

DOI: 10.7667/PSPC150529

双谐振注入混合型有源电力滤波器特性

孟金岭, 赵伟, 林国营, 肖勇

(广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 在分析双谐振注入混合型有源电力滤波器(Double Resonance Injection Hybrid Active Power Filter, DIHAPF)结构和工作原理的基础上,建立了DIHAPF的系统控制模型及包括控制器的电压型逆变器的数学模型。从无功功率静态补偿能力和谐波分压特性两方面分析了DIHAPF注入支路特性,同时研究了DIHAPF的系统稳定性和谐波补偿特性,着重探讨了并联谐振支路谐振频率对系统性能的影响,提出了注入支路谐振频率设计方法。将非线性负载等效为谐波电流源,在PSIM6.0软件平台搭建DIHAPF模型进行仿真验证,并通过6 kV实验样机进行了实验研究。仿真和实验结果证明了理论分析的正确性。

关键词: 双谐振; 注入混合型; 有源电力滤波器; 谐波补偿; 特性分析

Characteristics of double resonance injection type hybrid active power filter

MENG Jinling, ZHAO Wei, LIN Guoying, XIAO Yong

(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Guangzhou 510080, China)

Abstract: The system control model of double resonance injection hybrid active power filter (DIHAPF) and mathematical model of voltage source inverter with controller is established based on the structure and operating principle of DIHAPF. The injection branch features are analyzed including the static reactive power compensation capability and dividing capability of harmonic voltages. Stability and harmonic suppression capacity of DIHAPF is analyzed simultaneously. The influence of the parallel resonant circuit resonant frequency to system performance is discussed in detail. Furthermore, the method of designing the resonant frequency of parallel resonant circuit is proposed. The simulation model of DIHAPF is established and simulated on PSIM 6.0 taking nonlinear loads as harmonic current sources. A 6 kV DIHAPF experiment prototype controlled by TMS320F28335 is built. Simulation and experimental results prove the validity of the analysis.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2012AA050211).

Key words: double resonance; injection hybrid; active power filter; harmonic compensation; characteristics analysis

0 引言

随着电力电子技术的发展,电网中非线性负荷所占比例日益增大,电网谐波污染越来越严重^[1-4]。这给电网企业和电力用户都带来直接和间接的损失,也引起能源的浪费。为保证电网安全稳定运行,保护用户电力设备,节约电力能源,电网的谐波治理迫在眉睫^[5-7]。有源电力滤波器是谐波治理的重要手段,其中注入式混合型有源电力滤波器(Injection Hybrid Active Power Filter, IHAPF)具备谐波抑制和

大容量无功静态补偿能力,兼顾了无源滤波器和有源滤波器的长处^[8-10]。为提高注入式混合有源电力滤波器应用范围,改善补偿性能,文献[11]提出了一种新型双谐振注入支路,文献[12]讨论了双谐振注入混合型有源电力滤波器(Double Resonance Injection Hybrid Active Power Filter, DIHAPF)特性及其在电网中的应用。DIHAPF已成为适用于中高压电力系统的新型谐波治理装置。

在已有文献的DIHAPF特性分析中,将逆变器视为控制电流控制的电压源或电流源,其输出电压或电流与控制电流成比例关系,在此基础上建立模型并进行分析^[13-14]。这种模型简化了控制环节和逆

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2012AA050211)

变器对模型特性的影响, 不能完全反映控制器对系统特性的影响。因此, 考虑控制器的详细 DIHAPF 模型及特性分析有待深入研究。

在分析 DIHAPF 结构和工作原理的基础上, 建立包含控制器的电压型逆变器数学模型, 进而建立 DIHAPF 数学模型, 对 DIHAPF 注入支路特性、系统稳定性和谐波补偿特性进行分析, 着重讨论了并联谐振支路谐振频率对系统性能的影响, 并提出谐振频率设计方法。仿真和实验结果证明了本文分析的正确性。

1 DIHAPF 模型及工作原理

双谐振有源电力滤波器 DIHAPF 拓扑结构如图 1 所示。图中 C_1 、 L_1 、 C_2 、 L_2 构成注入支路。 C_1 和 L_1 构成串联谐振支路, 谐振于基波频率。 C_2 、 L_2 构成并联谐振支路。

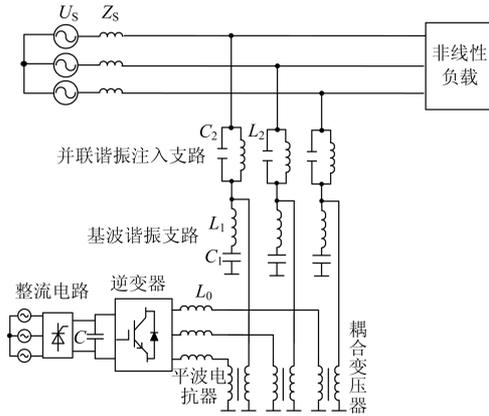


图 1 DIHAPF 系统拓扑结构图
Fig. 1 Topology of DIHAPF

对 DIHAPF 进行简化处理, 将非线性负载看成谐波电流源, 同时控制 DIHAPF 有源部分为一个电压源, 则双谐振注入混合型系统谐波域单相等效电路如图 2 所示。 U_{sh} 为电网谐波电压, Z_s 为电网谐波阻抗, I_{lh} 为负载谐波电流, Z_c 为注入阻抗, Z_f 为基波谐振支路阻抗, Z_o 为平波电抗器阻抗。

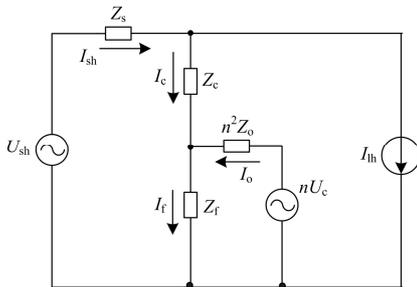


图 2 DIHAPF 单相等效电路
Fig. 2 Single-phase equivalent circuit

根据等效电路图, 由基尔霍夫电压和电流定律得:

$$U_{sh} = Z_s I_{sh} + Z_c I_c + Z_f I_f \quad (1)$$

$$nU_c = n^2 Z_o I_o + Z_f I_f \quad (2)$$

$$I_{sh} - I_c - I_{lh} = 0 \quad (3)$$

$$I_c + I_o - I_f = 0 \quad (4)$$

联立式(1)~式(4), 消去 I_c 、 I_1 、 I_2 、 I_p , 按照负载谐波电流控制方式, 将有源部分输出电压控制为负载谐波电压的 K 倍, 则有

$$I_{sh} = \frac{(n^2 Z_o + Z_f) U_{sh} + k_1 I_{lh}}{n^2 Z_o (Z_c + Z_s) + Z_f (Z_c + Z_s + n^2 Z_o)} \quad (5)$$

其中

$$k_1 = n^2 Z_o Z_f + n^2 Z_o Z_c + Z_c Z_f - nKZ_f。$$

仅考虑 DIHAPF 有源部分输出电压作用时, 系统等效电路如图 3 所示。

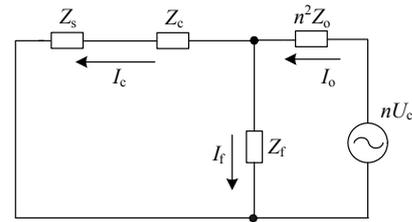


图 3 仅考虑有源部分输出电压作用时的单相等效电路
Fig. 3 Single-phase equivalent circuit taking the output voltage of active part as the only source

由图 3 可以得到:

$$I_c = \frac{nZ_f}{(Z_s + Z_c)Z_f + n^2 Z_o (Z_s + Z_c + Z_f)} U_c \quad (6)$$

设逆变器输出电压 U_c 到有源滤波器注入电网的谐波电流 I_c 的传递函数为 G_{out} , 则有

$$G_{out} = \frac{nZ_f}{(Z_s + Z_c)Z_f + n^2 Z_o (Z_s + Z_c + Z_f)} \quad (7)$$

考虑电压型逆变器, 并按照负载谐波电流控制方式控制时, DIHAPF 系统控制模型如图 4 所示。由图 4 可得

$$U_c = G_{vsi}(s)G_c(s)(-I_{lh} - I_{ch}) \quad (8)$$

$$I_{ch} = G_{out}(s)U_c \quad (9)$$

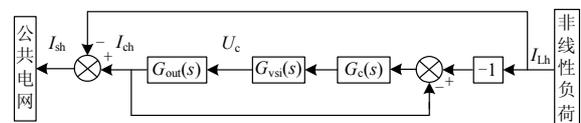


图 4 逆变器按负载电流控制时的 DIHAPF 系统控制模型
Fig. 4 Control mode of DIHAPF

由式(8)、式(9)得出电压型逆变器数学模型为

$$U_c = -\frac{G_{vsi}(s)G_c(s)}{1 + G_{out}(s)G_{vsi}(s)G_c(s)} I_{Lh} \quad (10)$$

2 DIHAPF 特性分析

2.1 注入支路特性

注入支路由注入部分和基波串联谐振支路(Fundamental Series Resonance Circuit, FSRC)构成。有源滤波器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能力及逆变器输出电流能力决定了有源部分的容量。基波串联谐振支路的分压主要有电网在 FSRC 上的分压和注入支路调谐频率附近的谐波电压放大两部分。

IHAPF 注入支路阻抗可表示为

$$Z_1 = R_{11} + j(\omega L_{11} - \frac{1}{\omega C_{11}} - \frac{1}{\omega C_{12}}) \quad (11)$$

双谐振注入式 APF 注入支路阻抗可表示为

$$Z_2 = [R_{21} + \frac{R_{22}}{k_2}] + j[\omega L_{21} - \frac{1}{\omega C_{21}} + k_3] \quad (12)$$

其中

$$k_2 = (1 - \omega^2 L_{22} C_{22})^2 - \omega^2 C_{22}^2 R_{22}^2$$

$$k_3 = \frac{1 - \omega^2 L_{22} C_{22} - \omega C_{22} R_{22}^2}{(1 - \omega^2 L_{22} C_{22})^2 - \omega^2 C_{22}^2 R_{22}^2}$$

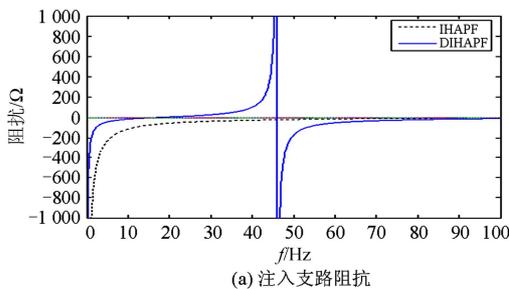
利用 Matlab7.0 仿真软件对 IHAPF 注入式结构及 DIHAPF 注入结构进行仿真。系统仿真参数见表 1。

表 1 注入式结构仿真参数

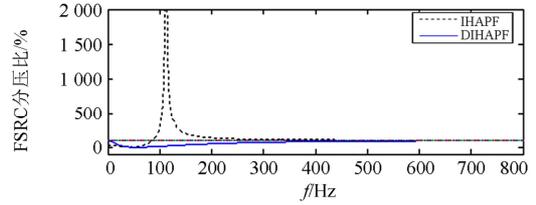
Table 1 Simulation parameters of injection branch

参数	IHAPF	DIHAPF
基波串联谐振支路电抗	14.58 mH	14.58 mH
基波串联谐振支路电容	690 μF	690 μF
基波串联谐振支路电抗内阻	0.1 Ω	0.1 Ω
注入部分电容	36 μF	50 μF
注入部分电抗	-	167.47 mH
注入部分电抗内阻	-	0.1 Ω

分别对两种结构的阻抗特性及串联谐振支路电压放大倍数进行频谱分析。仿真结果如图 5 所示。



(a) 注入支路阻抗



(b) 基波谐振支路分压比

图 5 IHAPF 与 DIHAPF 注入支路阻抗特性

Fig. 5 Impedance characteristics of injection branch

2.1.1 无功静补能力分析

由图 5(a)可以看出,当频率小于谐振点频率时, IHAPF 注入支路阻抗呈现容性并逐渐减小,直至为零;当频率大于谐振频率时,注入支路阻抗呈现感性并逐渐增大。DIHAPF 注入支路阻抗在谐振点发生突变,频率小于谐振频率时,阻抗呈现容性并逐渐增大;当频率大于谐振频率时,阻抗为感性并逐渐减小。基波频率时, IHAPF 和 DIHAPF 注入支路阻抗均为容性,具备无功静态补偿能力;在谐振点后各频率点, DIHAPF 注入支路阻抗值大于 IHAPF 注入支路阻抗,又因为基波串联谐振支路阻抗特性相同,故 DIHAPF 基波串联谐振支路分压特性较好,有效降低了有源部分承受电压。同时,由于并联电感的存在,控制了并联支路注入系统的无功,避免系统无功过补偿。

2.1.2 谐波分压特性分析

基波串联谐振支路分压能力影响注入式混合有源电力滤波器有源部分容量。用基波串联谐振支路阻抗与注入支路总阻抗的比值来分析 FSRC 的谐波分压特性。两种注入式结构基波串联谐振支路基波及谐波分压数据见表 2。

由图 5(b)及表 2 可知,单独注入式 APF 注入支路基波电压为 0.2%,然而 2 次及以上谐波电压被放大,大于电网对应次谐波电压。双谐振注入式 APF 基波串联谐振支路承受的基波电压为 0.04%,各次谐波电压也低于电网对应次谐波电压,降低有源部分工作电压,进而减小 DIHAPF 有源容量。

表 2 基波串联谐振支路分压大小

Table 2 Voltage ratio of fundamental series resonance branch

	IHAPF/%	DIHAPF/%
基波	0.20	0.04
3th	200.16	31.84
5th	120.01	61.68
7th	109.09	76.93
11th	103.45	89.48
13th	102.44	92.28

2.2 DIHAPF 稳定性与谐波抑制特性

忽略电网谐波电压, 只考虑负载谐波电流影响, 可以得到 DIHAPF 谐波抑制函数为

$$G_h = \frac{I_{sh}}{I_{Lh}} = \frac{n^2 Z_0 Z_r + n^2 Z_0 Z_c + Z_c Z_r - n K Z_r}{n^2 Z_0 (Z_c + Z_s) + Z_r (Z_c + Z_s + n^2 Z_0)} \quad (13)$$

为方便讨论, 不考虑系统延时对稳定性的影响, DIHAPF 系统开环传递函数为

$$G_o = \frac{[n^2 Z_0 (Z_c + Z_r) - Z_c Z_r - n K Z_r] Z_p}{n^2 Z_0 k_4 - Z_c Z_r (Z_s + Z_p)} \quad (14)$$

其中

$$k_4 = (Z_c + Z_p) Z_r + (Z_c + Z_r + Z_p) Z_s$$

设其系统特征方程为

$$[b_1 \ b_2 \ \dots \ b_8][s^7 \ s^6 \ \dots \ s^0]^T = 0 \quad (15)$$

经过简化后的 DIHAPF 系统为线性定常系统。线性定常系统稳定的充分必要条件是系统的特征根均位于复平面的左半部分。因此根据 DIHAPF 系统开环传递函数特征根是否全部位于 s 域的左半平面可判断 DIHAPF 系统是否稳定。本文所述 DIHAPF 属高阶系统, 其稳定性可根据系统劳斯表第一列参数的符号判断系统稳定性。

当并联支路谐振频率分别为 42 Hz、44 Hz、48 Hz 时, DIHAPF 系统特征方程劳斯表第一列值见表 3。

表 3 不同谐振频率时 DIHAPF 开环特征方程劳斯表(首列)

Table 3 Rolls table under different resonance frequencies			
	$f_r=42$ Hz	$f_r=44$ Hz	$f_r=48$ Hz
s^7	8.262e-23	8.262e-23	8.262e-23
s^6	8.265e-18	8.265e-18	8.265e-18
s^5	2.715e-16	2.724e-16	2.715e-16
s^4	1.108e-11	8.113e-11	2.594e-11
s^3	1.146e-9	8.421e-10	2.782e-10
s^2	1.348e-5	9.814e-6	3.006e-6
s^1	2.1e-6	2.1e-6	2.1e-6
s^0	2.1e-6	2.1e-6	2.1e-6

根据劳斯判据可知三种谐振频率下 DIHAPF 系统都是稳定的。

当频率小于谐振频率时, 并联谐振电路总阻抗呈感性; 大于谐振频率时, 呈容性。所以, 为保证 DIHAPF 具有一定的容性无功静态补偿能力, 其并联谐振支路谐振频率应小于基波频率。

保证注入支路无功静态补偿能力的同时, 分析并联谐振支路谐振频率对系统稳定性的影响。分别计算谐振频率为 42 Hz、44 Hz、48 Hz 时并联支路参数, 用 Matlab 分析系统开环传递函数, 其波特图如图 6 所示。

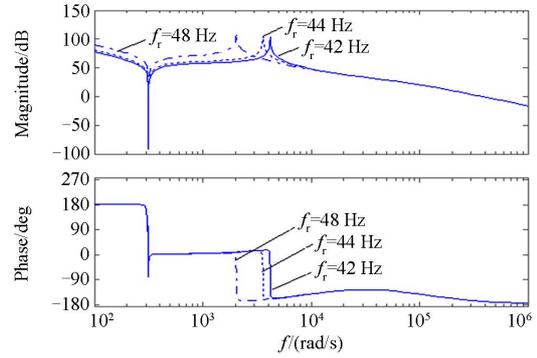


图 6 $f_r=42$ Hz、44 Hz、48 Hz 时, DIHAPF 系统开环波特图

Fig. 6 Open-loop Bode plot of DIHAPF as $f_r=42$ Hz, 44 Hz and 48 Hz

由图 6 可以看出, DIHAPF 系统相角曲线有 3 个突变点, 第一个突变点是由并联谐振支路引起, 其突变频率为 299 rad/s; 第二个突变点是由基波串联谐振支路引起; 第三个突变频率为注入支路谐振频率, 并联支路谐振频率分别为 42 Hz、44 Hz、48 Hz 时, 注入支路谐振频率分别为 4 260 rad/s、3 680 rad/s、2 070 rad/s。相角稳定后, 相频曲线缓慢上升后逐渐趋近于 -180° 。当保持其他参数不变, 保证基波静态无功补偿能力的同时, 并联支路谐振频率分别为 42 Hz、44 Hz、48 Hz 时, DIHAPF 系统开环传递函数相角裕度分别为 107.93° 、 106.21° 、 103.44° , 由此可知, 谐振频率较大时, DIHAPF 稳定性较差, 随并联支路谐振频率减小, 系统相角裕度增大, 稳定性提高。

下面分析并联谐振支路谐振频率对谐波抑制能力的影响。当保持其他参数不变, 保证基波静态无功补偿能力的同时, 调整并联谐振支路参数使其分别谐振在 42 Hz、44 Hz、48 Hz, 对 DIHAPF 谐波抑制能力影响如图 7 所示。

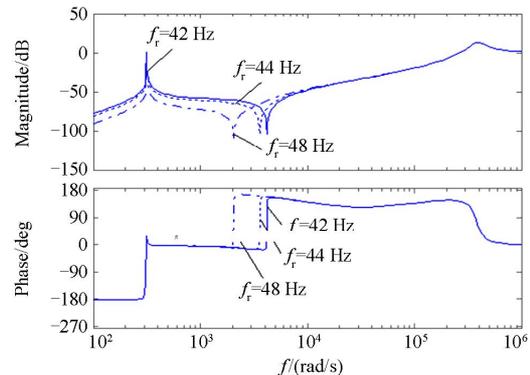


图 7 $f_r=42$ Hz、44 Hz、48 Hz 时 DIHAPF 谐波抑制特性

Fig. 7 Harmonic suppression characteristic of DIHAPF as $f_r=42$ Hz, 44 Hz and 48 Hz

由图 7 可以看出, 当并联谐振支路谐振频率分别为 42 Hz、44 Hz、48 Hz 时, DIHAPF 在主要谐波频率段的增益分别约为 -58.4 dB、-62.7 dB、-73.3 dB, 表明谐振频率较小时, DIHAPF 谐波抑制能力较差, 随着谐振频率的增加, DIHAPF 系统谐波抑制能力提高。

2.3 并联支路谐振频率的选择

通过对 DIHAPF 稳定性和谐波滤除能力的分析可知, 并联谐振支路谐振频率必须小于基波频率以保证 DIHAPF 系统的静态无功补偿能力; 当谐波频率小于基波频率时, 谐振频率越小, 系统稳定性越好, 而谐波抑制能力越差; 谐振频率越大, 系统谐波抑制能力越好, 而系统稳定性越差。因此, DIHAPF 系统参数设计时, 需要综合考虑系统稳定性和谐波治理效果, 选择适当的谐振频率, 以使 DIHAPF 系统能够兼顾稳定性和谐波治理效果。

本文选择谐振频率为 44 Hz, 在此参数下, DIHAPF 系统相角稳定裕度为 106.21°, 在主要谐波频率段的增益约为 -62.7 dB。

3 仿真与实验研究

为了验证上述分析的正确性和 DIHAPF 结构的综合补偿效果, 按照 DIHAPF 的结构和原理, 利用软件 PSIM6.0 进行仿真研究。用谐波电流源等效非线性负载产生的谐波^[15-16]。根据某钢铁厂的谐波治理与无功补偿要求确定 DIHAPF 系统参数。仿真模型由三相交流电源供电, 电网模型由电压源、电网阻抗、变压器及输电线路构成, 负载由负载阻抗和各次谐波电流源构成。其中, 电网参数如下: 三相电源线电压为 35 kV, 频率为 50 Hz, 电网等效阻抗为 0.05 mH, 内阻为 0.001 Ω。谐波源参数如下: 5 次谐波电流为 28 A, 7 次谐波电流为 13.6 A, 11 次谐波电流为 8.3 A, 13 次谐波电流为 6 A, 17 次谐波电流为 3.7 A。DIHAPF 参数如下: 输出电感为 0.2 mH, 内阻 0.005 Ω; 基波串联谐振支路电感为 14.58 mH, 内阻为 0.1 Ω, 电容为 690 μF; 并联谐振支路电感为 109.03 mH, 内阻为 0.1 Ω, 电容为 120 μF; 耦合变压器电压比为 2:1; 逆变器由三相整流桥供电。仿真结果如图 8 所示, 其中 I_L 为负载电流; I_s 为电网电流; I_{ch} 为 DIHAPF 注入电网的电流; U_c 为逆变器输出电压。

由仿真图 8 可以看出, 在 DIHAPF 投入前, 负载发出的谐波电流直接流入电网, 造成严重的谐波污染。DIHAPF 投入运行后, 电网中各次谐波电流

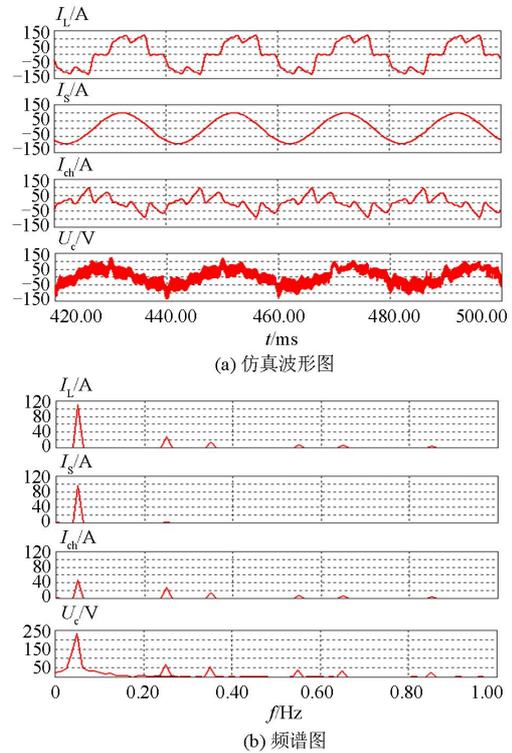


图 8 仿真结果

Fig. 8 Simulation result

大幅下降, 谐波污染得到有效治理。系统投入前后谐波电流数据见表 4。

表 4 DIHAPF 投入前后谐波电流幅值对比

Table 4 Comparison of harmonic current amplitude before and after DIHAPF put into

谐波电流次数	投运前/A	投运后/A
5	27.52	1.21
7	13.51	0.58
11	8.17	0.48
13	5.95	0.44
17	3.54	0.34

为进一步验证双谐振注入式混合有源电力滤波器的特性, 本文在实验室研发了应用于 6 kV 配电网的实验样机。DIHAPF 的有源部分选用三菱公司 IGBT-IPM 系列模块 PM300CLA120 构成三相逆变桥, 直流侧电容采用 4 个 10 000 μF 的电解电容两串两并组成。系统控制器采用 TMS320F28335 数字化 DSP 控制方案。装设输出滤波器滤除逆变器产生的高频开关谐波, 本文选取电感 0.2 mH。基波串联谐振支路电感为 14.57 mH, 电容为 690 μF。并联谐振支路电感参数为 25.31 mH, 电容为 400 μF。耦合变压器变比为 2。用示波器获取 DIHAPF 样机投运前后的电流波形, 如图 9 所示。

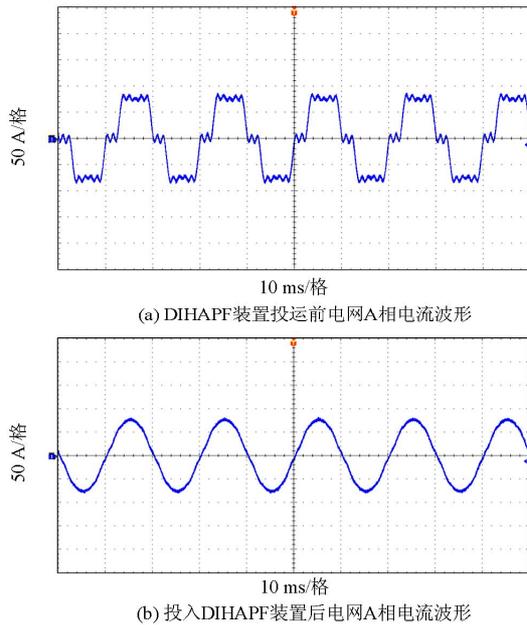


图9 实验样机投运前后电网电流波形

Fig. 9 Waveform of grid current before and after operating prototype

4 结论

通过对 DIHAPF 特性分析与仿真实验研究得到以下结论:

(1) 基波频率时, DIHAPF 注入支路阻抗值大于 IHAPF 注入支路阻抗, 其基波串联谐振支路分压特性良好, 有效降低有源部分承受电压, 使 DIHAPF 有源容量更小, 适用于更高的电压等级。并联电抗器可控制系统注入无功, 避免无功过补偿。

(2) 确定并联支路谐振频率时, 系统稳定性和谐波抑制能力成为矛盾。DIHAPF 系统参数设计时, 本文提出综合考虑系统稳定性和谐波治理效果的谐振频率设计方法。

(3) 仿真和实验结果表明 DIHAPF 系统具有良好的稳定性和谐波治理能力, 验证了本文分析的正确性。

参考文献

- [1] 彭卉, 邹舒, 付永生, 等. 冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 54-61.
- PENG Hui, ZOU Shu, FU Yongsheng, et al. Research of the power quality problem and treatment scheme for impact loads connected into Chongqing power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 54-61.
- [2] 李国庆, 王鹤, 张慧杰. 微电网中基于逆变电源控制的重要节点电能质量管理方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 177-184.
- LI Guoqing, WANG He, ZHANG Huijie. Power quality management method based on inverter source control for important node in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 177-184.
- [3] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [4] 刘文叶, 罗隆福, 李勇, 等. 基于感应滤波的工业蒸馏系统潜在谐波放大及防治措施[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 304-317.
- LIU Wenyue, LUO Longfu, LI Yong, et al. Potential harmonic amplification and its prevention of industrial rectifier system based on inductive filtering method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 304-317.
- [5] 杨坤, 谢川, 陈国柱. 基于频率自适应写真控制器的精致无功发生器电流控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 248-254.
- YANG Kun, XIE Chuan, CHEN Guozhu. Frequency adaptive resonant controller based current control of SVG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 248-254.
- [6] 董海燕, 贾清泉, 王宇. 具有容错能力的电能质量扰动源定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 76-83.
- DONG Haiyan, JIA Qingquan, WANG Yu. An algorithm for power quality disturbance source positioning with fault-tolerant capability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 76-83.
- [7] 孟金岭, 肖勇, 王文, 等. 适用于高速电气化铁路的低成本电能质量综合补偿装置[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 41(14): 73-80.
- MENG Jinling, XIAO Yong, WANG Wen, et al. A low cost power quality compensation scheme for high-speed electric railway[J]. Power System Protection and Control, 2012, 41(14): 73-80.
- [8] DETJEN D, JACOBS J, DE DONCKER R W, et al. A new hybrid filter to dampen resonances and compensate harmonic currents in industrial power systems with power factor correction equipment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(6): 821-827.
- [9] 李猛, 王志刚, 王寅, 等. 无谐波检测环节的并联型有源电力滤波器研究[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 73-77.

- LI Meng, WANG Zhigang, WANG Yin, et al. Shunt active power filter based on non-harmonic detection technology[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 73-77.
- [10] 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.
- GAO Donghui, DU Shaowu, ZHANG Changzheng. Research on an improved hybrid cascade multilevel active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 40-46.
- [11] 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): 59-62.
- WANG Xiaowei, ZHAO Wei, TU Chunming, et al. Novel active power filter with double-resonance injection circuit and its control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 59-62.
- [12] 邓霞, 赵伟, 罗安. 双谐振注入式混合型有源电力滤波器及其在变电站的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 82-87.
- DENG Xia, ZHAO Wei, LUO An. A double resonance injection type of hybrid active power filter and its application in substations[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 82-87.
- [13] 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): 121-132.
- SHUAI Zhikang, LUO An, LIU Dingguo, et al. A novel hybrid active power filter with series resonance circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 121-132.
- [14] 缙新科, 牟英, 汪昶江, 等. 并联混合型有源电力滤波器仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 13-16.
- GOU Xinke, MOU Ying, WANG Changjiang, et al. Simulation of shunt hybrid active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 13-16.
- [15] 夏向阳, 罗安, 罗时武. 大功率单独注入式有源电力滤波器系统工程实现[J]. 电力自动化设备, 2010, 24(3): 195-202.
- XIA Xiangyang, LUO An, LUO Shiwu. Application of high-capacity active power filter with single injection circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 24(3): 195-202.
- [16] 朱静, 李罗, 王弋飞, 等. 基于 RTDS 的复合电能质量调节装置功能和性能试验研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 56-62.
- ZHU Jing, LI Luo, WANG Yifei, et al. Function and performance test for the compound power quality regulation device based on RTDS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 56-62.

收稿日期: 2015-04-01; 修回日期: 2015-07-07

作者简介:

孟金岭(1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网谐波抑制与无功补偿、先进电气节能技术。E-mail: jinling_meng@163.com

(编辑 葛艳娜)