

逆变器交直流侧谐波交互影响分析

针对典型的逆变器并网系统,研究电网电压背景谐波对公共并网点(PCC)电能质量的影响。电网电压含有谐波时,会引起直流侧电压、电流异常波动,综合考虑幅值和相序结合开关函数的傅里叶表达式,分析逆变器交直流侧交互影响机理,经过数学推导得出公共并网点的谐波特性。然后提出一种基于并网系统小信号模型的阻抗分析法定量分析PCC电流谐波含量。利用Matlab/Simulink软件搭建电网背景谐波并网系统,检测特定次谐波与理论计算值作对比,考虑并网系统具有的谐波特性,提出一种准确度较高的混合电力滤波器(HPF)滤波方式达到改善新能源并网背景谐波注入下的并网点电能质量。

吴杰 赵丽霞 贾清泉 李珊/燕山大学电力电子节能与传动控制重点实验室

0 引言

环境考验日益严峻,可再生能源发电成为日后能源革命的必由之路^[1]。谐波的存在不仅造成电能的极大损耗,同时也有可能导致人身和财产的巨大损失,因此提高电能质量,合理利用电能迫在眉睫。对于典型新能源并网系统,电力网络中非线性用电设备会造成电网背景谐波^[2],电网背景谐波的注入对于并网点(PCC)电能质量有很大的影响。当分布式电源(Distributed Generation, DG)^[3]接入后, DG谐波与电网谐波势必会存在相互影响,甚至引起谐波的异常放大。背景谐波注入导致电网三相电压、电流波动,此时对于逆变器控制回路产生极大影响,也在一定程度上不利于直流侧电流电压的稳定。考虑电网背景谐波情况下并网点谐波特性对于选取合适的滤波措施具有重要意义,同时对于提高并网电能质量和系统稳定性具有

极大价值。

针对电力网络运行时谐波造成的不利影响, GB/T 20046—2006和IEEE Std.929—2000等标准均对并网点电流的总谐波畸变率和各次谐波含有率进行限制^[4],以保证用电安全。明确逆变器、系统阻抗及电网异常之间的复杂交互关系,对于规范标准,保证质量具有重要意义。

文献[5-6]主要研究逆变器本身对并网系统谐波特性的影响,在理想电网背景下建立了并网系统的阻抗模型,但未对电网侧存在电能质量问题的情况加以考虑;文献[7]进一步完善阻抗模型,提出阻抗模型的多种表示形式,同时对逆变器并网网络中各部分参数的选取和工作性能作出较详细的分析,但考虑的功率等级较低,对于大功率的实用并网系统,阻抗模型准确性未测试。文献[8-9]运用逆变器输出阻抗模型分析并网系统稳定性,对于优化控制系统具有指导意义。文献[10]提出一种新的利用谐波阻抗评估电能质量的方法,该方法对于背景谐波准确性要求高,对于谐波成分复杂的并网系统存在局限性。文献[11-13]分别以LCL、R-APF和IHAPF作为滤波手段,提高并网系统的电能质量,但也分别存在使用频率单一、直流侧电压被动抬高的局限。因此本文通过研究电网电压背景谐波情况下,并网系统各环节的响应策略以及并网点的谐波特性,并采用传统LCL和有源滤波器相结合的混合电力滤波器(HPF)达到改善并网点电能质量的目的,并从理论推导和实际仿真



吴杰/教授

关键词/Keywords

电网背景谐波·
电能质量·
阻抗分析法·
混合电力滤波器·

两方面作出了系统阐述。

1 背景谐波下逆变器交直流侧的交互影响

1.1 背景谐波对直流侧的影响

电网电压中含有谐波分量,将引起并网系统直流侧产生直流电压波动,该波动量受电网端电压谐波的次数与相序影响较为严重,而直流侧的电压波动也将引起直流侧相应电流的波动,直流波动量受到逆变器PWM调制作用,将在交流侧产生复杂的波动情况。

一种典型的并网结构图如图1所示,直流侧电压源与直流滤波电容器 C_1 、 C_2 构成直流供电网络。 S_{1-6} 为两电平电压源换流器的六个桥臂; L_1 、 L_2 为LCL滤波器的两组电感; C 为电容; u_a 、 u_b 和 u_c 分别是交流电网的三相电压。本文通过对三相电压注入特定次特定含量的谐波成分模拟电网存在背景谐波的不良电能质量状态。

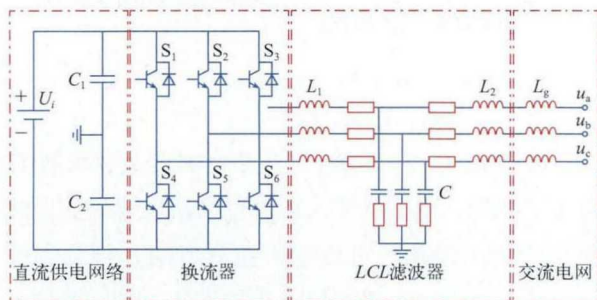


图1 电网电压三相不平衡并网模型

假设理想的三相电压分别为 u_a 、 u_b 和 u_c ,若电压中存在次数为 h 次的谐波电压 u_h ,谐波的线电压有效值为 U_h ,此时,三相电压表达式为

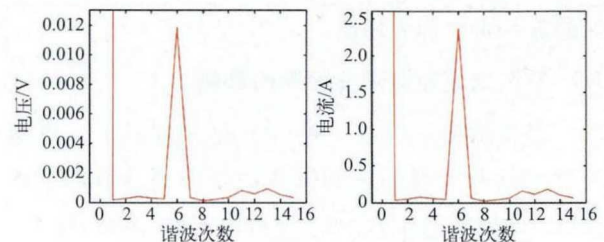
$$\begin{pmatrix} u_{a,h} \\ u_{b,h} \\ u_{c,h} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_h \begin{pmatrix} \sin(h\omega t + \varphi_h) \\ \sin(h\omega t + \varphi_h - 120^\circ p) \\ \sin(h\omega t + \varphi_h + 120^\circ p) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, p 为 h 次谐波电压的相序, $p=+1$ 时为正序, $p=-1$ 时为负序。

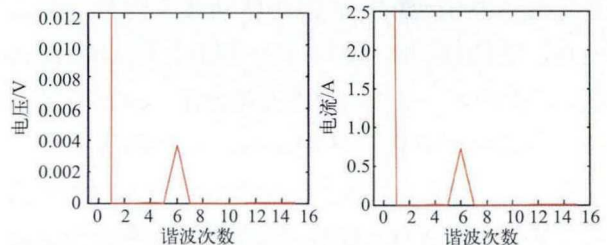
电网电压的基波与谐波都会对并网系统直流侧电压幅值与相位产生影响,但对于直流侧的波动量,主要与电源电压中谐波分量有关^[1],因此

研究直流侧波动量时,主要考虑背景谐波的作用。利用Matlab对电网电压叠加4%的5次负序和4%的7次正序谐波分量,可以看到直流侧电压和电流只会产生6倍频波动,如图2所示。如文献[1]所述,电网电压含有 h 次的电压谐波分量,一般认为

$$h = \begin{cases} 3n-1 & \text{负序} \\ 3n & \text{零序} \\ 3n+1 & \text{正序} \end{cases} \quad n=1,2,3\cdots \quad (2)$$



(a) 5次谐波直流侧电压、电流波动频次图



(b) 7次谐波直流侧电压、电流波动频次图

图2 电压叠加4%的5次和4%的7次背景谐波时直流侧波动图

当电网电压谐波为正序,则直流侧产生波动频次为 $h-1$ 次;当电网电压谐波为负序,则直流侧产生波动频次为 $h+1$ 次。因此,设电网背景谐波时,直流侧产生的波动量为 $\Delta u_{a,h} = d_h \sin[(h-p)\omega t + \varphi_1]$,直流电压的波动通过PWM调制又会在交流侧产生影响,其具体分析如下。

1.2 逆变器开关函数表达式

定义两电平PWM控制三态开关函数 S_x ,其中 $x=a, b, c$

$$S_x = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂器件导通} \\ -1 & \text{下桥臂器件导通} \end{cases} \quad (3)$$

则输出电压可表示为

$$u_x = u_{dc} S_x \quad (4)$$

以a相为例,忽略开关函数中的边频谐波,通

过双重傅里叶变换可得PWM控制方法的a相开关函数波形表达式为

$$S_a = \lambda \sin(\omega t + \delta) + \lambda_{2l-1} \sum_{l=1}^{\infty} \cos[(2l-1)\omega t + \varphi_{2l-1}] \quad (5)$$

式中, λ 为PWM控制的调制深度; ω 为正弦调制波角频率; λ_{2l-1} 为逆变器开关传递函数中 $2l-1$ 次谐波的调制系数; φ_{2l-1} 为逆变器桥臂开关函数中基波分量与系统正序分量的夹角。分析a相开关函数表达式, 可知开关函数波形有如下特点: ①恒定分量(直流分量)为零; ②基波为 $\lambda \sin(\omega t + \delta)$; ③含载波和奇次载波谐波。

1.3 逆变器直流侧对交流侧的影响

当直流电压含有 $(h-p)$ 倍频波动时, 则其与开关函数相乘后得到的线电压中将含有新的谐波^[1]。设直流电压 $u_{dc} = U_{dc} + d_h \sin[(h-p)\omega t + \varphi_1]$, 其中 U_{dc} 为直流量; d_h 为电源电压负序分量引起的直流电压波动幅值; φ_1 则为波动某一时刻的电压相角。可见直流电压含有两个部分, U_{dc} 为直流常量, $d_h \sin[(h-p)\omega t + \varphi_1]$ 为波动分量。波动分量与开关函数相乘后将会使线电压产生新的谐波或间谐波。开关函数 S_a 的表达式中也包含基波分量和谐波分量, 将直流电压波动分量分别与 S_a 基波分量和谐波分量相乘, 得到的结果相加即是最终谐波含有情况。以a相为例, 逆变器交直流侧的交互影响机理如下。

1.3.1 与 S_a 基波分量相乘

直流侧波动量在并网系统PCC处产生的谐波电压表达式为式(6), 分析式(6)可知, 频率为 $(h-p)$ 的直流电压波动将在并网交流侧产生除基波分量的 $(h-p-1)$ 次负序谐波和 $(h-p+1)$ 次正序谐波。忽略串联等效电阻等对并网系统谐波含量的影响, 由电网 h 次电压背景谐波引起的交流侧总谐波电流为式(7)

$$\begin{aligned} u_{xa,h} = & \frac{1}{2} \Delta u_{dc,h} S_a = \lambda U_{dc} \sin \omega t + \\ & \frac{d_h \lambda}{4} \cos[(h-p-1)\omega t + \varphi_1] - \\ & \frac{d_h \lambda}{4} \cos[(h-p+1)\omega t + \varphi_1] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} i_{a,h} = & \frac{1}{L} \int (u_{a,h} - u_{xa,h}) dt = \frac{p \lambda d_h}{4 h \omega L} \sin(h \omega t + \varphi_1) - \\ & \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_h}{h \omega L} \times \cos(h \omega t + \varphi_h) - \\ & \frac{p \lambda d_h}{4(h-2p) \omega L} \sin[(h-2p)\omega t + \varphi_1] \end{aligned} \quad (7)$$

由此谐波电流引起的直流电流波动和直流电压波动分别为式(8)、式(9)

$$\begin{aligned} \Delta i_{dc,h} = & \frac{1}{2} i_{a,h} \cdot S_x = \frac{\sqrt{6} p \lambda U_h}{4 h \omega L} \sin[(h-p)\omega t + \varphi_h] + \\ & \left(\frac{3(h-p) \lambda^2 d_h}{8 h(h-2p) \omega L} \right) \cos[(h-p)\omega t + \varphi_1] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_{dc,h} = & \frac{1}{C} \int \Delta i_{dc,h} dt = \frac{3 \lambda^2 d_h \cdot \sin[(h-p)\omega t + \varphi_1]}{8 h(h-2p) \omega^2 LC} - \\ & \frac{\sqrt{6} p \lambda U_h \cdot \cos[(h-p)\omega t + \varphi_h]}{4 h(h-p) \omega^2 LC} \end{aligned} \quad (9)$$

联立式(9)和波动量公式可得式(10)

$$\begin{aligned} d_h \left(\frac{3 \lambda^2}{8 h(h-2p) \omega^2 LC} - 1 \right) \sin[(h-p)\omega t + \varphi_1] = \\ = \frac{\sqrt{6} p \lambda U_h \cdot \cos[(h-p)\omega t + \varphi_h]}{4 h(h-p) \omega^2 LC} \end{aligned} \quad (10)$$

分析式(10)可知, 由于电网背景谐波次数突出的特性, PCC电流谐波含量以注入背景的谐波次数为主。因此, 可根据阻抗分析法, 模拟系统阻抗值, 从而得出PCC处谐波的准确含量。要使上式成立, 则必须使 $\varphi_1 = \varphi_h \pm 90^\circ$, 可得电网侧 h 次谐波电压引起的逆变器直流侧电压波动幅值为

$$d_h = \frac{2 \sqrt{6} (h-2p) \lambda U_h}{(h-p) |8 h(h-2p) \omega^2 LC - 3 \lambda^2|} \quad (11)$$

当 $8 h(h-2p) \omega^2 LC - 3 \lambda^2 = 0$, 系统发生串联谐振, 此时交流侧谐波含量和直流侧波动量都放大很多倍。各次谐波在直流侧总的波动量符合向量叠加定理, 直流侧总波动量 D 的表达式为

$$D = \vec{d}_2 + \vec{d}_3 + \cdots + \vec{d}_h + \cdots + \vec{d}_n \quad (12)$$

式中, $\vec{d}_2, \vec{d}_3, \cdots, \vec{d}_h, \cdots, \vec{d}_n$ 分别为各次波动量的向量表达式。

1.3.2 与 S_a 谐波分量相乘

S_a 中谐波分量与直流侧波动量相乘会产生3、

5、7、9、11、13和15次等奇次谐波，以及大量的间谐波，这些谐波含量在未发生串联谐振时由于 S_a 基波分量远大于谐波分量，其幅值很小，可忽略不计，当发生谐振时，也会放大很多倍，造成电力系统复杂的谐波污染现象。在 $\lambda=1$ 的情况下，当 $L=1\text{ mH}$ 、 $C=109\text{ }\mu\text{F}$ 时，5次负序和7次正序谐波电压发生谐振。本文只考虑 S_a 基波分量在交流侧产生的谐波含量。

图3显示串联谐振情况下，任意叠加5次或者7次背景谐波都将导致PCC处电流含有较大的5次和7次谐波，因此合理选取参数避开谐振点对于稳定系统，提高并网电能质量意义重大。

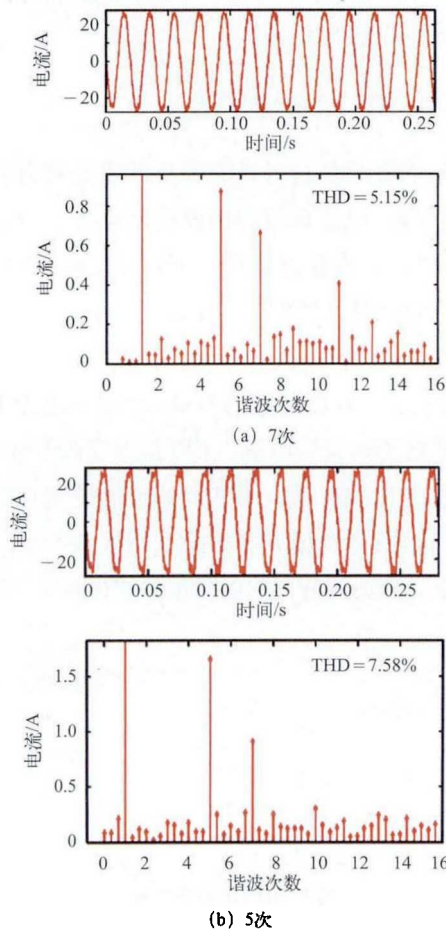


图3 电网电压分别叠加4%的7次和5次背景谐波时PCC电流谐波含量图

2 阻抗分析法分析电流谐波含量

将阻抗模型应用于逆变器并网系统可以简化逆变器交直流侧复杂的交互机理，使PCC电压、

电流谐波含量具象化。本文将逆变器视为恒流源，可以得到典型并网系统的小信号等效模型如图4所示。

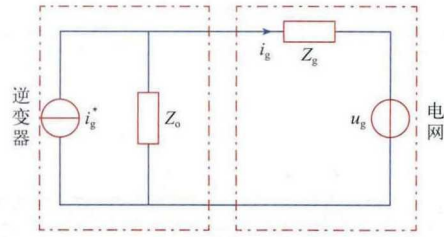


图4 并网系统小信号等效电路图

基于同步坐标系的简化 $LCL-VSR$ 双环控制框图如图5所示。

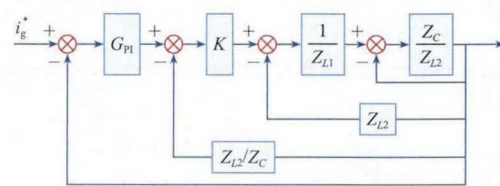


图5 简化后的控制框图

其中电容 $C=33\text{ }\mu\text{F}$ ，阻尼电阻 $R=2\text{ }\Omega$ ； $L_1=3.5\text{ mH}$ ， $R_1=0.1\text{ }\Omega$ ； $L_2=0.7\text{ mH}$ ， $R_2=0.05\text{ }\Omega$ ； Z_{L1} 、 Z_{L2} 和 Z_C 分别是 LCL 电路中 L_1 、 L_2 和 C 的等效阻抗； G_{PI} 为PI响应。图5中各部分参数表达式为

$$Z_{L1} = \frac{1}{sL_1 + R_1} \quad (13)$$

$$Z_{L2} = \frac{1}{sL_2 + R_2} \quad (14)$$

$$Z_C = \frac{R_d Cs + 1}{sC} = R_d + \frac{1}{sC} \quad (15)$$

$$G_{PI} = 3 + \frac{800}{s} \quad (16)$$

由图5相关参数可推导出并网系统的阻抗传递函数为

$$Z_G = \frac{Z_{L1}Z_{L2} + A(Z_{L1} + G_{PI}K)}{Z_{L1}} \quad (17)$$

式中， $A = Z_C Z_{L1} / (Z_{L1} + Z_C + K)$ 。

基于式(17)的传递函数，可利用Matlab绘制阻抗伯德图，其结果如图6所示。

图6中标注出的各点为该点频率对应次数谐波的阻抗值，从图6中数据可得到各次谐波阻抗的幅值和相位，又由于并网系统中PCC处的电流为

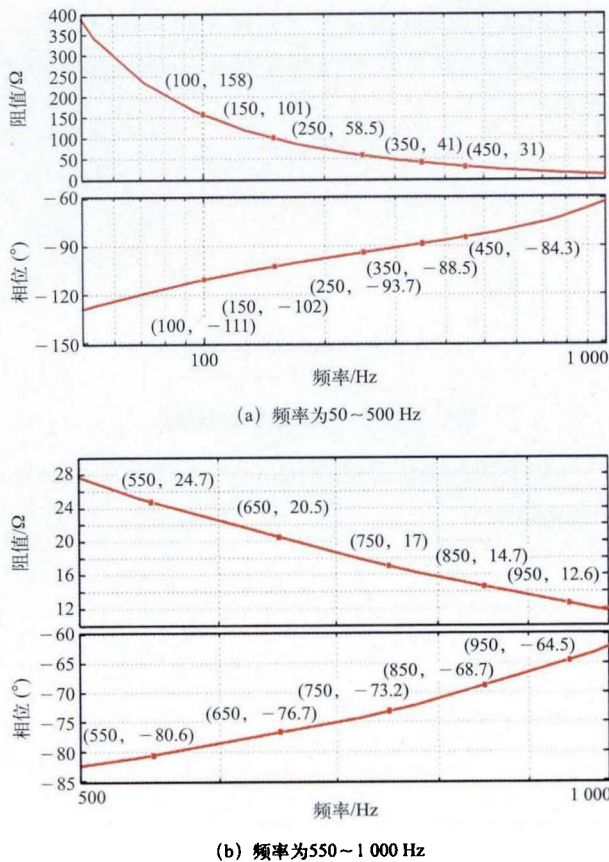


图6 频率为50~1 000 Hz的阻抗伯德图

$$i_g = -u_g / Z_G \tag{18}$$

通过式（18）能够在已知电网背景谐波对应电压畸变值情况下，计算出各次谐波在PCC处对应次谐波电流的含量，在此基础上，对照新能源并网谐波标准，验证背景谐波下，PCC处电能质量是否符合要求。

表1和表2为电网电压存在背景谐波情况下，逆变器交流侧PCC处电流所含各次谐波的幅值与相位。

表1 PCC处电流谐波幅值对比

		谐波次数	3	5	7	9	11	13	15
幅值 /A	计算0.04	0.123	0.212	0.303	0.4	0.502	0.605	0.73	
	仿真0.04	0.13	0.22	0.3	0.4	0.52	0.62	0.73	
	计算0.08	0.246	0.424	0.606	0.8	1.004	1.21	1.458	
	仿真0.08	0.24	0.44	0.6	0.8	1.02	1.23	1.46	
	计算0.15	0.46	0.8	1.135	1.501	1.884	2.27	2.738	
	仿真0.15	0.46	0.81	1.14	1.51	1.92	2.31	2.74	
	计算0.2	0.613	1.059	1.511	1.998	2.508	3.022	3.644	
	仿真0.2	0.61	1.09	1.53	2.01	2.55	3.07	3.66	

表1为电网电压分别注入4%、8%、15%和20%

表2 PCC处电流谐波相位对比

		谐波次数	3	5	7	9	11	13	15
相位 (°)	计算0.04	101.8	93.6	88.4	84.2	80.4	76.7	73.2	
	仿真0.04	99.9	86.4	88.6	84.5	79.3	78.1	73.9	
	仿真0.08	102.7	88.6	88.7	84.6	79.6	77.6	73.8	
	仿真0.15	103.2	89.5	88.3	84.1	79.8	77.7	73.8	
	仿真0.2	103.5	89.2	88	84.1	79.9	77.5	74	

的背景谐波时，由阻抗分析法计算所得的PCC电流谐波含量与经Matlab仿真值的对比。表2则为各次谐波对应的相位对比。从表中数据可以直观地看到，本文所提出的基于小信号等效模型的阻抗分析法对新能源并网系统谐波交互影响分析具有较高准确度，可以作为一种衡量逆变器并网系统电能质量的工具使用。

3 HPF对并网电流的改善

背景谐波的存在对新能源并网系统安全运行造成不利影响，目前采用的谐波治理设备分为无源滤波器（PPF）、有源滤波器（APF）以及二者有机结合的混合滤波器（HPF）。PPF结构简单、成本低但易因制作工艺和老化现象导致失谐，准确度不够；APF性能优良，环境适应能力强，但受到电力电子器件电压和电流水平的限制。HPF结合了PPF和APF特点，利用低压小容量有源装置的灵活控制功能改善了高压大容量无源滤波器的滤波特性和效果。本文所用的混合电力滤波器的电路拓扑结构如图7所示。

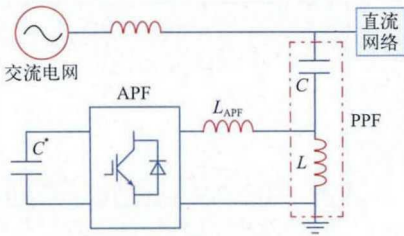


图7 HPF电路拓扑图

图8为电网电压背景谐波为10%的7次谐波时，分别使用PPF、APF和HPF滤波时的并网点电流各次谐波畸变率对比图。可以看出，HPF的使用会使电流幅值增大，但可明显改善电网电压背景谐波造成的并网点电流谐波含量超出标准的情况，具有鲜明优越性。

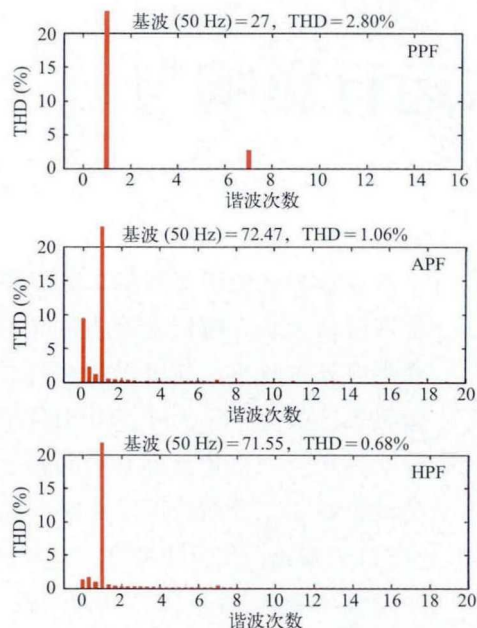


图8 PPF、APF和HPF滤波效果图

4 结束语

电网电压存在背景谐波将导致逆变器并网系统交、直流侧稳定性都降低。结合逆变器开关函数理论可得到直流波动量对交流并网点电流谐波含量的影响,通过建立并网系统的小信号等效模型,利用阻抗分析法定量分析背景谐波下PCC电流谐波含量。对于背景谐波注入可能导致的并网谐波超标现象,混合电力滤波器有良好的滤波效果,结合Matlab/Simulink仿真可得到以下结论。

1) 当电网电压存在 h 次背景谐波时,逆变器直流侧 $h-p$ 倍频波动量将明显上升。

2) 直流侧波动量在系统串联谐振时会导致逆变器交流侧产生3、5、7和9等奇次谐波,尤其是波动频次加减一次的含量较高。

3) 基于小信号等效模型的阻抗分析法对于测定PCC电流谐波含量具有较高的准确度。

4) HPF对于改善电网电压背景谐波下并网点电能质量具有明显的优越性。

参考文献

[1] 同向前, 伍文俊, 任碧莹, 等. 电压源换流器在电力系统中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[2] 李令冬, 杨超颖. 电能质量若干问题讨论 [J]. 电气应用, 2016, 35 (8): 12-15.

[3] 程永颖, 和敬涵, 胡骏, 等. 含高渗透率DG的配电网加速自适应电流速断保护 [J]. 电气应用, 2016, 35 (9): 41-45.

[4] 刘秀兰, 栾逢时. 电力谐波对电力系统的影响及治理方法 [J]. 电气应用, 2015 (增刊1): 125-128.

[5] Changwoo Yoon, Xiongfei Wang, Filipe Miguel, et al. Harmonic stability assessment for multi-paralleled [C]. IEEE PES General Meeting, 2014: 1098-1103.

[6] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (11): 3075-3078.

[7] 解娅楠. 阻抗网络型并网逆变器的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

[8] Jessen L, Fuchs F W. Modeling of inverter output impedance for stability analysis in combination with measured grid impedances [C]. IEEE PES General Meeting, 2015: 1-7.

[9] 周林, 张密, 居秀丽, 等. 电网阻抗对大型并网光伏系统稳定性影响分析 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (34): 99-106.

[10] Zheng-You He, Jing Chen, Ling Fu, et al. Harmonic contribution assessment on the condition of background harmonic fluctuations [C]. IEEE EDST General Meeting, 2015: 431-435.

[11] Sun X, Zeng J, Chen Z. Site selection strategy of single-frequency tuned R-APF for background harmonic voltage damping in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (1): 135-143.

[12] 陈轶涵, 任磊, 邓翔, 等. 一种基于3次谐波注入的并联三相四桥臂逆变器均流控制策略 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (4): 104-113.

[13] 许胜. 基于对称规则采样法的多模块APF并联系统谐波特性分析 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (4): 104-113.

(收稿日期: 2016-07-01) EA