

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201702015



应用于高压直流输电系统的 混合有源电力滤波器

涂玲英, 王胡

(湖北工业大学 电气与电子信息工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 针对高压直流输电系统(HVDC)换流站的交流侧谐波造成了电能质量下降的问题,在传统混合有源电力滤波器的基础上提出一种新结构——混合有源电力滤波器(HAPF).即将有源电力滤波器(APF)部分与基波谐振支路并联后,以一双调谐滤波器作为注入支路,同时又独立挂载一双调谐滤波器,以无源电力滤波器(PPF)滤除一部分谐波,APF 部分滤除一部分谐波.从注入支路的阻抗特性、无功静补偿能力、谐波抑制特性和系统的稳定性几个方面分析混合有源电力滤波器的优越性,并利用 MATLAB/SIMULINK 平台对所提的新结构进行仿真分析.实验结果表明:该混合有源电力滤波器具有良好的谐波补偿性能.

关键词: 混合有源电力滤波器; 谐波抑制; 高压直流输电系统; 谐波补偿; MATLAB 仿真

中图分类号: TM 711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)02-0212-06

Hybrid Active Power Filter Used in High-Voltage Direct Current Transmission System

TU Lingying, WANG Hu

(School of Electrical and Electronic Information Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: A new structure, hybrid active power filter (HAPF), has been proposed on the basis of traditional hybrid active power filter to solve problems about decline of power quality caused by the high voltage direct current (HVDC) transmission system on the ac side harmonics. In the new structure, the active power filter (APF) has been made in parallel with the fundamental wave resonance branch, then with a pair of tuned filter as the injection branch, and at the same time a pair of tuned filter been independently mounted to filter part of the harmonic through passive power filter (PPF) as well as APF. Several advantages of the hybrid active power filter have been analyzed from the injection branch impedance characteristics, the reactive power static compensation capacity, harmonic suppression characteristics and the stability of the system. And the new structure has been simulated in the MATLAB/SIMULINK. The experimental results show that the hybrid active power filter has good harmonic compensation performance.

Keywords: hybrid active power filter; harmonic suppression; high-voltage direct current transmission system; Harmonic compensation; MATLAB simulation

由于电力电子器件的非线性,在高压直流输电(HVDC)系统的换流站交流侧,不可避免地产生了高次谐波,引起了交流电网的电能质量下降问题^[1].目前,工程上常用的主要滤波方式是结合了无源电力滤波器(PPF)和小容量的有源电力滤波器(APF)两者的优点,但随着电力系统电压等级的提高,有源部

收稿日期: 2016-03-09

通信作者: 涂玲英(1963-),女,副教授,主要从事信号与信息处理、嵌入式技术的研究. E-mail:947392311@qq.com.

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2014CFB585)

分的容量也随之增加,应用范围减小. 所以探索一种适应于 HVDC 系统的混合有源电力滤波器 (HAPF),治理 HVDC 系统换流站交流侧的谐波,成为 HAPF 的研究热点. 王小伟等^[2]提出了一种双谐振注入式结构,解决了 HAPF 易无功过补偿的问题. 孟金玲等^[3]对双谐振注入结构 HAPF 建立的数学模型,便于定量分析 HAPF 的特性. 帅智康等^[1]提出了串联谐振注入式结构,有利于抑制电网谐波放大现象. 孙浩等^[4]对已提出的 4 种典型 HAPF 结构做了滤波特性的对比分析,找到具有较好滤波特性的 HAPF 拓扑结构. 已有文献所提的 HAPF 结构通常较适用于中低压系统,也并不针对 HVDC 系统换流站的交流侧的谐波成分特点. 为此,本文以 HVDC 系统换流站的交流侧为滤波对象,结合文献[1-2]的研究成果,提出一种 HAPF 的新结构,使 HAPF 不仅有滤波作用,还有部分无功补偿能力.

1 HAPF 的新拓扑结构

基于文献[5]所示的 HAPF 传统结构,提出的 HAPF 新结构,如图 1 所示. 针对 HVDC 系统换流站交流侧主要产生 5,11,13,25 次谐波的特点,设计了 11/25 双调谐 PPF 组. 将 5/13 双调谐滤波器与基波谐振支路串联,形成了 APF 的注入支路. 这一注入支路结构降低了 APF 部分的基波分压,同时,PPF 也使一部分谐波电流无法注入的 APF 部分注入支路,减小了注入支路的电流,从而起到了减小 APF 部分容量的作用.

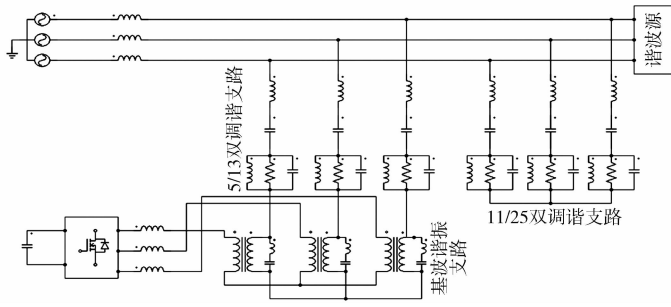


图 1 混合滤波器的新结构

Fig. 1 New structure of hybrid filters

2 注入支路的特性分析

2.1 注入方式阻抗特性对比分析

由于文中是将传统 HAPF 的注入支路为单一电容的形式变为一个双调谐无源滤波器,为了验证该变化可在一定程度上减小基波串联谐振支路的分压,从而降低有源部分的容量,对两种注入方式进行了对比分析. 根据高东辉等^[6]提出的双调谐滤波器的结构和参数设计方法,设计了 5/13,11/25 双调谐滤波器和基波谐振支路参数,具体参数如表 1 所示. 表 1 中:传统注入支路电容 C 为 $36\text{ }\mu\text{F}$ ^[5-7];3 个无源滤波器的 Q 值均为 30.

表 1 双调谐滤波器及基波谐振支路参数

Tab. 1 Parameters of double tuned filter and fundamental resonance branch

参数	5/13 注入支路	参数	11/25 无源滤波支路	参数	基波串联谐振支路
调谐频率/Hz	250/650	调谐频率/Hz	550/1 250	调谐频率/Hz	50
$C_{1a}/\mu\text{F}$	29.382	$C_{1b}/\mu\text{F}$	13.89	L_t/mH	95.49
L_{1a}/mH	5.3	L_{1b}/mH	2.7	$C_t/\mu\text{F}$	106.103
$C_{2a}/\mu\text{F}$	29.842	$C_{2b}/\mu\text{F}$	19.488		
L_{2a}/mH	5.2	L_{2b}/mH	1.9		

对两种注入支路的频率(f)-阻抗(Z)(取绝对值)特性进行了对比分析,如图 2 所示. 由图 2 可知:传统电容式注入支路的阻抗随频率的增加而减小,必然会使大量的谐波电流流入基波谐振支路,引起基波谐振支路较高的谐波分压,不利于 APF 的容量下降;而所提出的新结构,虽然在谐振频率处阻抗较低(设计需要),但在调谐频率附近呈现较高的阻抗,能够取得较高的谐波分压,从而降低了基波谐振支路的分压,减小了有源部分的容量.

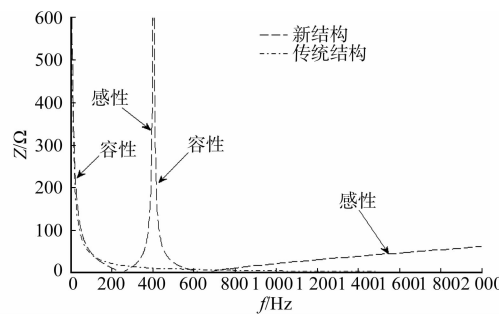


图 2 注入支路的阻抗特性对比

Fig. 2 Comparison of impedance characteristics in injection branch

2.2 基波谐振支路分压对比分析

HAPF 的有源部分经耦合变压器与基波串联谐振支路并联,故基波串联谐振支路的分压一定程度上决定了有源部

分的容量^[1]. 用基波谐振支路的阻抗与注入支路的总阻抗的比值对两种结构的基波谐振支路分压进行对比分析, 结果如图 3 所示. 图 3 中: M 为基波谐振支路分压比值. 由图 3 可知: 在低频段, 两种结构都呈现出较低的基波谐振分压, 但所提的新结构基波谐振分压更小; 在高频部分, 虽然两者趋同, 但电网谐波主要集中于 1 000 Hz 以下. 所以, 所提的新结构具有减小有源部分容量的作用.

2.3 无功静补偿能力定性对比分析

由于每一频次的谐波可以看作是谐波无功分量和有功分量的和, 因此, 不论是 APF 还是 PPF, 其谐波补偿的作用必然会有无功补偿能力. 以换流站的主要谐波为补偿对象, 自然会有一定的无功补偿能力. 由图 2 可知: 当频率小于谐振点频率时, 传统的电容注入支路与所提新结构的阻抗呈容性, 两者具备无功补偿能力, 在第一个谐振点 $f=250$ Hz 后, 所提新结构的阻抗较大; 又因为基波串联谐振支路的阻抗特性相同^[3], 所以新结构的注入支路分压较好, 有效降低了基波分压, 该谐振点后又有感性无功补偿能力. 第二个谐振点 $f=650$ Hz 前后有同样的无功补偿性质的交替情况. 这相对于传统的注入电容支路而言, 为保证一定的谐波注入能力, 通常注入电容会较大, 具有避免系统的无功过补偿的优越性^[1].

3 对新结构的滤波特性分析

3.1 对新型 HAPF 的数学模型建立

对图 1 所示的新结构化简, 并作单相等效电路, 如图 4 所示. 电压电流参数含义如图 4 标注. 由基本的电路定理和网络分析方法可得

$$\left. \begin{aligned} I_{sh} &= I_{lh} + I_{gh} + I_{ph}, \\ 0 &= I_{sh} \times Z_{sh} \times I_{sh} \times Z_{sh} + I_{gh} \times Z_{gh}, \\ 0 &= I_{sh} + I_{ph}, \\ I_{gh} &= I_{rh} - I_{ch}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

采用方凤才^[7]提出的复合控制策略, 将 APF 控制为受控电流源, 即有

$$I_{ch} = k \times I_{sh} + I_{lh}. \quad (2)$$

由式(1)~(2)可得谐波抑制函数为

$$G(S) = \frac{I_{sh}}{I_{lh}} = \frac{Z_{gh}}{Z_{gh} + Z_{rh} + Z_{sh} + (Z_{gh} + Z_{rh}) \times Z_{sh}/Z_{ph} + k \times Z_{rh}}. \quad (3)$$

3.2 放大倍数 k 对谐波抑制特性的影响

不同 k 值下的谐波抑制特性曲线, 如图 5 所示. 由图 5 可知: 当 $k=0$ 时, 即为只有无源滤波器投入时的情况, 可以看到对 5, 11, 13, 25 次谐波有明显衰减, 验证了表 1 中双调谐滤波器的结构及参数的正确性; 在投入 APF 部分后, 当 $k=10$ 时, 几乎整条曲线都处于 0 dB 以下, 体现出较好的谐波抑制性能; 随着 k 的增加, 谐波抑制效果增加, 但当 $k=20, 40$ 时, 对基波电流也有大幅衰减, 即有大量基波电流流入 APF 部分, 不利于 APF 部分的容量减小. 因此, 认为取 $k=10$ 较合适.

3.3 电网参数变化对谐波抑制性能的影响

不同电网电感 L 的谐波抑制特性曲线, 如图 6 所

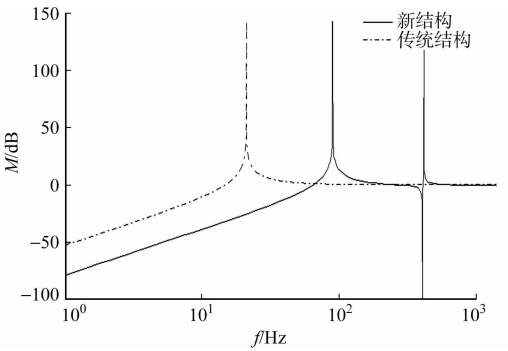


图 3 基波谐振支路的分压对比
Fig. 3 Comparison of partial pressure in fundamental resonance branch

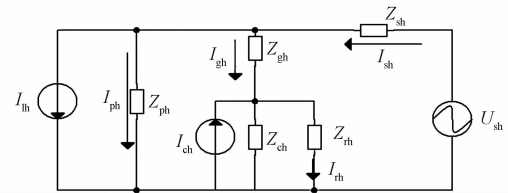


图 4 HAPF 的新单相等效电路图
Fig. 4 New single-phase equivalent circuit of HAPF

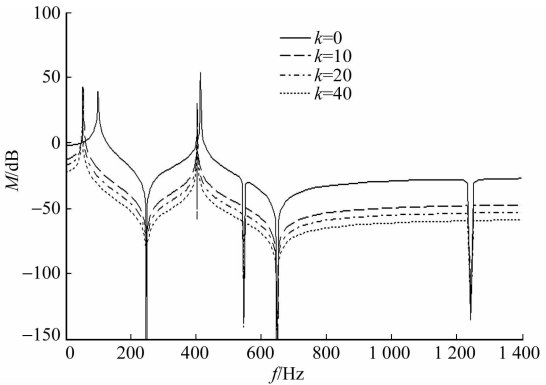


图 5 不同 k 值下的谐波抑制特性曲线
Fig. 5 Curves of harmonic suppression characteristic under different k

示. 由图 6 可知: 在 L 由 0.05 mH 变化到 1 mH 的过程中, 三条特性曲线几乎重合, 仅在谐振点处略有偏差, 说明所提出的新结构对电网参数的改变不敏感, 有源部分的加入很好地抑制了无源部分与电网间的谐振^[8-10].

3.4 基波与无源滤波器失谐对谐波抑制性能的影响

因参数改变导致滤波器失谐将对滤波器性能产生影响, 为此考虑基波支路与 PPF 部分同时分别失谐 $\pm 50\%$, $\pm 20\%$ 时, 对谐波抑制特性曲线的影响, 如图 7 所示. 由图 7 可知: 在高频与低频段都出现了谐振点的偏移, 这可能对 APF 部分所承担的补偿容量产生影响. 对该影响的定量分析有待进一步研究, 从总体上看, 所提新结构仍然有较好的谐波抑制性能.

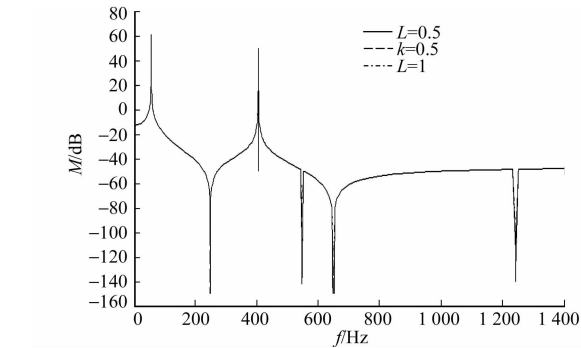


图 6 不同电网电感 L 的谐波抑制特性曲线
Fig. 6 Curves of harmonic suppression characteristic under different grid inductance L

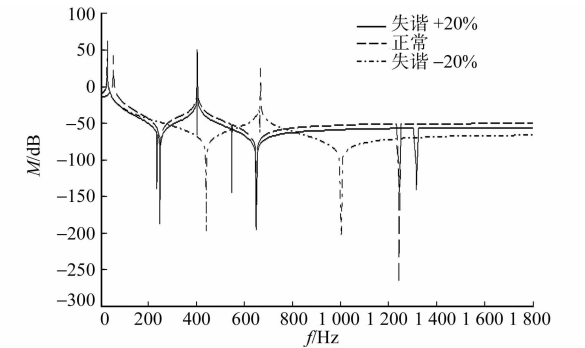


图 7 基波失谐与 PPF 失谐对谐波抑制特性的影响
Fig. 7 Influences of fundamental wave mismatch and PPF mismatch on harmonic suppression

4 系统的稳定性分析

将 $G(S)$ 看作 I_{sh} 与 I_{lh} 之间的传递函数, 利用 MATLAB 软件和表 1 中的数据, 可以得到该闭环控制系统的开环传递函数的零极点图和闭环系统的奈奎斯特图的局部放大图, 分别如图 8~9 所示.

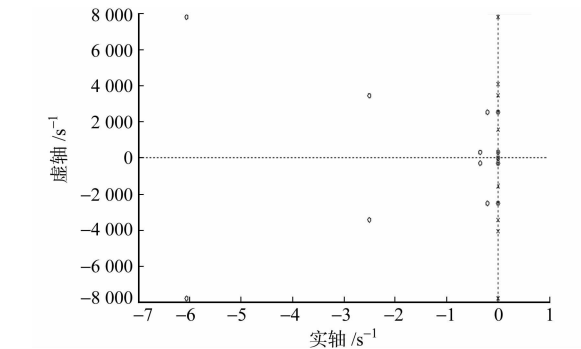


图 8 闭环系统的开环传递函数零极点图
Fig. 8 Zero pole figure of open-loop transfer function in closed-loop system

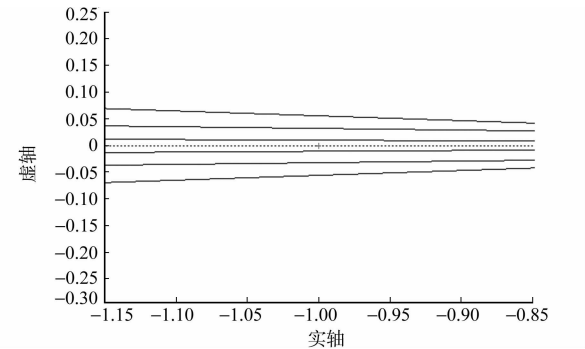


图 9 系统的奈奎斯特图的局部放大图
Fig. 9 Partial enlarged Nyquist graph of system

由图 8 可知: 开环传递函数无极点在 s 平面的右半侧, 说明开环系统稳定. 由图 9 可知: 奈氏曲线没有包含 $(-1, 0)$ 点, 由奈奎斯特稳定性判据^[11]判定该系统稳定.

5 仿真与实验分析

对同样的不可控整流谐波源, 采用基于瞬时无功功率理论^[12-13]的谐波电流检测方法和基于滞环比较 PWM 生成方法, 在 MATLAB/SIMULINK 中分别搭建所提新结构和传统结构的仿真模型, 并进行仿真分析, 结果如图 10~12 所示.

对比图 11, 12 可知: 两种结构都有较好的滤波效果, 但所提的新结构效果较好, 经过滤波后波形畸变率由 15.2% 降为了 2.81%.

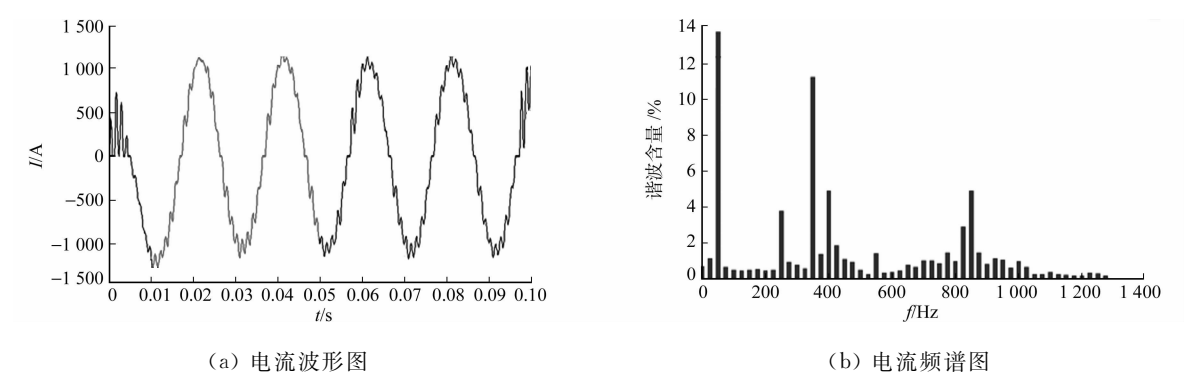


图 10 滤波前的一相电流波形及频谱图

Fig. 10 One-phase current waveform and spectrum diagram before filtering

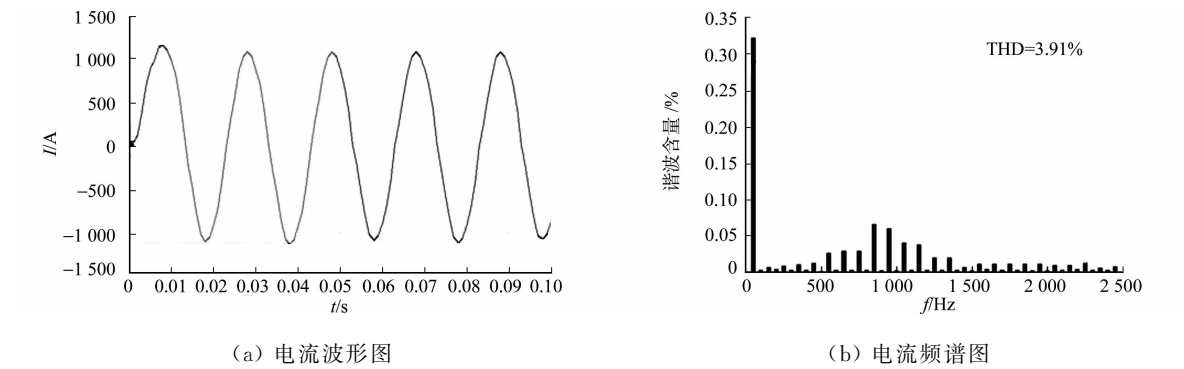


图 11 传统结构滤波后的一相电流波形及频谱图

Fig. 11 One-phase current waveform and spectrum diagram with traditional structure filter

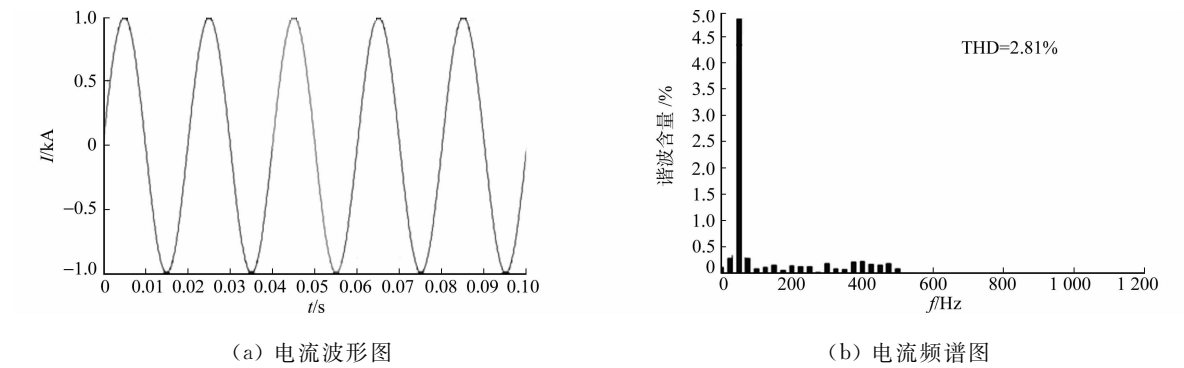


图 12 新结构滤波后波形及频谱图

Fig. 12 Waveform and spectrum diagram with new structure filter

在实验室分别搭建了传统结构与新结构的实验平台,非线性负载由可控整流电路模拟,选取三菱公司的 PM300DSA120 型逆变器,额定电压为 1 200 V,额定电流为 300 A,直流侧由整流器供电. 为验证所提结构的优越性,将其与文献[3]所提的双谐振注入结构进行了对比分析,结果如表 2 所示. 由表 2 可知:投入双调谐结构后的结果与文献[14-15]的结果较为相近,但所提结构的谐波抑制性能更优,特别是对 5,13 次谐波的衰减上效果较好,验证了注入支路的设计.

表 2 新结构与双谐振注入结构滤波实验对比分析结果

Tab. 2 Analysis results of comparison in new structure with double resonance injection structure filter				A
谐波电流次数	投入前的结构	投入双调谐结构	投入所提的结构	
5	28.30	1.42	0.65	
7	14.30	0.62	0.12	
11	8.50	0.51	0.21	
13	6.30	0.48	0.11	
17	3.54	0.38	0.05	

6 结论

提出一种注入式 HAPF 的新结构,与传统的电容式注入结构相比,新结构有利于 APF 容量的减小,从而适应更高电压等级的应用.同时,由于双调谐注入支路和 PPF 的存在,使该结构具有一定的无功补偿能力,又有控制无功过补偿的性能.

仿真结果表明:所提新结构具有良好的谐波抑制能力和鲁棒性,几乎不受电网阻抗参数变化的影响.在基波谐振支路和无源滤波器分别失谐 $\pm 50\%$, $\pm 20\%$ 的极端情况下,也能保持较好的滤波性能.

利用 Nyquist 稳定性判据,借助 MATLAB 工具,证明了该系统能够稳定运行,通过 SIMULINK 仿真与实验验证了其良好的滤波性能.

参考文献:

- [1] 帅智康,罗安,刘定国,等.串联谐振注入式混合型有源电力滤波器及滤波特性分析[J].电工技术学报,2009,24(5):125-134.
- [2] 王小伟,赵伟,涂春鸣,等.双谐振注入式混合有源电力滤波器及控制方法[J].电力系统自动化,2010,34(2):59-63.
- [3] 孟金岭,赵伟,林国营,等.双谐振注入混合型有源电力滤波器特性[J].电力系统保护与控制,2016,44(3):32-38.
- [4] 孙浩,周维维.并联混合型有源电力滤波器滤波特性分析[J].继电器,2007,35(8):61-64.
- [5] 帅智康,罗安,范瑞祥,等.注入式混合有源电力滤波器的注入支路设计[J].电力系统自动化,2007,31(5):57-60.
- [6] 高东辉,杜少武,张长征.改进型混合级联多电平有源电力滤波器的研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(1):40-46.
- [7] 方凤才.一种基于调谐频率设计双调谐滤波器的新方法[J].天津师范大学学报(自然科学版),2014,34(3):47-51.
- [8] 范瑞祥,罗安,周柯,等.并联混合型有源电力滤波器的建模和控制策略分析[J].中国电机工程学报,2006,26(12):55-61.
- [9] 康润生,王梦荷,连欢,等.可用于高压电网的新型混合滤波器研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(5):695-701.
- [10] 夏向阳,徐林菊,刘飞龙.考虑谐振的混合型有源滤波器参数优化配置[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(6):31-35.
- [11] RAHMANI S, HAMADI A, AL-HADDAD K. A Lyapunov-function-based control for a three-phase shunt hybrid active filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3):1418-1429.
- [12] 赵畹君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2010:10-13.
- [13] 邹伯敏.自动控制理论[M].北京:机械工业出版社,2007:62-66.
- [14] 洪雪梅,金福江,李扬森,等.三相正弦波逆变器容错控制[J].华侨大学学报(自然科学版),2016,37(4):497-501.
- [15] 陈宇,郑力新.利用自适应遗传算法优化滤波电路参数[J].华侨大学学报(自然科学版),2010,31(3):272-274.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)