

三相PWM变流器谐波阻抗的研究

师洪涛, 卓放, 侯李祥, 岳小龙, 张东, 耿志清

(西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 变流器的谐波阻抗是系统稳定性分析、滤波器优化设计中的重要参数。以典型的三相PWM逆变器为例, 研究了三相PWM逆变器在 abc 坐标系下与 dq 坐标系下的输出阻抗模型, 并采用谐波电流注入法, 对逆变器的输出阻抗进行测量, 从而得到三相PWM变流器的谐波阻抗参数。采用仿真实验对理论分析进行了验证。

关键词: 三相PWM变流器; 谐波阻抗; 阻抗测量

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)06-0052-04

Research on the Harmonic Impedance of Three-phase PWM Converter

SHI Hong-tao, ZHUO Fang, HOU Li-xiang, YUE Xiao-long, ZHANG Dong, GENG Zhi-qing

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: Harmonic impedance is a key parameter used to analyze the stability of system, optimized design of filter, and so forth. It developed an output impedance model in abc coordinates and dq coordinates as an example of a typical three-phase PWM inverter. Output impedance of the inverter was extracted and measured by injecting a current perturbation and the parameter of harmonic impedance was got. Simulation results validate the theoretical analysis.

Key words: three-phase PWM converter; harmonic impedance; current injection

0 引言

各种分布式电源、储能装置或负荷一般通过单级或者多级变流器接至电网中, 因此变流器的输入、输出阻抗是系统阻抗的重要组成部分, 是研究系统谐波源分布、变流器并联均流分析、稳定性分析、滤波器设计的重要参数, 相关学者为此进行了大量研究^[1-10]。文献[1-3]研究了Buck变换器输入、输出阻抗与系统参数及控制方式之间的关系, 得到了变换器的输入、输出阻抗

曲线。文献[4]建立了带有LCL滤波整流器的闭环高频输入阻抗模型, 并研究了整流器的输入阻抗在整流模式与有源逆变模式下的不同特性。文献[5-6]建立了单相PFC整流器的大信号模型并推导出系统的输入阻抗, 采用电流或电压扰动法对变流器的输入、输出阻抗进行测量。文献[7]提出了一种电流扰动测试法, 对变换器输入、输出阻抗及级联变换器的阻抗比进行测量, 并根据阻抗比禁止区对系统的稳定性进行判断。文献[8]和[9]对交流变流器的阻抗进行测量时, 为了得到三相变流器在 dq 坐标系下的谐波阻抗, 对 dq 坐标系下的系统注入一系列的扰动, 换算至 abc 坐标系下, 需要对系统注入一系列正弦调制电流^[8], 或者是调频电流^[9]。文献[10]中提出一种不对称正弦电流的注入方法, 即在所有感兴趣的频率点逐次注入一系列不对称的正弦波, 从而得到对应频率点的谐波阻抗矩阵。

本文以电力系统中典型的三相PWM变流器—逆变

收稿日期: 2013-08-19

作者简介: 师洪涛(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事微型电网、分布式发电相关电能质量控制技术方面的研究;

卓放(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电能质量控制技术、太阳能发电电力电子技术、低压大电流直流高效电源及非接触感应电能传输技术等方面的研究。

基金项目: 国家自然科学基金(51177130); 台达2011电力电子科教发展计划重点项目(DREK2011002)

器为研究对象,研究了三相逆变器在 abc 坐标系下与 dq 坐标系下输出阻抗的计算方法,并仿真验证了该理论的可行性。

1 逆变器输出阻抗

1.1 abc 坐标系下输出阻抗模型

在 abc 坐标系下,三相电压型逆变器的典型结构如图1所示。图中,电压型逆变器采用直接电压电流双环控制(一般在频域中设计电压环与电流环),电压外环反馈电容电压 U_{Cabc} 用于稳定输出电压,电流内环反馈滤波电感电流 i_{Labc} 用来提高响应速度, L_{fabc} 与 C_{fabc} 为逆变器的滤波电感与滤波电容, L_{abc} 为逆变器与电网之间的连接电感, U_{DC} 为逆变器直流侧电压, i_{cabc} 为电容电流, i_{gabc} 为逆变器的并网电流。

当逆变器反馈电容电压 u_c 与滤波电容的电流 i_c 时,

其控制框图如图2所示。图中, $G_v(s)$, $G_i(s)$ 分别为电压调节器与电流调节器的传递函数, K_{PWM} 为正弦调制环节的等效传递函数, U_o 为逆变器的出口电压, U_g 为电网电压, i_g 为电网电流, U_{ref} 与 I_{ref} 为电压环与电流环的参考电压与参考电流。

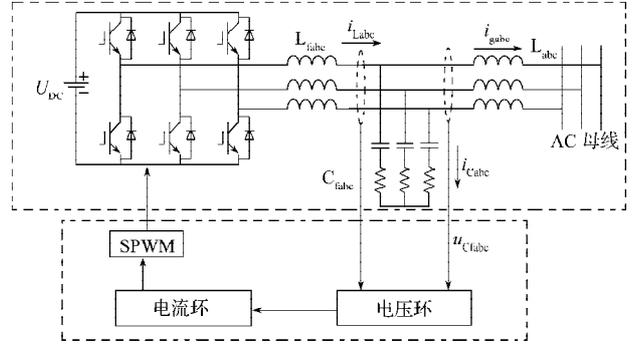


图1 电压型PWM逆变器结构图

Fig. 1 Configuration of voltage type PWM inverter

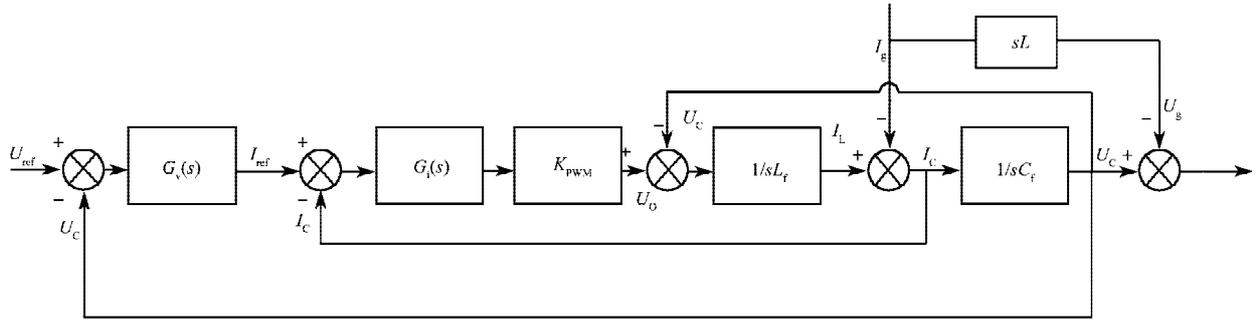


图2 逆变器 abc 坐标系下的控制框图

Fig. 2 Control system of inverter in abc coordinates

根据图2所示的控制原理,若系统反馈量为电容电压与电感电流时,可以得到系统的传递函数为:

$$U_g = G_{kv}(s)U_{ref} - Z(s)I_g \quad (1)$$

式中:

$$G_{kv}(s) = \frac{G_v(s)G_i(s)K_{PWM}}{L_f C_f s^2 + C_f G_i(s)K_{PWM}s + G_v(s)G_i(s)K_{PWM} + 1} \quad (2)$$

$$Z(s) = \frac{L_f s + G_i(s)K_{PWM}}{L_f C_f s^2 + C_f G_i(s)K_{PWM}s + G_v(s)G_i(s)K_{PWM} + 1} + Ls \quad (3)$$

若电压和电流调节器的传递函数为:

$$\left. \begin{aligned} G_v(s) &= K_{vp} + K_{vi} / s \\ G_i(s) &= K_{ip} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: k_{vp} ——电压调节器比例系数; k_{vi} ——电压调节器积分系数; k_{ip} ——电流调节器的比例系数。

K_{PWM} 近似取直流侧电压的二分之一,则对应的逆变器输出阻抗为:

$$Z(s) = \left\{ L_f L C_f s^4 + C_f L K_{ip} \frac{U_{DC}}{2} s^3 + \left[\left(K_{vp} K_{ip} \frac{U_{DC}}{2} + 1 \right) L + L_f \right] s^2 + L K_{vi} K_{ip} \frac{U_{DC}}{2} s \right\} \times \left[L_f C_f s^3 + C_f K_{ip} \frac{U_{DC}}{2} s^2 + \left(K_{vp} K_{ip} \frac{U_{DC}}{2} + 1 \right) s + K_{vi} K_{ip} \frac{U_{DC}}{2} \right]^{-1} \quad (5)$$

从阻抗公式可以看出,逆变器的输出阻抗与逆变器的硬件结构、控制参数及反馈量等均相关。不同的逆变器,若参数与结构不同,则输出阻抗亦不同。

1.2 dq 坐标系下输出阻抗模型

三相逆变器的控制模型(图3)一般在 dq 坐标系下完成。图中, Z_{LCdq} 为逆变器的LCL滤波器等效至 dq 坐标系的传递函数,其表达式如式(6)所示;逆变器输出电压与参考电压之间传递函数的表达式如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} U_{od} \\ U_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ -T & R \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{gd} \\ U_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sL_f & \omega_0 L_f \\ -\omega_0 L_f & sL_f \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{gd} \\ I_{gq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} U_{od}(s) \\ U_{oq}(s) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} U_{refd}(s) \\ U_{refq}(s) \end{bmatrix} - A \begin{bmatrix} U_{cd}(s) \\ U_{cq}(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -C & B \\ -B & -C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{gd}(s) \\ I_{gq}(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $R = \frac{C_f L_f [2\omega_0^2 s R_f C_f + (s^2 + \omega_0^2)(1 + s R_f C_f)]}{(1 + s R_f C_f)^2 + \omega_0^2 R_f^2 C_f^2} + 1;$

$$T = \frac{R_f C_f^2 L_f (\omega_0^2 + s^2) + \omega_0 s C_f (L_f + 1)}{(1 + s R_f C_f)^2 + \omega_0^2 R_f^2 C_f^2};$$

$$A = G_v(s) \times G_i(s) \times K_{PWM};$$

$$B = \omega_0 \times L_{vir} \times A, L_{vir} \text{ 为虚拟电感};$$

$$C = G_i(s) \times K_{PWM} \times [1 + R_{vir} \times G_v(s)], R_{vir} \text{ 为虚拟电阻};$$

$$L_f \text{——输出滤波电感}。$$

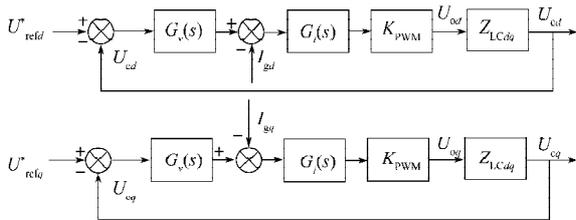


图3 逆变器在dq坐标系下的控制框图

Fig. 3 Block diagram of control system for inverter in dq coordinates

结合式(6)和式(7),可以得到逆变器在dq坐标系下输出阻抗的表达式:

$$\begin{bmatrix} Z_{dd}(s) & Z_{dq}(s) \\ Z_{qd}(s) & Z_{qq}(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} L & Q \\ -Q & L \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: Z_{dd} ——d轴输出阻抗; Z_{qq} ——q轴输出阻抗; Z_{dq} ——d轴在q轴上的互阻抗; Z_{qd} ——q轴在d轴上的互阻抗;

$$L = C + sL_f - \frac{T(B - \omega_0 \times L_f)}{R + A}; \quad Q = \omega_0 \times L_f - B -$$

$$\frac{T(C + sL_f)}{R + A}; \quad H = R + A + \frac{T^2}{R + A}。$$

2 三相变流器谐波阻抗的测量

三相变流器谐波阻抗的测量一般采用对系统注入谐波电流扰动的方法,通过测量注入的谐波电流及其产生的谐波电压,经FFT分析及相应的算法后得到谐波阻抗(图4)。

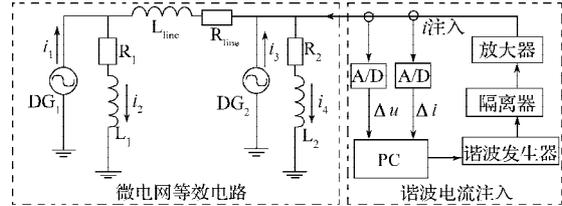


图4 系统谐波阻抗测量示意图

Fig. 4 Diagram of harmonic impedance measurement based on current injection

假设系统中某节点在谐波电流注入前电压为 u 。当次节点注入谐波电流 Δi 后,节点处电压变为 u' ,则 Δi 引起的谐波电压为:

$$u_h = u' - u \quad (9)$$

对谐波电流变化量及谐波电压变化量进行傅里叶变换,可计算出系统的谐波阻抗:

$$Z_h(j\omega) = \frac{U_h(j\omega)}{I_h(j\omega)} \quad (10)$$

利用谐波电流源发出一个幅值、频率及初相位均可控制的方波,并将其以电流的形式注入至变流器系统中,通过FFT分析可得到系统的谐波阻抗。

3 仿真

利用PSCAD搭建了三相逆变器的仿真模型,并利用一个谐波电流源对系统注入了频率及幅值等均可控的方波电流。

图5示出测量得到的三相逆变器在abc坐标系下的输出阻抗曲线。可以看出,三相逆变器的输出阻抗在低频段呈阻感性,在高频段逐渐呈阻性,约在1.2 kHz频率点,其阻抗有一个极大值。

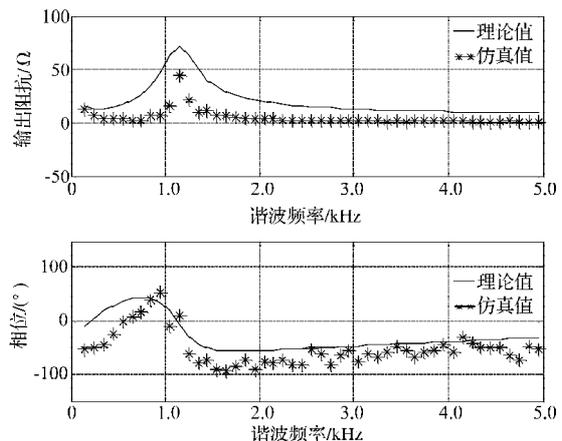


图5 逆变器在abc坐标系下的输出阻抗

Fig. 5 Output impedances of inverter in abc coordinates

图6示出三相逆变器在dq坐标系输出阻抗 Z_{qq} 的曲线(其中 $Z_{qq} = Z_{dd}$),图7示出三相逆变器在dq坐标系输出阻抗 Z_{dq} 的曲线(其中 $Z_{dq} = -Z_{qd}$)。

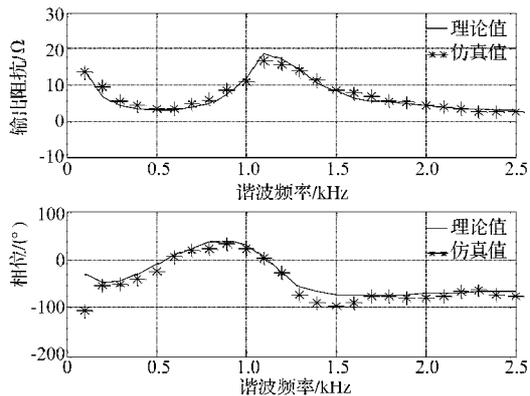


图6 逆变器在dq坐标系下的输出阻抗(Z_{dq})
Fig. 6 Output impedances of inverter in dq coordinates (Z_{dq})

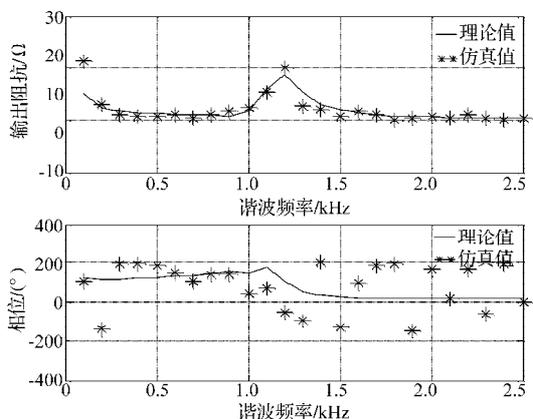


图7 逆变器在dq坐标系下的输出阻抗(Z_{dq})
Fig. 7 Output impedances of inverter in dq coordinates (Z_{dq})

由图5~图7可以看出,谐波阻抗理论值与实验值基本是一致;但随着频率的升高,注入的谐波电流产生了很大的衰减,因此,测量精度有所降低。仿真结果验证了该方法的正确性。

4 结语

谐波阻抗是三相变流器进行系统稳定性分析、均

流分析及谐波源分布研究等的重要参数。对系统进行均流分析及谐波源分布等研究时,需分析变流器在abc坐标系下的谐波阻抗;而采用阻抗稳定性判据对系统进行稳定性分析时,需得到变流器在dq坐标系下的谐波阻抗。三相PWM变流器的输出阻抗与电路的主电路参数及其控制参数等均有联系,而采用谐波电流注入法可以有效地测量系统的谐波阻抗。

参考文献:

- [1] 吴涛,阮新波. 分布式供电系统中源变换器输出阻抗的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 66-72.
- [2] 吴涛,阮新波. 分布式供电系统中负载变换器的输入阻抗分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 20-25.
- [3] 佟强,张东来,徐殿国. 分布式电源系统中变换器的输出阻抗与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 57-64.
- [4] 李芬,邹旭东,邹云屏,等. 并网LCL滤波器的PWM整流器输入阻抗分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 97-103.
- [5] Sun J. Input impedance analysis of single-phase PFC converters [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2005, 20(2): 308-314.
- [6] Chen M, Sun J. Low-frequency input impedance modeling of boost single-phase PFC converters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2007, 22(4): 1402-1409.
- [7] Liu J J, Feng X G, Lee F C. Stability margin monitoring for DC distributed power systems via perturbation approaches [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2003, 18(6): 1254-1261.
- [8] Familiant Y L, Corzine K A, Huang J, et al. AC impedance measurement techniques[C]// IEEE International Conference: Electric Machines and Drives, 2005: 1850-1857.
- [9] Shen Z, Verhulst J, Belkhatay M. Three-phase AC system impedance measurement unit using chirp signal injection[C]//Twenty-eighth Annual IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013: 2666-2673.
- [10] Huang J, Corzine K A, Belkhatay M. Small-Signal Impedance Measurement of Power-Electronics-Based AC Power Systems Using Line-to-Line Current Injection [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2009, 24(2): 445-455.

广告目录:

河北中瓷电子科技有限公司(封二); 上海中电罗莱数码技术有限公司(后插1); 湖南南车时代电动汽车股份有限公司(后插2、3); 株洲时代电气绝缘有限责任公司(后插4); 三菱电机机电(上海)有限公司(后插5); 株洲时代新材料科技股份有限公司(后插6); 株洲南车时代电气股份有限公司电力电子事业部(后插7); 株洲时代装备技术有限责任公司(后插8、9); 瑞士CT-Concept Technologie Ltd.(后插10); 株洲南车时代电气股份有限公司印制电路事业部(后插11); 《大功率变流技术》2014年征订启事(后插12); 上海鹰峰电子科技有限公司(后插13); 宁波南车时代传感技术有限公司(后插14); 株洲变流技术国家工程研究中心有限公司(封三); 南车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部(封四); 河北中瓷电子科技有限公司(黑白插页)

