

基于光伏逆变器的电网谐波阻抗测量新技术

赵本强^{1,2}, 曾江^{1,2*}, 谢宝平^{1,2}, 马海杰^{1,2}, 刘佩^{1,2}, 叶康权^{1,2}

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641;

2. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室, 广东 广州 510641)

New Technology of Grid Harmonic Impedance Measurement Based on Photovoltaic Inverter

ZHAO Benqiang^{1,2}, ZENG Jiang^{1,2*}, XIE Baoping^{1,2}, MA Haijie^{1,2},
LIU Pei^{1,2}, YE Kangquan^{1,2}

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Power Grid Intelligent Measurement and Advanced Metering
Enterprises, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In response to the demand for grid harmonic impedance measurement in the context of new power systems, a novel grid harmonic impedance measurement method based on photovoltaic inverter is proposed. The proposed method does not disturb the power grid, does not require the installation of additional measurement equipment, and can also control grid harmonics during the impedance measurement. The method controls the photovoltaic inverter to function as a normal power generator under fundamental waves and controls it to be equivalent to a virtual resistor under harmonics. By changing the equivalent virtual harmonic resistance value of the inverter, the amplitude of the harmonic voltage at the grid connection point is measured, and combined with the least squares method to estimate the harmonic impedance amplitude of the system. The impedance measurement experiment is conducted using the hardware-in-loop real-time simulation experimental platform, and the measurement results are consistent with the set values. The measurement accuracy of the 5th harmonic impedance of the system reaches 99%, and the measurement accuracy of the 7th harmonic impedance reaches 97%, which verifies that the proposed method can not only measure the amplitude of the system's multiple harmonic impedance, but also ensure high measurement accuracy.

Key words: photovoltaic inverter; virtual harmonic resistor; harmonic impedance measurement; least squares method

摘要: 针对新型电力系统背景下电网谐波阻抗的测量需求,提出了一种基于光伏逆变器的新型电网谐波阻抗测量方法。所提方法不会对电网产生扰动,无需安装额外的测量设备,并且还能在阻抗测量过程中治理电网谐波。该方法在基波下控制光伏逆变器实现正常发电功能,在谐波下控制其等效为虚拟电阻。通过改变逆变器的等效虚拟谐波电阻值,测量并网点谐波电压的幅值,并结合最小二乘法来估算系统的谐波阻抗幅值。利用硬件在环实时仿真试验平台进行阻抗测量试验,测量结果与设定值相符,系统 5 次谐波阻抗的测量精度达 99%,7 次谐波阻抗的测量精度达 97%,验证了所提方法不仅可测量系统多次谐波阻抗幅值,且能保证较高的测量精度。

关键词: 光伏逆变器; 虚拟谐波电阻; 谐波阻抗测量; 最小二乘法

0 引言

随着新型电力系统的构建及新能源发电并网,越来越多的电力电子设备接入电网中^[1],使得电网中非线性负荷的渗透率日趋升高,由此引起的谐波污染问题也日益严重,谐波相关参数的测量是谐波治理的前提^[2-4]。同时,随着有源滤波器、风光逆变器等变流器的广泛使用,在微电网的稳定性分析中电网系统谐波阻抗也是重要参数^[5-7]。另外,谐波源产生的谐波电流会注入到同一条馈线的其他用户,同一条总线下面的用户注入的谐波相互影响^[8-9],容易引起电能质量纠纷。因此,通过正确估计系统谐波阻抗来计算用户的

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2021A1515012616)

Project Supported by the Natural Science Foundation of
Guangdong Province, China (2021A1515012616)

谐波发射水平十分重要^[10]。

现有的电网谐波阻抗测量技术主要分为被动式和主动式两种^[11]。被动式电网谐波阻抗测量技术是通过现有测量数据,在不对电网进行干扰的情况下,对电网参数进行估计的方法,常见的有回归法、波动量法等,这些方法通过测量公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)处谐波电压波动和谐波电流波动来估计谐波阻抗^[12-13]。但此类方法通常存在固有偏差和测量误差,适用于测量精度要求不高的场合。近年来也提出了基于神经网络、粒子群算法等被动测量方法,但这些方法都需要大量数据作为支撑。主动式电网谐波阻抗测量技术是通过向系统强迫注入谐波电流或间谐波电流^[14-16]、串联或并联无源元件来改变系统状态和参数,通过测量改变前后的参数来计算谐波阻抗,常见的有谐波注入法、投切电容法以及晶闸管短路法等^[17-20]。此类方法相对被动式测量技术精度更高,但通常会对电网运行产生不利影响。

本文将逆变器等效为虚拟电阻,并采用精度更高的主动式测量技术。由于逆变器对基波等效为开路,对电网不产生影响;对 h 次谐波等效为虚拟电阻,不仅吸收谐波电流,还能够降低PCC处

赵本强,等:基于光伏逆变器的电网谐波阻抗测量新技术

的谐波电压值。通过改变虚拟电阻以及分析等值电路方程,根据最小二乘法拟合系统谐波阻抗函数,得到谐波阻抗估计值,仿真和试验结果验证了所提理论和方法的有效性。

1 逆变器建模与分析

逆变器原理图如图1所示。其中, u_{dc1} 、 u_{dc2} 为直流侧电容电压; u_a 、 u_b 、 u_c 为PCC处的三相电压; i_{1a} 、 i_{1b} 、 i_{1c} 分别为逆变器输出的三相桥侧电流; i_{2a} 、 i_{2b} 、 i_{2c} 分别为逆变器输出的三相网侧电流; L_1 、 L_2 为滤波电感; C 为滤波电容; R_c 为滤波电容串联电阻; R_s 和 L_s 分别为电网系统电阻和系统电抗; u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 分别为电网电压。

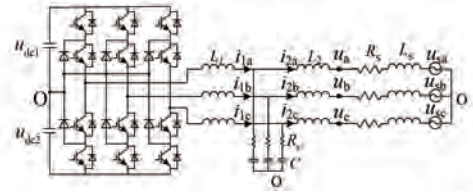


图1 逆变器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of inverter

在 $d-q$ 同步旋转坐标系下建立数学模型,其状态方程如式(1)所示:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_c}{L_1} + j\omega_g\right) & \frac{R_c}{L_1} \\ \frac{R_c}{L_2} & -\left(\frac{R_c}{L_2} + j\omega_g\right) \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} K_{PWM} u_{rdq} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} u_{gdq} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} = [i_{1dq} \ i_{2dq} \ u_{cdq}]^T = [i_{1d} + ji_{1q} \ i_{2d} + ji_{2q} \ u_{cd} + ju_{cq}]^T$; i_{1dq} 、 i_{2dq} 、 u_{cdq} 分别为 $d-q$ 同步旋转坐标系下逆变器输出桥侧电流、网侧电流及滤波电容电压; ω_g 为同步旋转角速度; K_{PWM} 为逆变器调制系数; u_{rdq} 为调制波信号; u_{gdq} 为电网电压扰动。

基于上述数学模型,设计了包括直流侧电容电压、直流侧中点电位控制电压外环和基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的频域各次谐波实部/虚部控制电流内环。

2 虚拟谐波电阻估计谐波阻抗的基本原理

2.1 虚拟谐波电阻原理

传统电流补偿型有源滤波器通过检测并网点

谐波电流值,生成与之大小相等、方向相反的谐波电流来治理谐波,其工作原理如图2所示。通常传统有源滤波器只能检测本地非线性负荷C产生的谐波电流并进行补偿,而无法补偿非线性负荷A、B及系统源产生的谐波。当非线性负荷A、B产生的谐波较大,而非线性负荷C产生的谐波较小时,采用传统有源滤波器来治理谐波效果较差。因此,采用传统有源滤波器治理谐波时,需因

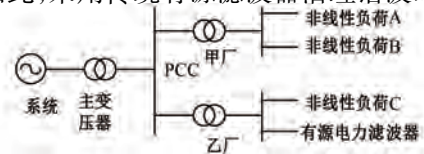


图2 传统有源滤波器谐波治理

Fig. 2 Harmonic control of traditional active power filter

地制宜多台布置,在电力电子设备大量接入的新型电力系统背景下的谐波治理成本很高。

虚拟谐波电阻技术是通过检测并网点的谐波电压,使有源滤波器在谐波频段表现为纯电阻特性,即吸收与谐波电压同相位的谐波电流,从而达到治理谐波的目的。该策略不仅能治理本地非线性负荷产生的谐波,也能抑制非本地非线性负荷产生的谐波。将该策略应用于光伏逆变器中时,只需利用光伏逆变器原有的电压检测装置采集电压信号,无需额外的网侧电流检测装置,无需增加设备成本,而且其吸收的谐波功率将以基波有功功率的形式送回电网。

采用虚拟谐波电阻策略时,对于 h 次谐波分量,配电网接入虚拟谐波电阻型逆变器后的戴维宁等效电路如图 3 所示。

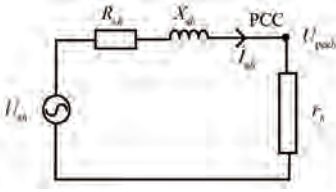


图 3 配电网接入虚拟谐波电阻的戴维宁等效电路

Fig. 3 Thevenin equivalent circuit with virtual harmonic resistance connected to distribution network

在电路中,光伏逆变器等效的虚拟谐波电阻 r_h 接入电路前、后,PCC 处的 h 次谐波电压幅值分别为

$$U_{pcc1} = U_{sh} \quad (2)$$

$$U_{pcc2} = \left| \frac{r_h}{Z_{sh} + r_h} \right| U_{sh} = \left| \frac{r_h}{\sqrt{(R_{sh} + r_h)^2 + X_{sh}^2}} \right| U_{sh} \quad (3)$$

式中: U_{pcc1} 、 U_{pcc2} 分别为接入虚拟谐波电阻前、后并网点处的 h 次谐波电压幅值; U_{sh} 为 h 次谐波电压在并网点处的电网等效谐波电压值; Z_{sh} 为电网的等效 h 次谐波阻抗; R_{sh} 和 X_{sh} 分别为 Z_{sh} 的电阻分量和电抗分量。

由式(2)和式(3)可知,接入虚拟谐波电阻后可有效降低并网点的谐波电压幅值。

在虚拟谐波电阻的具体实现中,三电平逆变器原理如图 1 所示。首先,通过对检测的网侧电压和电流数据进行 α 、 β 变换,再进行 FFT,得到 α 、 β 轴的实部和虚部,获得谐波的正负序分量;然后,将 α 、 β 轴上经 FFT 得到的各次谐波电压量除

以所设定的各次虚拟电阻量作为各次谐波电流的参考值,将 α 、 β 轴上经 FFT 得到的各次谐波电流量作为实际值,并与参考值进行比较,将差值送入比例积分控制器中进行谐波电流控制;最后,结合 h 次谐波相位进行 Park 反变换,将各次谐波控制量和基波控制量叠加后送入脉宽调制模块 (Pulse-Width Modulation, PWM) 生成逆变器控制信号。通过上述变换可生成与 h 次谐波电压同向、幅值相差 r_h 倍的 h 次谐波电流,使逆变器整体等效为一个受控电流源,受并网点各次谐波电压控制,故可以视作一个虚拟电阻。而对于基波控制仍为逆变器原来的双环控制。谐波控制算法的框架如图 4 所示。

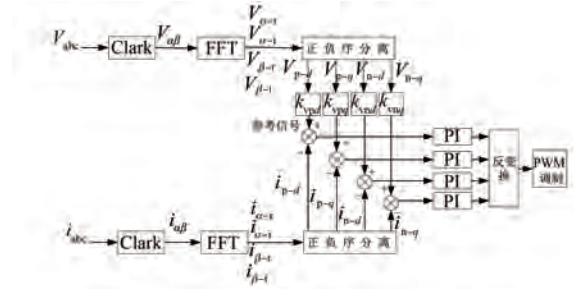


图 4 谐波控制框图

Fig. 4 Harmonic control block diagram

2.2 正负序分量检测方法

为实现虚拟谐波电阻控制,首先要确定谐波检测方法,目前在谐波补偿型有源滤波器中常采用瞬时无功功率理论,主要有 p - q 检测法和 i_p - i_q 检测法^[21]。这两种方法具有可实时检测谐波电流的优点,但其缺点也很明显,即只能得到总体的谐波含量,无法区分具体某一次的谐波数值。本文采用基于 FFT 的谐波正负序分量检测方法。

首先,对采集到的数据进行 abc - $\alpha\beta$ 坐标系变换,即:

$$\begin{cases} U_\alpha = \sqrt{2} \sum_{i=1}^n [A_{i1} \cos(w_i t + \varphi_{i1}) + A_{i2} \cos(w_i t + \varphi_{i2})] \\ U_\beta = \sqrt{2} \sum_{i=1}^n [A_{i1} \sin(w_i t + \varphi_{i1}) - A_{i2} \sin(w_i t + \varphi_{i2})] \end{cases} \quad (4)$$

式中: A_{i1} 为正序分量的有效值; A_{i2} 为负序分量的有效值; w_i 为第 i 次分量的角频率; φ_{i1} 、 φ_{i2} 为第 i 次分量的相角。

然后,将静止直角坐标系上的量进行 FFT 得到 U_α 的实部 $U_{\alpha\text{real}}$ 和虚部 $U_{\alpha\text{imag}}$, 以及 U_β 的实部 $U_{\beta\text{real}}$ 和虚部 $U_{\beta\text{imag}}$, 如式(5)和式(6)所示:

$$\begin{cases} U_{\alpha\text{real}} = \sqrt{2} \sum_{i=1}^n (A_{i1} \cos \varphi_{i1} + \sqrt{2} A_{i2} \cos \varphi_{i2}) \\ U_{\alpha\text{imag}} = \sqrt{2} \sum_{i=1}^n (A_{i1} \sin \varphi_{i1} + \sqrt{2} A_{i2} \sin \varphi_{i2}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_{\beta\text{real}} = \sqrt{2} \sum_{i=1}^n (A_{i1} \sin \varphi_{i1} - A_{i2} \sin \varphi_{i2}) \\ U_{\beta\text{imag}} = \sqrt{2} \sum_{i=1}^n (-A_{i1} \cos \varphi_{i1} + A_{i2} \cos \varphi_{i2}) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可得正序谐波分量的 d 轴直流分量 U_{1d} 和 q 轴直流分量 U_{1q} , 以及负序谐波分量的 d 轴直流分量 U_{2d} 和 q 轴直流分量 U_{2q} :

$$\begin{cases} U_{1d} = 0.5(U_{\alpha\text{real}} - U_{\beta\text{imag}}) \\ U_{1q} = 0.5(U_{\beta\text{real}} + U_{\alpha\text{imag}}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} U_{2d} = 0.5(U_{\alpha\text{real}} + U_{\beta\text{imag}}) \\ U_{2q} = 0.5(U_{\beta\text{real}} - U_{\alpha\text{imag}}) \end{cases} \quad (8)$$

将上述直流分量分别进行比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制, 再通过与各自同步旋转坐标系相对应的反坐标变换系进行反变换, 最后叠加到 abc 三相坐标系即可。

2.3 电网谐波阻抗测量原理

电网接入虚拟谐波电阻后的等效电路如图 3 所示。对于 h 次谐波分量, 通过不断改变接入的 h 次虚拟谐波电阻的阻值, 测量达到稳态后的并网点谐波电压幅值, 从而估计出系统谐波阻抗幅值 $|Z_{sh}|$ 。传统的电网系统谐波阻抗测量方法, 通常需要并网点谐波电压的幅值和相位信息。这些信息在仿真中是容易获得的, 但在实际运行中, 电网与 PCC 处的相位差无法测量, 也即无法获得 PCC 处谐波电压的真实相位信息, 故只能使用并网点谐波电压的幅值信息。对于 h 次谐波, 设改变的虚拟谐波电阻值分别为 r_{h1} 、 r_{h2} 、 r_{h3} 和 r_{h4} , 对应的并网点谐波电压幅值分别为 $U_{\text{pch}1}$ 、 $U_{\text{pch}2}$ 、 $U_{\text{pch}3}$ 和 $U_{\text{pch}4}$ 。则有:

$$U_{\text{pch}1} = \frac{U_{sh}}{\sqrt{(R_{sh} + r_{h1})^2 + X_{sh}^2}} \times r_{h1} \quad (9)$$

$$U_{\text{pch}2} = \frac{U_{sh}}{\sqrt{(R_{sh} + r_{h2})^2 + X_{sh}^2}} \times r_{h2} \quad (10)$$

$$U_{\text{pch}3} = \frac{U_{sh}}{\sqrt{(R_{sh} + r_{h3})^2 + X_{sh}^2}} \times r_{h3} \quad (11)$$

$$U_{\text{pch}4} = \frac{U_{sh}}{\sqrt{(R_{sh} + r_{h4})^2 + X_{sh}^2}} \times r_{h4} \quad (12)$$

由式(9)~式(12)可得:

$$\frac{r_{h2}^2 - A_1 r_{h1}^2}{A_1 - 1} + \frac{2(r_{h2} - A_1 r_{h1})}{A_1 - 1} \times R_{sh} = |Z_{sh}|^2 \quad (13)$$

$$\frac{r_{h4}^2 - A_2 r_{h3}^2}{A_2 - 1} + \frac{2(r_{h4} - A_2 r_{h3})}{A_2 - 1} \times R_{sh} = |Z_{sh}|^2 \quad (14)$$

$$\text{式中: } A_1 = \frac{U_{\text{pch}1}^2 \times r_{h2}^2}{U_{\text{pch}2}^2 \times r_{h1}^2}; A_2 = \frac{U_{\text{pch}3}^2 \times r_{h4}^2}{U_{\text{pch}4}^2 \times r_{h3}^2}。$$

联立式(13)和式(14)可求得系统谐波阻抗值 $|Z_{sh}|$ 和系统电阻值 R_{sh} , 其计算式分别为

$$|Z_{sh}| = \sqrt{\frac{(r_{h4} - A_2 r_{h3})(r_{h2}^2 - A_1 r_{h1}^2) - (r_{h2} - A_1 r_{h1})(r_{h4}^2 - A_2 r_{h3}^2)}{(A_1 - 1)(r_{h4} - A_2 r_{h3}) - (A_2 - 1)(r_{h2} - A_1 r_{h1})}} \quad (15)$$

$$R_{sh} = \frac{(A_2 - 1)(r_{h2}^2 - A_1 r_{h1}^2) - (A_1 - 1)(r_{h4}^2 - A_2 r_{h3}^2)}{2(A_1 - 1)(r_{h4} - A_2 r_{h3}) - 2(A_2 - 1)(r_{h2} - A_1 r_{h1})} \quad (16)$$

由上述计算可知, 通过 4 次改变光伏逆变器等效虚拟谐波电阻值, 即可测量出电网系统谐波阻抗幅值。但考虑到实际运行中存在测量误差, 以及逆变器容量限制使虚拟电阻值取值存在限制。因此, 本文在上述理论推导的前提下加入最小二乘法, 减小上述因素对测量结果的影响。对于线性函数 $y = kx + b$, 拟合参数 k 、 b 的原则是最小二乘原则, 即求得参数 k 、 b 使得误差函数 $e = \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2$ 达到最小值。由极值的必要条件可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial e}{\partial k} = 2 \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)x_i = 0 \\ \frac{\partial e}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

对式(17)化简可得:

$$\hat{k} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

$$\hat{b} = \bar{y} - \hat{k}\bar{x} \quad (19)$$

式中: $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 x_i 和 y_i 的均值。

将式(13)改写成:

$$\frac{r_{h2}^2 - A_1 r_{h1}^2}{A_1 - 1} = -\frac{2(r_{h2} - A_1 r_{h1})}{A_1 - 1} \times R_{sh} + |Z_{sh}|^2 \quad (20)$$

$$\text{令 } x_i = -\frac{2(r_{hi+1} - A_i r_{hi})}{A_i - 1}, y_i = \frac{r_{hi+1}^2 - A_i r_{hi}^2}{A_i - 1}, \text{ 则 } \hat{k} = R_{sh},$$

$$\hat{b} = |Z_{sh}|^2.$$

电网谐波阻抗测量流程图如图 5 所示。在求取系统谐波阻抗时,多次改变设定虚拟谐波电阻值,检测并网点电压电流值,利用最小二乘拟合求得系统谐波阻抗值为

$$\begin{cases} R_{sh} = \hat{k} \\ |Z_{sh}| = \sqrt{\hat{b}} \end{cases} \quad (21)$$

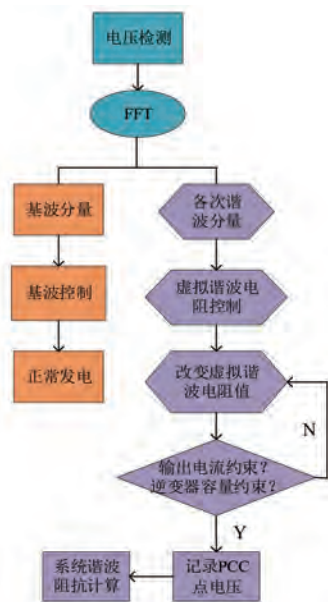


图 5 谐波阻抗测量流程图

Fig. 5 Flowchart of harmonic impedance measurement

3 仿真与试验验证

3.1 电网谐波电压抑制分析

在 Matlab 中搭建图 1 所示的仿真模型,对本文所提的虚拟谐波电阻抑制 PCC 处谐波电压策略进行验证,仿真结果如图 6 所示。系统 5、7 次谐波电压有效值为 10 V,11、13 次谐波电压有效值为 5 V。设置虚拟谐波电导值为 0.3 S,由图 6 可知接入后并网点谐波电压分别降低了 11%、

15.96%、30.25% 以及 41%,可见本文所提策略可有效抑制 PCC 处谐波电压。

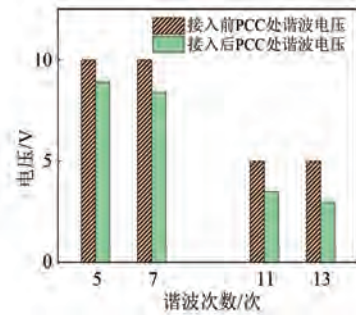


图 6 PCC 处谐波电压频谱图

Fig. 6 Spectrum of harmonic voltage at PCC

将传统谐波电流注入法与本文所提策略进行对比分析,系统侧 5 次谐波电压有效值为 10 V。传统谐波电流注入法通常向电网注入偶次谐波以减小对电网的影响,为了方便比较本试验采用 5 次谐波电流注入。图 7 为 PCC 处 5 次谐波电压幅值,由图 7 可知,采用本文所提虚拟谐波电阻策略接入并达到稳态后,PCC 处 5 次谐波电压降低为原来的 89%,而采用传统谐波电流注入法却造成了并网点谐波电压升高的现象。可见,本文所提策略不仅不会对电网造成不利扰动,还能抑制并网点谐波电压,相比传统干预式测量方法对电网更加友好。

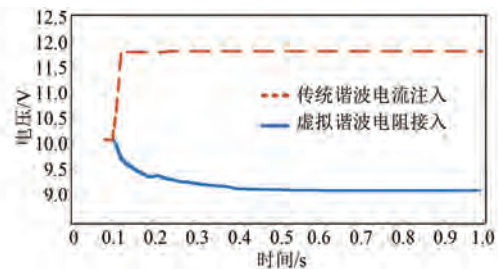


图 7 PCC 处 5 次谐波电压幅值

Fig. 7 Amplitude of 5th harmonic voltage at PCC

3.2 谐波阻抗测量

为验证所提策略的有效性,搭建了实时仿真试验平台,如图 8 所示。该试验平台由 DSP 主控板、半实物仿真器、ARM 辅助显示通讯板以及上位机组成。仿真中,设置网侧电感为 1 mH,电阻为 0.001 Ω ,开关频率 19.2 kHz,系统基波电压有效值为 220 V,5 次谐波电压有效值为 10 V,7 次谐波电压有效值为 7 V,11 次谐波电压有效值为 5 V,13 次谐波电压有效值为 5 V。

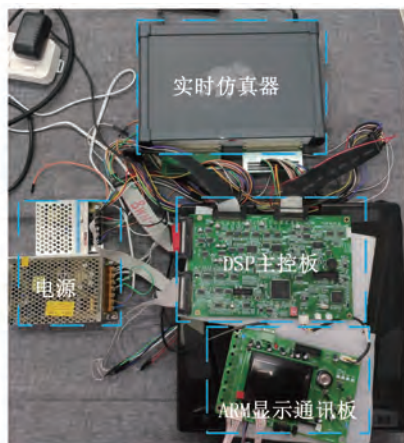


图8 实时仿真试验平台

Fig. 8 Real-time simulation experimental platform

本文中逆变器分12次设置虚拟电导,如表1所示。并测量PCC处电压,结合式(7)、式(8)和式(20)得到线性方程 $y=kx+b$ 中的变量 x 、 y 。为了减小数值计算误差,每一组数据大间隔匹配另外一组数据,如表1中组别1设置虚拟谐波电导为0.05 S,匹配组别7设置虚拟谐波电导为0.2 S的数据,并计算一组相应的 (x,y) 。

表1 12组虚拟谐波电导值

Tab. 1 12 sets of virtual harmonic conductance values

conductance values		S	
组别	电导值	组别	电导值
1	0.05	7	0.2
2	0.08	8	0.225
3	0.1	9	0.25
4	0.125	10	0.275
5	0.15	11	0.3
6	0.17	12	0.325

各次谐波数据拟合的线性方程表达式如表2所示,函数拟合图如图9所示。

表2 各次谐波数据拟合的线性方程

Tab. 2 Linear equation of each harmonic data fitting

谐波次数	拟合线性方程
5	$y = 0.051\ 08x + 2.482$
7	$y = 0.084\ 54x + 5.097$
11	$y = 0.362\ 1x + 13.16$
13	$y = 0.415\ 4x + 20.95$

试验中,相对于电抗值,系统电阻值较小,可忽略不计,实际阻抗和测量阻抗数据如表3所示。

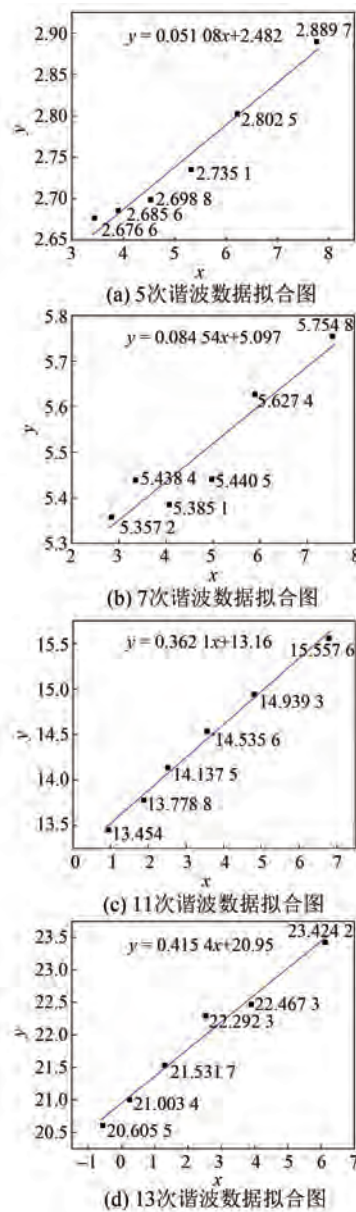


图9 各次谐波数据拟合图

Fig. 9 Fitting diagram of each harmonic data

表3 各次谐波阻抗的估计精度

Tab. 3 Accuracy of estimation of each harmonic impedance

谐波次数	实际阻抗/ Ω	测量阻抗/ Ω	误差/%
5	1.570 8	1.575 6	0.306
7	2.199 1	2.257 7	2.665
11	3.455 8	3.627 7	4.973
13	4.084 1	4.577 2	12.070

从表3可知,本文所提测量方法可有效测量电网谐波阻抗幅值,并且在低次谐波下的阻抗测量精度较高,其中5、7以及11次谐波阻抗测量精

度达 95% 以上;13 次谐波阻抗测量精度在 88% 左右。采用的最小二乘法很好地避免了随机测量误差,保证了测量精度。谐波次数越高,系统阻抗估计偏差越大。这是因为高次谐波变化率更快,要求响应和控制速度更快,而传统 PI 控制难以到达较好的效果。因此,等效虚拟电阻的阻值不一定准确,可考虑采用效果更好的控制方法,如自抗扰控制、滞环电流控制等提高控制精度。

4 结语

本文首次提出了一种基于虚拟谐波电阻型光伏逆变器估计电网系统谐波阻抗的技术。在光伏逆变器实现正常发电功能的基础上,在各次谐波下将其等效为虚拟谐波电阻,通过改变等效虚拟谐波电阻值来测量 PCC 处谐波电压幅值变化,并基于最小二乘法来估算电网谐波阻抗幅值。相对于传统的主动式谐波阻抗测量方法,本文所提的新型主动式测量方法不仅不会对电网产生不利影响,还能抑制并网点谐波电压,对低次系统谐波阻抗的估计精度能达到 99%。仿真和试验结果验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] HAN G, SUN G Q, CAI D F, et al. A review of key technologies for converting thermal power units to condensers in new power systems [C] //2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Chengdu, 2022.
- [2] 朱嘉远. “双碳”背景下含高需求响应负荷的配电网状态估计算法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50 (2): 82-90.
- ZHU J Y. Distribution network state estimation algorithm with high demand response enabled load under the background of “Dual Carbon” [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50 (2): 82-90.
- [3] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
- KANG C Q, DU E S, GUO H Y, et al. Primary exploration of six essential factors in new power systems [J]. Power System Technology, 2023, 47 (5): 1741-1750.
- [4] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
- LI B, CHEN M Y, ZHONG H W, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [5] 张东辉, 陈新. 基于阻抗视角的新能源发电系统宽频振荡抑制技术综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023-10-24. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231365>.
- ZHANG D H, CHEN X. Overview of broadband oscillation mitigation of new energy generation power system based on impedance perspective [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023-10-24. <https://doi.org/10.13334/j.02588013.pcsee.231365>.
- [6] ZHENG X, XIAO X Y, WANG Y. Harmonic impedance measurement based on an improved binary regression algorithm and dynamic time warping distance [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130: 106907.
- [7] 夏焰坤, 任俊杰. 基于神经网络-自适应提升算法的谐波阻抗估计[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 2023-06-13. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001284>.
- XIA Y K, REN J J. Harmonic impedance estimation based on BP-adaptive boost algorithm [J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023-06-13. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001284>.
- [8] 孙媛媛, 许庆桑, 马钊, 等. 数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J/OL]. 电力系统自动化, 2023-10-19. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231019.0921.002.html>.
- SUN Y Y, XU Q S, MA Z, et al. Key technologies of harmonic source determination in new power system against the background of digitalization [J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2023-10-19. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231019.0921.002.html>.
- [9] 丁同, 陈红坤, 吴斌, 等. 多谐波源定位及谐波责任量化区分方法综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 19-30.
- DING T, CHEN H K, WU B, et al. Overview on location and harmonic responsibility quantitative determination methods of multiple harmonic sources [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 19-30.

- [10] 李智, 李长喜, 陈创庭, 等. 电流控制型储能变流器控制稳定性分析与谐波谐振抑制技术研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 21-28+34.
- LI Z, LI C X, CHEN C T, et al. Control stability analysis and research on harmonic resonance suppression technology of current-control type energy storage converter [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 21-28+34.
- [11] 谢少军, 季林, 许津铭. 并网逆变器电网阻抗检测技术综述[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 320-326.
- XIE S J, JI L, XU J M. Review of grid impedance estimation for grid-connected inverter [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 320-326.
- [12] 程卫健, 林顺富, 许亮峰, 等. 改进变系数回归在系统谐波阻抗估计中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(1): 34-40+48.
- CHENG W J, LIN S F, XU L F, et al. Application of improved variable coefficient regression in system harmonic impedance estimation [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(1): 34-40+48.
- [13] 王诗超, 沈沉, 李洋, 等. 基于波动量法的系统侧谐波阻抗幅值估计精度评价方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 145-149.
- WANG S C, SHEN C, LI Y, et al. A fluctuation quantity based method to evaluate estimation precision of harmonic impedance amplitude at system side [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 145-149.
- [14] 童立青, 钱照明, 邝乃兴, 等. 一种新型在线系统阻抗测量方法[J]. 电工技术学报, 2008, 1: 137-142.
- TONG L Q, QIAN Z M, KUANG N X, et al. A novel on-line measurement for system impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 1: 137-142.
- [15] 李晗, 赵建勇, 年珩, 等. 基于扰动谐波注入法的阻抗测量实验系统[J]. 电力电子技术, 2022, 56(7): 1-3.
- LI H, ZHAO J Y, NIAN H. et al. Impedance measurement experimental system based on perturbation harmonic injection [J]. Power Electronics, 2022, 56(7): 1-3.
- [16] 毛艳芳, 钟佩军, 孙建军, 等. 基于逆变电源的中低压配电网谐波阻抗测量研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 70-77.
- MAO Y F, ZHONG P J, SUN J J, et al. Research on harmonic impedance measurement of medium and low voltage distribution network based on inverter power supply [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 70-77.
- [17] 侯冰, 孙叶, 杨吉耀, 等. 基于最小二乘法和有源滤波器投切的高压侧谐波阻抗估计[J]. 电工技术, 2022, 1: 42-45.
- HOU B, SUN Y, YANG J Y, et al. High-voltage side harmonic impedance estimation based on least square method and active filter switching [J]. Electric Engineering, 2022, 1: 42-45.
- [18] 于永军, 许立国, 林子杰, 等. 基于级联H桥变流器的风电网宽频带谐波阻抗测量装置[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 73-83.
- YU Y J, XU L G, LIN Z J, et al. Wide-band harmonic impedance measurement device for wind power grid based on cascaded H-bridge converter [J]. Electric Power, 2022, 55(11): 73-83.
- [19] 吕洋, 徐政. 投切电容器时的电网谐波阻抗测量方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1780-1784.
- LV Y, XU Z. Network harmonic impedance measurement using capacitor switching [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1780-1784.
- [20] 魏琦. 谐波阻抗测试装置测控系统设计与开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- WEI Q. Design and development of measurement and control system for harmonic impedance testing device [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [21] 刘洋. 具有谐波控制功能的光伏逆变器控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- LIU Y. Research on photovoltaic inverter control with harmonic control function [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

收稿日期:2023-11-09

收到修改稿日期:2023-12-25

作者简介:

赵本强(1995-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制,15070028971@163.com;

* 通信作者:曾江(1972-),男,博士,副教授,研究方向为新能源并网技术、电能质量分析与控制及智能配电网,zengxy@scut.edu.cn。

New Technology of Grid Harmonic Impedance Measurement Based on Photovoltaic Inverter

ZHAO Benqiang^{1,2}, ZENG Jiang^{1,2*}, XIE Baoping^{1,2}, MA Haijie^{1,2},
LIU Pei^{1,2}, YE Kangquan^{1,2}

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Power Grid Intelligent Measurement and Advanced Metering
Enterprises, Guangzhou 510641, China)

Key words: photovoltaic inverter; virtual harmonic resistor; harmonic impedance measurement; least squares method

In response to the demand for harmonic impedance measurement in the context of new power systems, as well as the shortcomings of traditional harmonic impedance measurement methods that require disturbance to the power grid and the installation of additional impedance measurement equipment, a system harmonic impedance measurement method based on photovoltaic inverters is proposed.

Firstly, the three-level inverter is modelled and analyzed, and the mathematical model of the inverter in the $d-q$ rotating coordinate system is obtained. Then, the principle of virtual harmonic resistance is emphasized, which is to control the photovoltaic inverter to achieve normal power generation under the fundamental wave, and to control it as an equivalent virtual resistance under the harmonic wave. According to the voltage changes before and after the point of common coupling (PCC) is connected to the virtual harmonic resistor, it can be seen that the virtual harmonic resistor technology can effectively reduce the harmonic voltage at the PCC, achieve harmonic control effect, and have the advantage of being able to control non local harmonics compared to traditional active filters.

To achieve virtual harmonic resistance technology, harmonic detection technology is of utmost importance. This paper adopts a harmonic

positive and negative sequence component detection method based on fast Fourier transform. The collected voltage and current data are first transformed, and then the quantity on the stationary Cartesian coordinate system is fast Fourier transformed to obtain U_α and U_β . The real and imaginary parts are used to obtain the positive and negative sequence components in the $d-q$ coordinate system, and then the above DC components are controlled.

The harmonic impedance measurement method proposed in this paper measures the amplitude of the harmonic voltage at the at the grid connection point by varying the equivalent virtual harmonic resistance value of the inverter and combines it with the least squares method to estimate the harmonic impedance amplitude of the system. The impedance measurement experiment is conducted using the hardware-in-loop real-time simulation experimental platform, and the measurement results are consistent with the set values. The measurement accuracy of the 5th harmonic impedance of the system reaches 99%, and the measurement accuracy of the 7th harmonic impedance reaches over 97%. This verified that the proposed method can not only measure the amplitude of the system's multiple harmonic impedance, but also ensure high measurement accuracy.