 < K_d < 5.26$ 。

以 $K_h = -0.95$ 为例,在不同取值的 K_d 下,式(7)的幅频、相频特性曲线如图 9 所示。

图9 不同阻尼系数下 U_{ph}/I_{Lh} 幅频、相频特性曲线Fig.9 Bode diagram of U_{ph}/I_{Lh} under different damping coefficients

由图 9 可知,当阻尼系数 K_d 取值为 0 时,若系统发生并联谐振时不加入虚阻尼控制,系统在 250 Hz 频率处出现高达 80 dB 的谐振尖峰,非线性负载产生的 5 次谐波电流注入 PCC 会产生极大的 5 次谐波电压;加入虚阻尼控制后,随着阻尼系数 K_d 取值的逐步增大,谐振峰不断被削弱;当 K_d 取值为 5 时,系统在 250 Hz 频率处的谐振尖峰被削减至 -40

dB 以下,此时该谐振尖峰完全消失,PCC 电压恢复正常。可见,加入虚阻尼控制可以有效抑制系统的并联谐振。

仿真中,当系统发生并联谐振时,在虚阻尼控制下系统 PCC 电压与网侧电流波形如图 10 所示,其中阻尼系数取值为 5,满足式(15)的要求。

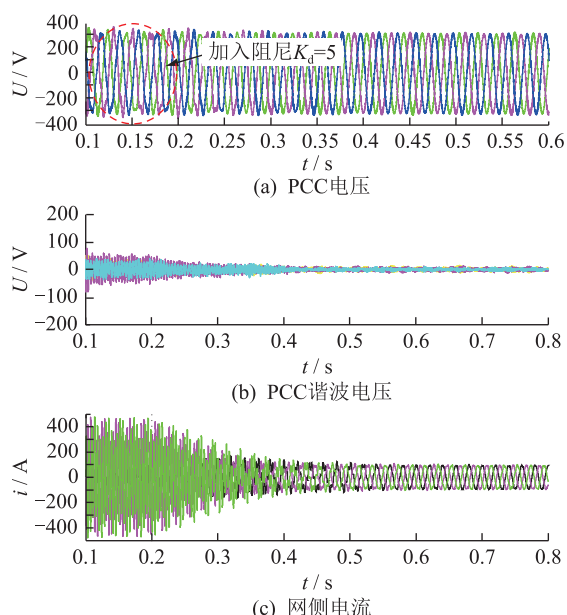


图 10 虚阻尼控制下 PCC 电压与网侧电流变化

Fig.10 Change of PCC voltage and current of grid side under the virtual damping control

系统发生谐振时 PCC 电压 U_p 发生严重畸变,此时网侧电流 I_s 激增数倍并且失去正弦形态;0.2 s 后,在 SAPF 的阻尼作用下, U_p 逐渐恢复正弦, I_s 也逐渐衰减恢复到正常值;0.5 s 后, SAPF 在阻尼电流指令中加入谐波电流补偿信号,波形逐渐呈现正弦。以 A 相为例, U_p 与 I_s 的傅里叶分析 (Fast fourier transformation, FFT) 结果如图 11 所示。

由图 11 可知,系统谐振时,PCC 电压 THD 达到 13.21%,加入阻尼控制后,PCC 电压 THD 最终下降到 2.17%,满足 0.38 kV 供电系统电压 THD 不大于 5% 的标准;谐振时网侧电流 THD 高达 92.54%,5 次谐波电流含量极高,加入阻尼控制后电流 THD 锐减,0.5 s 时 SAPF 加入谐波补偿环节,网侧电流 THD 最终稳定在 3.83%,满足小于 8% 的标准。当阻尼系数的取值不满足式(15)时,在虚阻尼控制下 PCC 电压波形及其 FFT 分析如图 12 所示。

由图 12 可知,当 $K_d=1$ 时,在 SAPF 的阻尼作用下 PCC 电压 THD 恢复为 6.74%,当 $K_d=2$ 时,PCC 电压 THD 恢复为 5.83%,但均不满足 5% 以下的指标要求,电压质量不合格,也反映出式(15)对于阻尼系数取值的重要性。

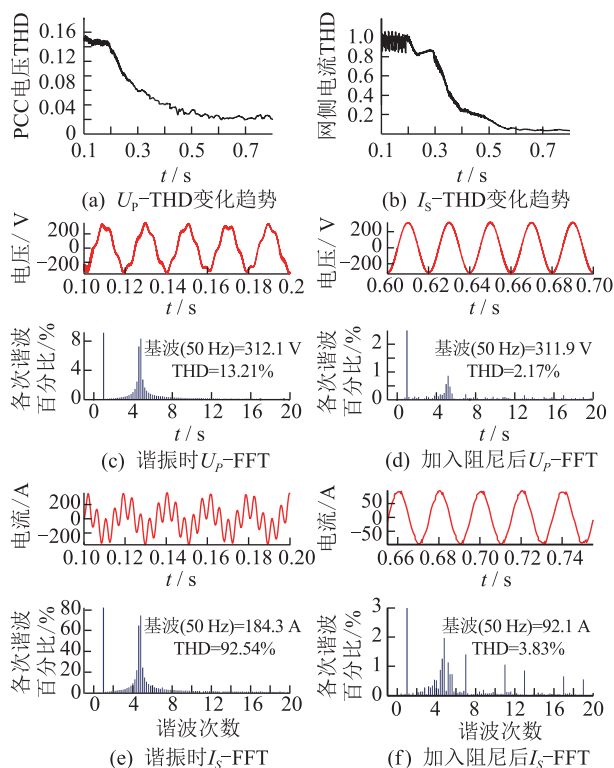


图 11 虚阻尼作用下 U_p 与 I_s FFT 分析

Fig.11 FFT analysis of U_p and I_s under the virtual damping control

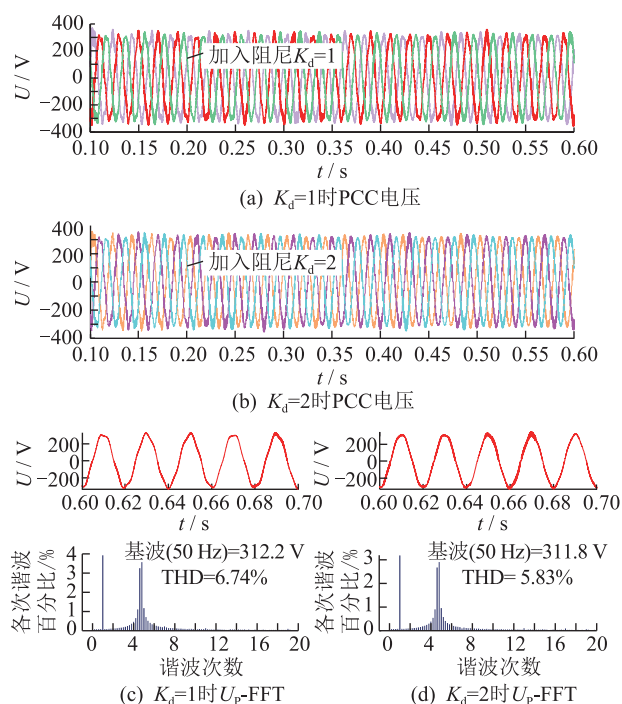


图 12 K_d 不满足要求时 U_p 与 I_s 波形及 FFT 分析

Fig.12 Curve and FFT analysis of U_p and I_s when K_d beyond its effective range

5 结语

为了提高谐波补偿的经济性及补偿精度,将

SAPF 与 TSF 结合构成 T-SAPF 混合滤波系统,针对 TSF 可能与电网发生并联谐振的问题,提出一种将 SAPF 等效成谐振阻尼的虚阻尼控制策略。利用 STF 算法提取阻尼电流指令,并提出一种考虑谐振抑制效果、谐波补偿效果及 SAPF 补偿容量限制来界定阻尼系数有效值域的方法。仿真分析表明该控制策略可以有效抑制系统的并联谐振,改善谐振时 PCC 电压畸变程度,并且保证网侧电流的谐波补偿效果。

参考文献:

- [1] 李达义, 杨凯, 孙玉鸿, 等. 一种新型串联混合型有源电力滤波器[J]. 电力系统自动化, 2015(6):82-87.
LI Dayi, YANG Kai, SUN Yuhong, et al. A novel series hybrid active power filter[J]. Automation of Electric Power System, 2015(6):82-87.
- [2] 孙孝峰, 王伟强, 沈虹, 等. 基于双阻性有源滤波器的背景谐波抑制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16):145-153.
SUN Xiaofeng, WANG Weiqiang, SHEN Hong, et al. Research on suppression strategy of background harmonic based on dual resistive active filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16):145-153.
- [3] DASH S K, PANDA G, RAY P K, et al. Realization of active power filter based on indirect current control algorithm using Xilinx system generator for harmonic elimination [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 74:420-428.
- [4] WANG L, LAM C S, WONG M C. Modeling and parameter design of thyristor-controlled LC-coupled hybrid active power filter (TCLC-HAPF) for unbalanced compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3):1827-1840.
- [5] HERMAN L, PAPIC I. A proportional-resonant current controller for selective harmonic compensation in a hybrid active power filter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5):2055-2065.
- [6] ESFAHANI M T, VAHIDI B. Electric arc furnace power quality improvement by applying a new digital and predicted-based TSC control[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2016, 24(5):3724-3740.
- [7] LI X, YANG Z, YU J, et al. A novel control strategy of TSF for harmonic suppression and reactive power compensation [C] // Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control. IEEE, 2015:1130-1134.
- [8] YANG Z, LI X, WEI J, et al. Analysis of resonance and filtering effect based on the dynamics modeling of TAPF [C] // International Conference on Instrumentation & Measurement. 2015:1450-1454.
- [9] 张超, 马小平, 张义君, 等. 间谐波环境下并联有源电力滤波器系统设计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20):118-127.
ZHANG Chao, MA Xiaoping, ZHANG Yijun, et al. Design of shunt active power filter system in inter harmonic environment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20):118-127.
- [10] VARDAR K, AKPINAR E. Linear model of a three-phase shunt active power filter with a hysteresis controller [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2016, 24:384-397.
- [11] PREMALATHA S, DASH S S, Babu P C. Power quality improvement features for a distributed generation system using shunt active power filter [J]. Procedia Engineering, 2013, 64:265-274.
- [12] ANTONIEWICZ K, KAŻMIERKOWSKI M P. Model predictive control of three-level four-leg flying capacitor converter operating as shunt active power filter [C] // IEEE International Conference on Industrial Technology. IEEE, 2015:2288-2294.
- [13] KHADEM S K, BASU M, CONLON M F. Harmonic power compensation capacity of shunt active power filter and its relationship with design parameters [J]. LET Power Electronics, 2014, 7(2):418-430.
- [14] CORAL E H, RAMOS G A, CORTES R J. Power factor correction and harmonic compensation in an active filter application through a discrete-time active disturbance rejection control approach [C] // American Control Conference. IEEE, 2015:5318-5323.
- [15] LEE T L, WANG Y C, LI J C, et al. Hybrid active filter with variable conductance for harmonic resonance suppression in industrial power systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2):746-756.
- [16] KETZER M B, JACOBINA C B. Virtual flux sensorless control for shunt active power filters with quasi-resonant compensators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7):4818-4830.
- [17] BADKUBI S, NAZARPOUR D, KHAZAIE J, et al. Reducing the current harmonics of a wind farm generation based on VSC-HVDC transmission line by shunt active power filters [J]. Energy Procedia, 2012, 14:861-866.
- [18] 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]. Industrial Electronics IEEE Transactions on, 2015, 62(2):724-734.



魏家昊

作者简介:

魏家昊(1993—),男,硕士,助理工程师,从事电网品质控制及其稳定性分析理论与技术等工作(E-mail:hitwjh@126.com);

宋海洋(1976—),男,本科,高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作(E-mail:1474355941@qq.com);

赵玉林(1992—),男,硕士,助理工程师,从事电力系统稳定与控制工作(E-mail:hitee_zyl@163.com)。

Research on Resonance Suppression Strategy of T-SAPF Filtering System Based on Virtual Damping Control

WEI Jiahao¹, SONG Haiyang¹, ZHAO Yulin², CHANG Xinrui³

(1. State Grid Taizhou Power Supply Company, Taizhou, 225300, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing, 211103, China;

3. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China)

Abstract: In order to reduce the harmonic pollution in the grid caused by strong nonlinear loads such as rectifier and inverter, a hybrid filtering system T-SAPF composed of shunt active power filter (SAPF) and thyristor switched filter (TSF) is proposed in this paper. In view of the parallel resonance potentially arised between TSF and the grid, the resonance mechanism is analyzed in detail and a virtual damping control strategy of SAPF for suppressing parallel resonance of the system is proposed. The self-tuned filtering algorithm is used to extract the instruction of damping current and the effective range of the damping coefficient is defined by three constraint conditions. The simulation results show that the parallel resonance of the system can be effectively restrained by the proposed virtual damping control strategy, the distortion degree of the PCC voltage in the resonance is reduced, and the effect of harmonic current compensation is also guaranteed.

Key words: T-SAPF; virtual damping control; damping coefficient; resonance suppression; harmonic compensation

(编辑 胡昊明)

(上接第 13 页)

MMC-HVDC Control Strategy Based on Variable Target Control

XIA Chengjun, LIU Zhijiang, DU Zhaobin

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In view of the existing control strategy of MMC-HVDC cannot guarantee the robustness, stability and fastness of the control system, a variable target control strategy is proposed. It divided the target value into multiple small targets, so that the system quickly reaches the target step by step without overshoot. Moreover, the setting principle of the PI parameter of the MMC-HVDC control system with variable target control and the setting method of the variable target control time are put forward. Finally, a three-terminal MMC-HVDC is built and simulated with PSCAD/EMTDC. The result of simulation demonstrates that the variable target control strategy can overcome the paradox between adjusting speed and overshoot, and the PI control unit parameter setting range is expand. The results clearly verifies enhancement in the robustness and adaptability of the system.

Key words: MMC-HVDC; MMC; inner and outer ring control; variable target control strategy; speediness; overshoot

(编辑 胡昊明)

(上接第 47 页)

Emergency Load Shedding of User Low Voltage Based on Grid-load Terminal

LU Yujun¹, LI Cheng¹, JIANG Hongcheng², LIU Haibo³, CHEN Hao¹, GE Yonggao¹, WANG Fuliang¹

(1. Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Nantong Power Supply Company, Nantong 226001, China;

3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In the power user installed grid-load terminal, many important loads at low voltage are cut in large power users during emergency load shedding action. In order to reduce the adverse affect to power users, a detailed inquiry of user low voltage load is executed in fields on load character, volume and switch devices. According to the needs of precise acquisition and emergency control of user 400 V load, also for economic reasons, three schemes are proposed for user 400 V load swift shedding. A novel terminal subunit based on GOOSE communication is developed at decentralized and concentrated user loads. Through improvement, the 400 V load cutting delay is reduced and the performance can satisfy the requirements of emergency load shedding.

Key words: emergency load shedding; grid load terminal; power user; load control

(编辑 陈娜)