

单相并联型混合电力滤波器中 谐波检测量的选取

孟庆波¹, 王志国²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 中铁十一局集团电务公司 电气化分公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 以单相混合型电力滤波器为对象, 讨论了有源电力滤波器(APF)中谐波检测量的选取, 即APF电压的不同表达式对混合电力滤波器滤波效果的影响。提出了 5 种 APF 电压表达式, 这 5 种方式中后 2 种情况下都能使系统达到理想的滤波特性, 一种是同时检测电网电流、负载电流和连接点处的电压; 另一种是同时检测负载电流和连接点处的电压。

关键词: 并联混合型电力滤波器; 有源电力滤波器; 无源电力滤波器; 谐波检测量

中图分类号: TN 713

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)04-0090-03

1 有源电力滤波器基本原理

有源电力滤波器(APF)作为抑制谐波进入电网的一种电力电子装置, 其基本原理是^{[1-3]①}: 检测出要抑制的谐波电流, 将其作为控制电路的指令电流, 控制逆变器使其产生出与指令电流相等的补偿电流, 再使其反相后并入电网, 从而使电网电流在理想情况下成为纯正弦波。

并联型 APF 的原理框图如图 1 所示^[1]。图中, 谐波电流检测电路将基波电流 i_p 分离出来, 进而分离出谐波电流 i_h , 然后将 i_h 反相并产生出补偿电流 i_c 的调制波信号, 亦即指令信号 i_c^* , i_c^* 使控制电路产生出相应的触发脉冲, 触发逆变器使其产生出补偿电流 i_c 。 i_c 并入电网后, 使谐波分量并入结点, 从而达到了谐波消除的目的。

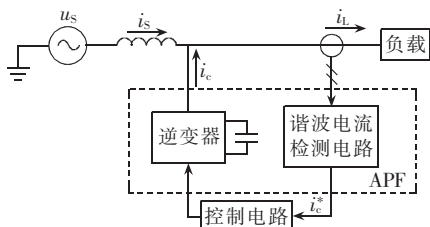


图 1 并联型 APF 原理框图

Fig.1 Principle diagram of parallel APF

从图 1 可以看出, 为了能检测出谐波电流, 谐波电流检测电路的输入可以是负载电流 i_L 也可以是电网电流 i_s 。同时, 由于研究的是混合型电力滤波器, 所以其无源电力滤波器(PPF)部分会对 APF 部分的检测有影响, 因此要综合考虑。

2 单相并联型混合电力滤波器

2.1 原理框图

单相并联型混合电力滤波器(PHAPF)的原理框图如图 2 所示, APF 与 PPF 串联后并入电网。PPF 用于滤除主要次谐波及补偿无功, APF 用于消除 PPF 没有消除的谐波, 弥补 PPF 的不足, 两者结合既发挥了 PPF 大容量容易实现及 APF 动态响应快的优点, 同时又避免了 PPF 可能与电网发生的谐振现象^[4]。

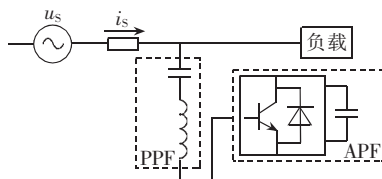


图 2 单相并联型混合电力滤波器原理框图

Fig.2 Principle diagram of single-phase PHAPF

2.2 等值电路

图 2 的等值电路如图 3 所示^[4-7]。图中, 假设负载为阻感性负载, 等效为电流源。 Z_s 为电源阻抗; u_{sh} 为电网电压谐波分量(也即背景谐波电压); i_{sh} 为电网电流的谐波分量; i_{Lh} 为负载电流的谐波分量; u_{Fh} 为连接点处谐波电压; i_{PF} 为流过滤波器的谐波电流。

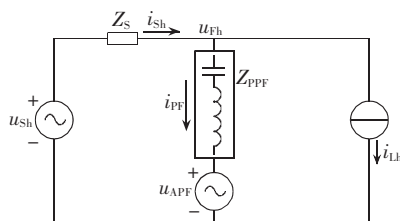


图 3 单相并联型混合电力滤波器的滤波等值电路

Fig.3 Equivalent filtering circuit of single-phase PHAPF

① Marcus Sonst. DSP/FPGA control of an Active DC Traction Substation. January, 1999.

从图3可以看出,各物理量都是用谐波分量表示,换言之,APF部分只对谐波频率下的电气量产生作用,对基频下的网络结构毫无影响,因此可以大大降低APF的容量。

3 APF谐波检测量选取对滤波效果影响^[5-9]

为了在充分发挥PPF的滤波作用的前提下,减小背景谐波电压的影响并使更多的负载谐波电流注入PPF,APF以受控电压源的形式出现在电路中。 u_{APF} 可以受控为 i_{Sh} ,也可以受控为 i_{Lh} ,或者受控为两者之和,具体分析如下。

从图3可看出,有3个电源对电网电流 i_{Sh} 起作用,即 u_{Sh} , i_{Lh} 和 u_{APF} ,其中 u_{APF} 是受控源,因此相当于只有 u_{Sh} 和 i_{Lh} 2个独立电源对 i_{Sh} 的值有影响。3个电源共同作用时的 i_{Sh} 通式为

$$i_{Sh} = \frac{1}{Z_S + Z_{PPF}} u_{Sh} + \frac{Z_{PPF}}{Z_S + Z_{PPF}} i_{Lh} - \frac{1}{Z_S + Z_{PPF}} u_{APF} \quad (1)$$

式中 u_{APF} 受控于其他量。分别计算出 i_{Sh} 和 i_{Lh} 单独作用时的 i_{Sh} 值,最后用叠加原理即得到以 u_{Sh} 和 i_{Lh} 为自变量时 i_{Sh} 的表达式。

3.1 $u_{APF} = K_L i_{Lh}$

a. u_{Sh} 单独作用时

$$i_{Sh} = \frac{1}{Z_S + Z_{PPF}} u_{Sh} \quad (2)$$

b. i_{Lh} 单独作用时

$$i_{Sh} = \frac{Z_{PPF} - K_L}{Z_S + Z_{PPF}} i_{Lh} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)叠加得到 $u_{APF} = K_L i_{Lh}$ 时的 i_{Sh} 表达式为

$$i_{Sh} = \frac{1}{Z_S + Z_{PPF}} u_{Sh} + \frac{Z_{PPF} - K_L}{Z_S + Z_{PPF}} i_{Lh} \quad (4)$$

从式(4)可以看出, $u_{APF} = K_L i_{Lh}$ 时系统与PPF支路有可能发生谐振现象,因此这种检测量的选取不能使APF完成指定的功能,即不能消除系统与PPF之间的谐振。

3.2 $u_{APF} = K_S i_{Sh}$

a. u_{Sh} 单独作用时

$$i_{Sh} = \frac{1}{Z_S + Z_{PPF}} u_{Sh} - \frac{K_S}{Z_S + Z_{PPF}} i_{Sh} \quad (5)$$

整理式(5)得:

$$i_{Sh} = \frac{1}{Z_S + Z_{PPF} + K_S} u_{Sh} \quad (6)$$

b. i_{Lh} 单独作用时

$$i_{Sh} = \frac{Z_{PPF}}{Z_S + Z_{PPF}} i_{Lh} - \frac{K_S}{Z_S + Z_{PPF}} i_{Sh} \quad (7)$$

整理式(7)得:

$$i_{Sh} = \frac{Z_{PPF}}{Z_S + Z_{PPF} + K_S} i_{Lh} \quad (8)$$

将式(6)和式(8)叠加得到 $u_{APF} = K_S i_{Sh}$ 时的 i_{Sh} 的表达式为

$$i_{Sh} = \frac{1}{Z_S + Z_{PPF} + K_S} u_{Sh} + \frac{Z_{PPF}}{Z_S + Z_{PPF} + K_S} i_{Lh} \quad (9)$$

从式(9)可以看出,当 $K_S \rightarrow \infty$ 时,则可保证 $i_{Sh} \rightarrow 0$ 。但由文献[3]知,实际中 K_S 一般取值为2~8,换言之, u_{Sh} 和 i_{Lh} 的存在对电网谐波还起作用,不能满足 $i_{Sh} = 0$,即不能达到理想的滤波效果。

3.3 $u_{APF} = K_S i_{Sh} + K_L i_{Lh}$

由于单独检测 i_{Sh} 和 i_{Lh} 都不能满足要求,因此考虑两者同时检测。计算方法与上述类似,此种情况下的 i_{Sh} 的表达式为

$$i_{Sh} = \frac{1}{Z_S + Z_{PPF} + K_S} u_{Sh} + \frac{Z_{PPF} - K_L}{Z_S + Z_{PPF} + K_S} i_{Lh} \quad (10)$$

从式(10)等式右边第2项可以看出,合理地设计 K_L 使其满足 $|Z_{PPF} - K_L| = 0$,就可以保证 i_{Lh} 单独作用时 $i_{Sh} = 0$,进而迫使负荷谐波电流注入滤波支路。但从等式右边第1项看还存在 $K_S \rightarrow \infty$ 不能成立的问题,从而导致不能实现理想滤波。

文献[3]引入连接点处的谐波电压为检测量,作为 u_{APF} 控制量的一部分。

3.4 $u_{APF} = K_S i_{Sh} + K_L i_{Lh} + A u_{Fh}$

此时计算出 i_{Sh} 的表达式为

$$i_{Sh} = \frac{1-A}{(1-A)Z_S + Z_{PPF} + K_S} u_{Sh} + \frac{Z_{PPF} - K_L}{(1-A)Z_S + Z_{PPF} + K_S} i_{Lh} \quad (11)$$

连接点处的谐波电压为

$$u_{Fh} = u_{Sh} - Z_S i_{Sh} = \frac{Z_{PPF} + K_S}{(1-A)Z_S + Z_{PPF} + K_S} u_{Sh} - \frac{(Z_{PPF} - K_L)Z_S}{(1-A)Z_S + Z_{PPF} + K_S} i_{Lh} \quad (12)$$

令 $A = 1$,即 $u_{APF} = K_S i_{Sh} + K_L i_{Lh} + u_{Fh}$,则可得:

$$i_{Sh} = 0 \cdot u_{Sh} + \frac{Z_{PPF} - K_L}{Z_{PPF} + K_S} i_{Lh} \quad (13)$$

$$u_{Fh} = 1 \cdot u_{Sh} - \frac{(Z_{PPF} - K_L)Z_S}{Z_{PPF} + K_S} i_{Lh} \quad (14)$$

由式(13)等式右边第1项可以看出,电网电压谐波分量对电网电流谐波分量毫无贡献,即 u_{Sh} 的存在不会给电网带来额外的谐波电流;在等式右边第2项中,通过合理设计 K_L ,可以使其满足关系式 $|Z_{PPF} - K_L| = 0$,即也可使负荷谐波分量不影响到 i_{Sh} 。

式(14)表示的是电网电压谐波分量及负载电流谐波分量对连接点处谐波电压的影响。当 K_L 满足关系式 $|Z_{PPF} - K_L| = 0$ 时,系统能达到理想的滤波特性,即满足下列关系式:

$$i_{Sh} = 0, \quad u_{Fh} = u_{Sh}, \quad u_{APF} = Z_{PPF} i_{Lh} + u_{Sh} \quad (15)$$

另外,从式(13)和式(14)可以看出, Z_S 已从等式右边的分母中消失,使 Z_S 与 Z_{PPF} 发生谐振的条件无法成立,从而避免发生谐波放大现象。

从上述过程中没有看出 K_S 特别的作用,分析当 $u_{APF} = K_L i_{Lh} + A u_{Fh}$ 时的情况。

3.5 $u_{APF} = K_L i_{Lh} + A u_{Fh}$

i_{Sh} 和 u_{Fh} 在这种情况下的表达式分别为

$$i_{Sh} = \frac{1-A}{(1-A)Z_S + Z_{PPF}} u_{Sh} + \frac{Z_{PPF} - K_L}{(1-A)Z_S + Z_{PPF}} i_{Lh} \quad (16)$$

$$u_{Fh} = \frac{Z_{PPF}}{(1-A)Z_S + Z_{PPF}} u_{Sh} - \frac{(Z_{PPF} - K_L)Z_S}{(1-A)Z_S + Z_{PPF}} i_{Lh} \quad (17)$$

同样令 $A=1$, 则式(16)和式(17)分别变为

$$i_{Sh} = 0 \cdot u_{Sh} + \frac{Z_{PPF} - K_L}{Z_{PPF}} i_{Lh} \quad (18)$$

$$u_{Fh} = 1 \cdot u_{Sh} - \frac{(Z_{PPF} - K_L)Z_S}{Z_{PPF}} i_{Lh} \quad (19)$$

比较式(18)和式(13)及式(19)和式(14)可以看出, 式(18)和式(19)等式右边第2项的分母中都少了 K_S 这一加数项。当3.4中所述条件 $|Z_{PPF} - K_L| = 0$ 满足时, 同样能达到理想的滤波效果, 但 u_{APF} 的控制量比3.4中的少了1项, 即 $K_S i_{Sh}$, 检测和控制电路都将因此而变得简单。

4 结语

本文讨论了单相混合电力滤波器中 APF 部分的不同表达式对混合电力滤波器滤波效果的影响。对 APF 电压的控制提出了3个量, 即电网电流、负载电流和连接点处的电压, 用这3个量的组合中的5种对 u_{APF} 进行表示, 即

- $u_{APF} = K_L i_{Lh}$;
- $u_{APF} = K_S i_{Sh}$;
- $u_{APF} = K_S i_{Sh} + K_L i_{Lh}$;
- $u_{APF} = K_S i_{Sh} + K_L i_{Lh} + A u_{Fh}$;
- $u_{APF} = K_L i_{Lh} + A u_{Fh}$ 。

经过分析, 后2种表示方法都能使混合电力滤波器达到理想的滤波效果。

参考文献:

- [1] 刘凤君. Delta 逆变技术及其在交流电源中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 谢运祥, 唐中琦. 电力有源滤波器及其应用技术的发展[J]. 电工技术, 2004(4): 1-3.
XIE Yun-xiang, TANG Zhong-qi. Active power filter and their application developments[J]. *Electric Engineering*, 2004(4): 1-3.
- [3] 浣喜明. 电力有源滤波器的原理与应用[J]. 湖南工程学院学报, 2003, 13(4): 15-18.

HUAN Xi-ming. The principle and application of power APF[J]. *Journal of Hunan Institute of Engineering*, 2003, 13(4): 15-18.

- [4] 唐敏. 牵引变电所混合电力滤波器及其控制器的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
TANG Min. Research on hybrid active power filter of traction substations and its controller[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [5] 王跃, 杨君, 王兆安, 等. 电气化铁路用混合电力滤波器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 23-27.
WANG Yue, YANG Jun, WANG Zhao-an, et al. Study on hybrid power filter used in electrified railway system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(7): 23-27.
- [6] 张翔, 梁小冰. 采用复合控制方式的并联混合有源滤波器[J]. 广西电力, 2004(1): 7-9.
ZHANG Xiang, LIANG Xiao-bing. A parallel hybrid active power filter with compound control mode[J]. *Guangxi Electric Power*, 2004(1): 7-9.
- [7] 王跃, 杨君, 王兆安, 等. 电气化铁路用有源电力滤波器的控制系统[J]. 电力电子技术, 2003, 37(2): 1-2.
WANG Yue, YANG Jun, WANG Zhao-an, et al. Analysis of hybrid active power filter for electrified railway[J]. *Power Electronics*, 2003, 37(2): 1-2.
- [8] 刘凡, 杨洪耕, 马文营, 等. 单相并联型有源滤波器在电铁谐波抑制中的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 14(12): 60-62.
LIU Fan, YANG Hong-geng, MA Wen-ying, et al. Analysis of single phase shunt active power filter in electrical railway[J]. *Proceedings of the EPSA*, 2000, 14(12): 60-62.
- [9] 赵俊莉, 杨君, 裴云庆, 等. 电气化铁道用有源电力滤波器方案研究[J]. 机车电传动, 2000(5): 10-14.
ZHAO Jun-li, YANG Jun, PEI Yun-qing, et al. Scheme research on active power filter for electrified railway[J]. *Electric Drive for Locomotive*, 2000(5): 10-14.

(责任编辑: 李玲)



孟庆波

作者简介:

孟庆波(1977-), 女, 吉林长岭人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail: mqb3639@163.com);
王治国(1977-), 男, 天津人, 助理工程师, 主要研究方向为变电所和接触网工作。

Selection of harmonics detection components in single-phase parallel hybrid active power filter

MENG Qing-bo¹, WANG Zhi-guo²

(1. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Electrified Filial, CR11G Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: The selection of harmonics detection components in APF(Active Power Filter) is discussed with the single-phase parallel hybrid active power filter as example, i.e. the effect of various APF voltage expressions on single-phase PHAPF(Parallel Hybrid Active Power Filter). Five kinds of APF voltage expression are brought forward, the 4th and 5th of which can realize ideal filtering, the former is detecting source current, load current and junction voltage simultaneously, and the later is detecting load current and junction voltage simultaneously.

Key words: parallel hybrid active power filter; passive power filter; harmonics detection component