谐振阻抗混合型APF的建模与控制策略的研究

陆秀令[1]， 周腊吾[2]， 曹才开[1]

(1.湖南工学院，湖南 衡阳 421002； 2.湖南大学，湖南 长沙 410082)

摘要：研究了谐振阻抗混合型有源电力滤波器 RITHAPF (Resonant Impedance Type Hybrid Active Power Filter)的结构与工作原理，建立了该滤波系统的电气模型和控制方程。在此基础上，进一步分析了在基于负载谐波电流来控制逆变器输出电压的控制策略下，电网阻抗波动、无源滤波器失谐、基波串联谐振电路的失谐和参数的变换对滤波系统控制性能的影响。并给出了各种影响的仿真图，所得的结论可为RITHAPF在复杂工程的实际应用提供有效的指导。

关键词：谐振阻抗型； 有源电力滤波器； 建模； 控制策略

Modeling and the control strategy analysis of the resonant impedance type hybrid active power filter

LU Xiu-ling[1]， ZHOU La-wu[2]， CAO Cai-kai[1]

(1. Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002,China； 2. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The topology structure and operating principle of resonant impedance type hybrid active power filter (RITHAPF) are studied, electrical modeling and control model equation of RITHAPF are established. Based on the control strategy of load harmonic current controlling inverter output voltage, the impacts of electrical networks fluctuation, passive power filter detuning, fundamental series resonance circuit detuning and system parameter changes on the control characteristics of RITHAPF are analyzed, and simulation graphs of different influences are given.The conclusion is a guidance on the safe and effective application of RITHAPF in complex projects.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Hunan Province(No.03YJJ5005).

Key words: resonant impedance type; active power filter; modeling; control strategy

中图分类号： TM76; TN713.8 文献标识码： A 文章编号： 1003-4897(2008)05-0049-05

0 引言

随着电力电子装置的广泛使用，导致电网中的谐波含量不断上升，谐波污染对电力系统安全、稳定、经济运行构成潜在的威胁，同时电气用户对电能形态和功率流动的控制与处理提出了提高电能质量的要求。未来谐波治理研究和应用的方向主要是由无源滤波器PPF (Passive Power Filter)和有源滤波器构成的混合型有源滤波器HAPF (Hybrid Active Power Filter)，它不仅综合了两者优点，而且能够改变其拓扑结构来适应不同的工业应用场合的需要[1]。

文献[2,3]分别提出了并联混合型有源滤波器(SAPF)和串联混合型有源滤波(SHAPF)结构，但是它们只能抑制谐波不能补偿无功。文献[4~6]提出了谐振阻抗混合型有源电力滤波器RITHAPF (Resonant Impedance Type Hybrid Active Power Filter)的概念和拓扑结构，它不仅能抑制谐波而且能补偿无功。文献[6]还建立其单相等效电路图，并分别对负载谐波电流和电网谐波电压的滤波特性进行了分析，最后采用了电流控制策略，利用Matlab仿真验证了其良好的滤波性能。本文在文献[6]的基础上，继续详细分析了RITHAPF系统的结构与工作原理，并以此为基础进一步分析了在基于负载谐波电流来控制逆变器输出电压的控制策略下，负载谐波电流波动、电源谐波电压波动、电网阻抗波动以及电网频率波动对RITHAPF系统控制性能的影响。所得的结论可为RITHAPF在复杂工况下的工程化应用提供有效的指导，确保滤波装置实现安全可靠运行。

1 RITHAPF的结构与工作原理

RITHAPF的结构如图1所示。它主要由无源滤波器组、基波串联谐振电路、输出滤波器、电压型

基金项目：湖南省自然科学基金资助项目（03YJJ5005）；湖南省教育厅科学研究资助项目（05C002）

逆变器和耦合变压器T_r等。在RITHAPF的耦合变压器副边并联了一个基波串联谐振电路FSRC(Fundamental Series Resonance Circuit)。当RITHAPF中的无源滤波器部分PPF补偿较大容量的无功功率时，PPF的基波阻抗较小，有较大的基波无功电流流入PPF。此时，由于FSRC谐振于基波频率，其基波阻抗近似为0，相当于基波电流的短路通道，所以流过PPF的基波电流都将流入FSRC，而不会流入耦合变压器和逆变器；而且，相对于PPF而言，FSRC承受的基波压降较小，大部分由PPF分担了。RITHAPF运行特点：由无源部分补偿无功功率，有源部分和无源部分共同抑制谐波,实现电网的谐波治理和无功补偿要求。

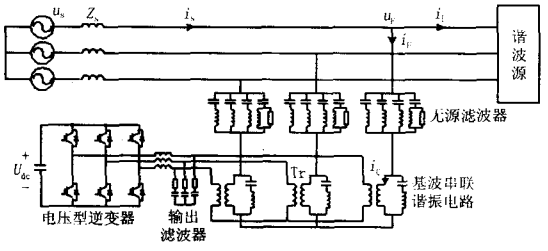

图 1　RITHAPF 的结构图

Fig.1　RITHAPF configuration

RITHAPF的单相等效电路如图2所示。i_S、i_L、i_F、i_C、i_R分别为电网支路、负载支路、RITHAPF无源支路、RITHAPF有源支路、RITHAPF的基波串联谐振电路FSRC的电流，Z_S、Z_F、Z_R和Z_L分别为电网进线阻抗、无源部分阻抗和FSRC阻抗、非线性负载阻抗。

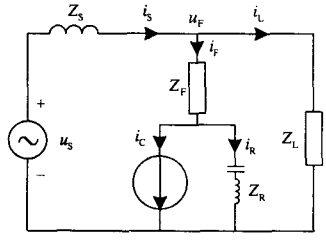

图2　RITHAPF的单相等效电路

Fig.2　The single-phase equivalent circuit of RITHAPF

由图 2 可得

$$\begin{cases} I_S = I_F + I_L \\ U_F = U_S - Z_S I_S \\ U_F = Z_F I_F + U_C \\ U_C = Z_R I_R \\ I_F = I_R + I_C \end{cases} \tag{1}$$

整理得

$$U_C + (Z_S + Z_F) \times I_S - Z_F \times I_L - U_S = 0 \tag{2}$$

2　RITHAPF 补偿特性的分析

采用$u_C = ki_L$控制方式，由谐波源产生的谐波电流将更多地流入 PPF，注入电网的谐波电流将接近于 0。而且，RITHAPF 的有源部分也不承受基波电压。因此本文只讨论在该控制策略的特性表现。仿真参数如下：2 次单调谐滤波器电感为 33.65 mH，Q值为 30，电容为 75.28 μF；3 次单调谐滤波器电感为 11.94 mH，Q值为 30，电容为 94.29 μF；5 次单调谐滤波器电感为 3.72 mH，Q值为 32，电容为 108.95 μF；高通滤波器电感为 0.41 mH，电容为 374.5 μF，电阻为 1 Ω。基波串联谐振电路参数为：电感为 40.52 mH，Q值为 35，电容为 250 μF。

2.1　电网阻抗对补偿特性的影响

为了更好地分析补偿特性，引入 2 个补偿特性评价指标，由式(2)可得。

(1) 谐波源谐波抑制函数

$$\left.\frac{I_{Sh}}{I_{Lh}}\right|_{U_{Sh}=0} = \frac{Z_{Fh}}{Z_{Fh} + Z_{Sh} + Z_{Rh}} \tag{3}$$

（2）电网谐波抑制函数

$$\left.\frac{I_{Sh}}{U_{Sh}}\right|_{I_{Lh}=0} = \frac{1}{Z_{Fh} + Z_{Sh} + Z_{Rh}} \tag{4}$$

其中：PPF 的谐波阻抗 Z_{Fh} 为（当无源滤波器由二次，三次，五次和高通组成时）

$$Z_{Fh} = \frac{1}{\sum_i (R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i})} \quad i=2,3,5,H \tag{5}$$

FSRC 的谐波阻抗为

$$Z_{Rh} = R_R + j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R} \tag{6}$$

电网支路谐波阻抗为

$$Z_{Sh} = R_S + j\omega L_S \tag{7}$$

式中：ω是频率为h的谐波的角频率。

应用 Matlab 分别分析Z_{Sh}对 PPF 和 RITHAPF 谐波源谐波抑制函数的影响。仿真结果如图 3 所示。Z_{Sh}对 PPF 和 RITHAF 电网谐波抑制函数的影响仿真结果如图 4 所示。

曲线 1、2、3、4 表示当Z_{Sh}的电阻R_S等于 0.01 Ω 不变，其电感L_S分别等于 0.05 mH、0.5 mH、5 mH、10 mH 时的仿真结果。图(a)表示 PPF 的补偿特性，图(b)表示 RITHAPF 的补偿特性。纵坐标是谐波抑制

函数值以分贝数表示，图的横坐标为谐波频率与基波频率 f_S 的比值，以下的仿真图相同。

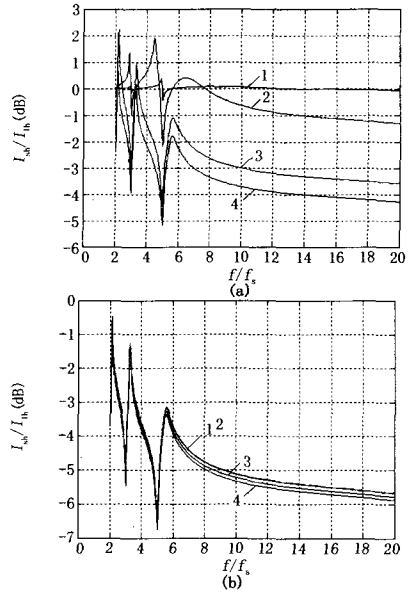

图 3　Z_{sh} 对谐波源谐波抑制函数的影响

Fig.3 Influence of Z_{sh} on harmonic-inhibited function of harmonic source

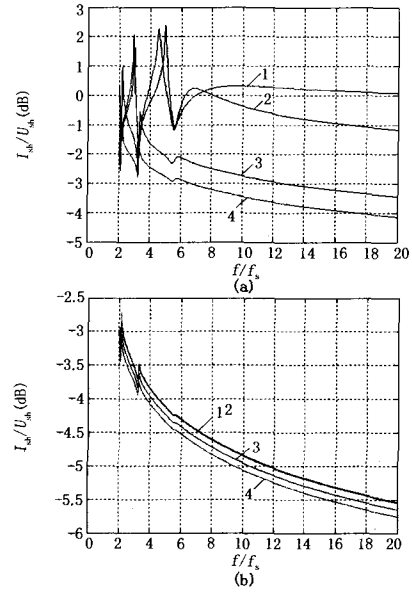

图 4　Z_{sh} 对电网谐波抑制函数的影响

Fig.4 Influence of Z_{sh} on harmonic-inhibited function of electrical networks harmonic

从图 3 和图 4 (a)中可以看出，无论是对谐波源谐波电流，还是对电网谐波电压，L_S 取值不同时其谐波抑制函数的差异较大。而且，当 L_S 为 0.05 mH 时，谐波源谐波抑制函数在所有频率都接近于 0 dB，也就是说 PPF 几乎没有滤波能力。只有当 L_S 为 10 mH 时，谐波抑制函数才基本上在所有频率都小于 0 dB，然而电网阻抗一般是不会这么大的。

而从图 3 和图 4 (b)中可以看出，在 L_S 为 0.05 mH 和 0.5 mH 时，RITHAPF 的两个谐波抑制函数的曲线拟合得很好；在 L_S 为 5 mH 和 10 mH 时，谐波抑制函数的变化也不大。说明电网阻抗的差异对 RITHAPF 补偿特性的影响不大，同样是在电网阻抗较大的情况下，滤波效果稍微更好一些。同时，即使在 L_S 较小时，谐波抑制函数仍然在所有频率都为负值。

2.2 基波串联谐振电路对补偿特性的影响

1) FSRC 失谐对 RITHAPF 补偿特性的影响。FSRC 的谐振频率为基波 50 Hz。但是，由于电路参数随温度的漂移可能发生变化，电力系统频率也并不是一成不变的,而会出现失谐现象。FSRC 失谐对 RITHAPF 补偿特性影响的仿真图如图 5 所示。图中曲线 1、2、3 分别表示 FSRC 调谐频率为 25 Hz、50 Hz、75 Hz 时 RITHAPF 的补偿特性。其中（a）为谐波源谐波抑制函数，（b）为电网谐波抑制函数。

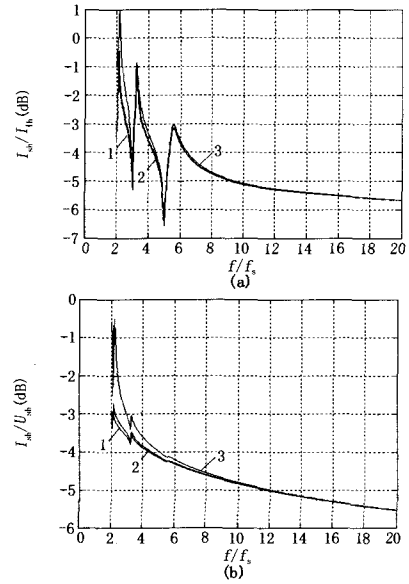

图 5　FSRC 失谐对 RITHAPF 补偿特性的影响

Fig.5　Influence of FSRC detuning on RITHAPF compensation characteristic

2) FSRC 参数变化对 RITHAPF 补偿特性的影响。保持调谐频率 50 Hz 不变，调整 FSRC 中电感 L_R 的品质因数 Q。只调整 R_R 来改变 Q 的 RITHAPF 的谐波源谐波抑制函数和电网谐波抑制函数分别如图 6（a）和（b）所示，曲线 1、2、3 的 Q 分别取 17.5、35、70。

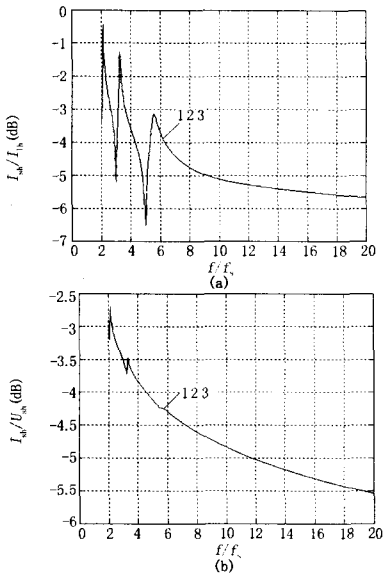

图 6　调整 R_R 对 RITHAPF 补偿特性的影响

Fig.6　Influence of adjusting R_R on RITHAPF compensation characteristic

图中的曲线 1、2、3 都几乎重合。可见，由于 R_R 相对较小，它对补偿特性基本没有影响。

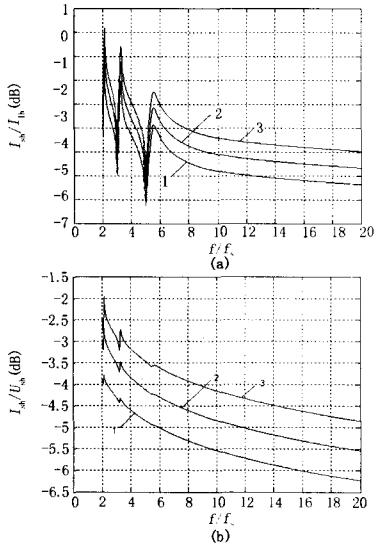

图 7　调整 L_R 和 C_R 对 RITHAPF 补偿特性的影响

Fig.7　Influence of adjusting L_R and C_R on RITHAPF compensation characteristic

保持电阻 R_R 和调谐频率为 50 Hz 不变，通过调整 L_R 和 C_R 来改变 Q，得到 RITHAPF 的谐波源谐波抑制函数和电网谐波抑制函数分别如图 7（a）和（b）所示。曲线 1、2、3 的 Q 分别取 70、35、17.5。

从图中可以看出，Q 的变化对 RITHAPF 补偿特性的影响还是比较明显的，Q 的增大将会使得 RITHAPF 有更好的补偿特性。

2.3 无源滤波器失谐对补偿特性的影响

考察在 PPF 失谐的情况下，RITHAPF 的补偿特性。当 PPF 的单调谐滤波器的调谐频率偏移±10%，得到PPF和RITHAPF的谐波源谐波抑制函数分别如图 8（a）和（b）所示。

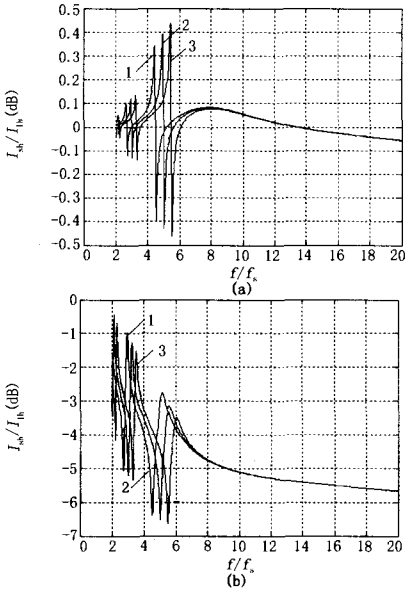

图 8　PPF 失谐对谐波源谐波抑制函数的影响

Fig.8　Influence of PPF detuning on harmonic-inhibited function of harmonic source

曲线 1、2、3 分别是单调谐滤波器失谐-10%、无失谐、失谐+10%的仿真图。从图 8（a）可以看出，曲线 1 在 5 次谐波处是 0 dB 左右，曲线 3 是大于 0 dB 的，而曲线 2 是小于 0.5 dB 的，可见对谐波源谐波而言，一旦失谐，PPF 的谐波补偿特性会变得很差，几乎没有滤波效果（曲线 1），甚至还会放大谐波（曲线 3）。在 8（b）中，曲线 1 在 5 次谐波处要小于-4 dB，曲线 3 接近于-5 dB，曲线 2 为-5 dB 左右，可见，虽然在 PPF 失谐情况下，RITHAPF 的谐波补偿特性仍然比较好，但还是受到了一定影响，比没有失谐时要差一些。

PPF 失谐对 PPF 和 RITHAPF 电网谐波抑制函数的影响分别如图 9（a）和（b）所示。曲线 1、2、3 分别是单调谐滤波器失谐-10%、无失谐、失谐+10%的仿真图。在图（a）中，曲线 1 在 5 次谐波处略小于-2 dB，曲线 3 大于 0 dB，曲线 2 略小于-4 dB，可见，PPF 失谐也将导致其对电网谐波的补偿特性变差，甚至放大谐波。在图（b）中，三条曲线几乎重合，说明 PPF 失谐对 RITHAPF 补偿电网谐波影响不大。

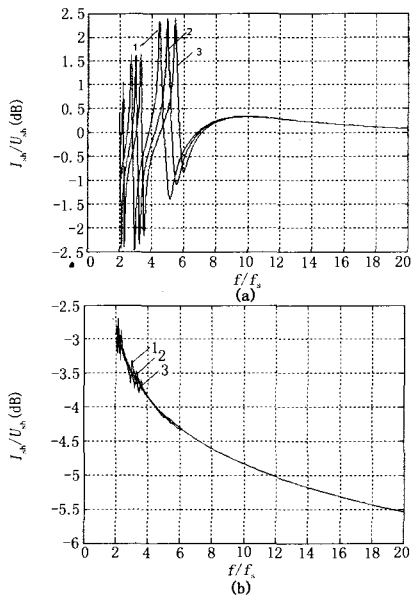

图 9　PPF 失谐对电网谐波抑制函数的影响

Fig.9　Influence of PPF detuning on harmonic-inhibited function of electric network

3　结论

综上分析，可以得出以下结论：

1) PPF 的谐波补偿特性受电网阻抗和 PPF 的失谐影响都较大，基本不受 FSRC 失谐的影响。电网阻抗越小，PPF 的滤波效果越差，电网阻抗越大，PPF 的滤波效果越好；PPF 失谐将使得 PPF 的谐波补偿特性变差，甚至导致谐波放大。

2) RITHAPF 的谐波补偿特性基本不受电网阻抗变小和 FSRC 失谐的影响；但受电网阻抗变大的影响，当电网阻抗变大时其补偿特性更好。PPF 失谐对 RITHAPF 的谐波补偿特性的影响较小。

3) 通过调整 L_R 来改变 Q 将会较为明显的影响补偿特性，Q 越大，补偿特性越好。

参考文献

[1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制与无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.
WANG Zhao-an,YANG Jun,LIU Jin-jun. Harmonics Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.

[2] Fujita H, Akagi H.A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems Series Connection of Passive and Active Filters[J].IEEE Trans Ind Appl，1991,27(6)：1020-1025.

[3] Peng F Z, Akagi H, Nabae A. Compensation Characteristics of the Combined Systems of Shunt Passive and Series Active Filters[J]. IEEE Trans Ind Appl，1993,29(1):144-152.

[4] 罗安.电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M].北京:中国电力出版社,2006.

[5] 常永亮,蒋外文,涂春鸣.基于谐振阻抗型有源滤波的谐波分析与治理装置[J].电网技术,2005,29(17):76-81.
CHANG Yong-liang,JIANG Wai-wen, TU Chun-ming. Harmonic Anlysis and Eliminating Device Based on Resonant Impedance Type Hybrid Active Filter[J]. Power System Technology, 2005,29(17):76-81.

[6] 穆永保, 张建成. 基于电流源控制策略的并联混合型有源滤波器的研究[J]. 华北电力大学学报,2005,32(增刊): 4-7.
MO Yong-bao,ZHANG Jian-cheng.Research of the Current Source Control Strategy on Parallel Active Power Filter[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(S): 4-7.

收稿日期：2007-06-21；　修回日期：2007-07-31

作者简介：

陆秀令（1969-），男，硕士，副教授，主要从事电力系统谐波抑制和无功补偿技术的研究；E-mail:luxiuling4870@126.com

周腊吾（1965-），男，博士，副教授，研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用方面的研究；

曹才开（1951-），男，硕士，教授，研究方向为信号检测与处理。

（上接第 48 页　continued from page 48）

[10] Kinsner W. A Unified Approach to Fractal Dimensions[A]. In: Fourth IEEE Conference on Cognitive informatics[C]. 2005.58-72.

[11] Haykin S. 神经网络原理[M]. 叶世伟, 等译. 北京:机械工业出版社, 2004.

[12] Galil T K A, Kamel M, Youssef A M, et al.Power Quality Disturbance Classification Using the Inductive Inference Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems,2004: 1812–1818.

[13] Marquesdesa J P. 模式识别——原理方法及应用[M]. 吴逸飞, 译. 北京:清华大学出版社, 2002.

[14] Gaing Zee-Lee. Wavelet-based Neural Network for Power Quality Disturbance Recognition and Classification[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004:1560–1568.

收稿日期：2007-07-19；　修回日期：2007-09-04

作者简介：

胡为兵（1969-），男，博士研究生，讲师，主要研究领域为电能质量检测以及现代电力电子技术在改善电能质量方面的应用；E-mail: huweibing1217@yahoo.com.cn

李开成(1962-)，男，教授，博士生导师，博士，主要从事测控技术及智能仪器、光纤电流电压互感器、电能质量分析等方面的研究。