

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.023

双谐波注入的弱电网阻抗在线检测方法

刘桂花, 马田源, 石桐, 王卫

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 弱电网的主要电气特性之一为高电网阻抗, 电网阻抗的增大会改变控制系统受控对象的模型阶数, 影响逆变器控制环路增益、带宽和控制性能, 对光伏逆变器并网电能质量和稳定运行带来不利影响. 为实现电网阻抗的在线检测以进一步优化逆变器控制策略, 以弱电网下单相光伏并网逆变器为研究对象, 在对其控制系统进行建模与分析基础上, 研究基于谐波电流注入的电网阻抗在线检测方法. 首先从理论上对单谐波电流注入法和双谐波电流注入法进行对比分析; 进而从仿真角度对两种方法在检测精度、逆变器并网电流 THD 值影响方面进行验证; 最后选定双谐波电流注入法作为主要研究方法, 该方法周期性地向电网注入两种不同频率的谐波, 利用检测元件获得并网点处的电压和电流信息, 经由傅里叶分析处理后可得电参量中所包含的特定次谐波分量, 进一步计算可得电网阻抗的实时值. 实验结果表明: 双谐波电流注入法可以实现对电网电阻和电感的准确辨识, 与传统单谐波注入法相比, 该方法不仅无需计算相角信息, 同时具有更高的检测精度.

关键词: 弱电网; 光伏并网逆变器; 双谐波注入法; 电网阻抗; 在线检测

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)09-0132-08

On linedetection of weak grid impedance with dual harmonic current injection

LIU Guihua, MA Tianyuan, SHI Tong, WANG Wei

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: One of the major electrical characteristics of weak grid is high grid impedance. The high grid impedance can change the order of control object, and influence control loop gain, bandwidth and control performance of PV inverter, which has negative impact on the grid power quality and stability of inverter system. On line impedance detection is beneficial to optimize the inverter control strategy. This paper focuses on the single-phase grid-connected PV inverter under weak grid, study on line impedance detection method with harmonic current injection on the basis of control system modeling and analysis. Firstly, comparing the operation principle of single harmonic injection method and the two harmonic injection method. Then, simulating these two methods in aspects of detection precision and THD value of the grid current. At last, choosing the two harmonic injection method as the major research method. This method injects two kinds of harmonic current with different frequency periodically, then detects the voltage and current of the common coupling point. Through FFT, the specific harmonic and the grid impedance can be calculated. Experimental results show that two harmonic injection method can achieve precise measurement of grid resistance and inductance. Compared with traditional single harmonics current injection method, the proposed method has higher testing accuracy and the phase angle is needless in calculation.

Keywords: weak grid; grid-connected PV inverter; dual harmonic current injection; grid impedance; on line detection

较大的电网阻抗作为弱电网特性之一, 不仅影响逆变器控制环路的增益和带宽, 也会与滤波器之间形成谐振, 引起并网系统的不稳定. 以德国为首的一些最早推广光伏发电技术的国家, 在其制定的

并网要求和标准中也指出实现电网阻抗在线检测的必要性^[1], 因此具备电网阻抗在线检测功能已成为未来光伏发电系统的一个必备条件. 目前, 测量法和估算法是实现电网阻抗在线检测的两种主要方法. 前者通过增加额外硬件设备实现, 优点是比较简单, 但是只能进行离线测量, 不适用于分布式发电系统. 后者直接利用并网逆变器已有的数字控制器来完成对电网阻抗的检测, 文献[2]对电网阻抗的检测技术进行了综述, 将电网阻抗的在线检测方法

收稿日期: 2015-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(51307033, 51477033)

作者简介: 刘桂花(1976—), 女, 博士, 副教授;

王卫(1963—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 刘桂花, liuguihua@hit.edu.cn

分为3类:主动法、被动法和准被动法.文献[3]也对阻抗检测进行了分类,分别为有源法和无源法.

对于光伏并网系统,无源法利用存在于逆变系统中的固有特性来检测电网阻抗^[4-6],方法简单,但是需要精确检测电网谐波含量,运算过程复杂,这在光伏并网系统中往往很难实现.有源法的基本原理是向电网中注入一个或者多个周期性或随机性的特定频率的“干扰”信号,对其响应进行信号处理^[7-10],计算出阻抗值.根据注入“干扰”信号的不同,有源法分为瞬态法^[7]和稳态法^[8].前者是检测系统电压、电流在注入瞬态干扰前后的变化从而判断阻抗变化,但由于对数据采集系统的要求极高,且增加系统成本,其应用受到限制.稳态法是通过对比扰动前后的电网稳态波形来计算电网阻抗值.与瞬态法相比,其具有低成本的优点.然而值得注意的是,有源法会向系统引入额外的扰动,使电网的电能质量下降.有源法中较常用的一种方法是谐波注入法.根据注入谐波的不同,分为高频和低频谐波注入法,特征和非特征谐波注入法,以及电压和电流谐波注入法.文献[11]提出了基于高频注入的电网阻抗检测方法,并通过实验验证了该方法的有效性,虽然这种方法降低了对基波的影响,但是,注入高频信号使得用户侧所引入的 C_g 干扰不容忽视,因此,文献[12]提出基于低频信号注入的阻抗检测方法.

谐波电流注入法是光伏并网系统中较常用的阻抗检测方法.该方法通过逆变器向电网中注入一个频率已知的、周期性的电流扰动,利用光伏系统中包含的检测元件测出并网点(PCC)的并网电压 U_g 和并网电流 I_g ,再经数字信号处理技术分析后,可得到电压、电流中包含的特定次谐波分量,继而利用公式计算出电网阻抗.该方法对电网的电能质量会有一些影响,但是只要扰动信号选取得当,可以将对电网的影响降低到允许的范围内^[13].

国内关于电网阻抗在线检测技术的研究较少,主要应用比较成熟的检测方法来实现^[14-15].而国外在该方面的研究较多,文献[16]对基于电流注入的阻抗检测方法进行了详细阐述,该方法原理简单,容易实现,是目前比较经典的一种方法;文献[17-18]提出更为简单的基于谐振的估算方法,但是该方法可能会影响系统的稳定性;文献[19]提出采用最小二乘法进行阻抗检测,该方法对系统的稳定性和网侧电能质量均无影响,但是算法复杂,计算量较大;另外,文献[20]提到采用PQ扰动法实现电网阻抗的在线检测,该方法可有效简化算法,但是使用时必须首先对系统的有功和无功进行解耦.

随着光伏发电技术的不断推广和应用,对于弱

电网条件下光伏并网发电技术的研究已经成为当前的一个热门研究方向^[21-23].针对弱电网高阻抗电气特性,如何进行准确检测是后续对其进行有效控制的前提,为此,本文首先介绍光伏并网控制器的双闭环控制结构,并根据并网电流控制内环的控制框图进行弱电网光伏并网逆变器控制系统的建模;通过分析该数学模型,探究弱电网下电网阻抗的增大对逆变器性能的影响;在此基础上,基于谐波电流注入法对电网阻抗进行在线检测,从理论分析、仿真和实验角度对单、双谐波电流注入法进行对比分析,以验证双谐波电流注入法在弱电网阻抗检测方面的优越性.

1 弱电网下光伏并网逆变器控制系统建模

本文所采用的光伏并网逆变器是两级式结构,前级DC/DC升压电路,后级全桥逆变电路,主要实现逆变和并网电流控制功能.图1所示为弱电网下光伏并网系统的控制结构框图,逆变器的控制结构采用典型的直流母线电压外环和电感电流内环的双环结构.外环电压控制器的输出作为内环电流的给定幅值,再由锁相环得到与电网电压频率和相位均一致的单位正弦信号,二者相乘后,得到电流参考信号 i_L^* ,经与电感电流反馈值 i_L 比较后,再经电流控制器输出,产生的PWM信号控制全桥开关管,从而达到高功率因数并网的目的.电网侧为一理想电压源与较大的电网阻抗 Z_g 串联,模拟弱电网高阻抗电气特性.

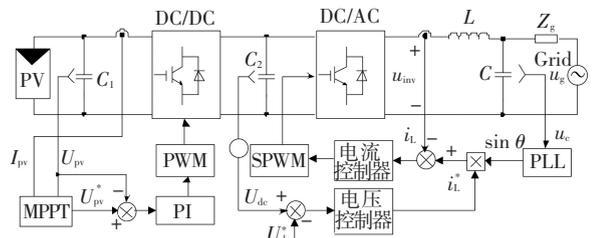


图1 弱电网下光伏并网控制系统结构

Fig.1 Control structure of grid-connected PV inverter in weak grid

并网电流内环的控制结构如图2所示, $G_i(s)$ 为电流控制器的传递函数,当开关频率远大于电网基波频率时,全桥的等效传递函数为 K_{PWM} ,为了更加准确的反映数字控制的特点,在控制环路中加入一个滞后环节 $G_h(s)$ ^[21],其表达式为

$$G_h(s) = e^{-1.5sT} \approx \frac{1}{1 + T_c s} \quad (1)$$

其中 T 为采样周期, $T_c = 1.5T$.

忽略电网电压的扰动,可以得到输出滤波电感电流 i_L 到逆变器输出电压 u_{mv} 的传递函数为

$$\frac{i_L(s)}{u_{inv}(s)} = \frac{L_g Cs^2 + R_g Cs + 1}{L_g LCs^3 + R_g LCs^2 + (L + L_g)s + R_g} \quad (2)$$

则电流控制内环的受控对象模型为

$$G_o(s) = \frac{K_{PWM}(L_g Cs^2 + R_g Cs + 1)}{L_g LCs^3 + R_g LCs^2 + (L + L_g)s + R_g} \quad (3)$$

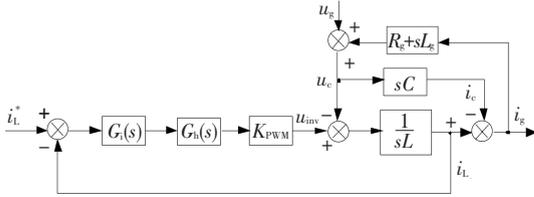


图 2 并网电流内环的控制框图

Fig.2 Control structure of current inner-loop

由式(2)可知,在强电网情况下,电网阻抗值很小,逆变器输出电流控制回路的受控对象可等效为一阶模型;但在弱电网情况下,电网阻抗值较大, L_g 和 R_g 不可忽略,此时的受控对象变为三阶模型. 光伏并网逆变器控制系统大多是在强电网情况下设计的,弱电网下,并网发电系统的受控对象会发生变化,这将意味着在强电网条件下设计的控制器可能不再适用于弱电网. 电网阻抗对逆变器控制环路增益和带宽的影响,会使系统控制性能变差,因此,实现电网阻抗的在线检测不仅能实时获得电网的状态,还有助于逆变器控制策略的进一步优化.

2 基于谐波电流注入的弱电网阻抗在线检测方法

下面采用谐波电流注入法对电网阻抗进行在线检测. 该方法通过逆变器向电网中周期性地注入频率已知的扰动电流,然后利用检测元件获得并网点(PCC)处的电压和电流,将测量结果经傅里叶分析(DFT/FFT)方式处理后,即可获取电参量中所包含的特定次谐波分量,进而计算出电网阻抗的实时值. 图 3 所示为基于谐波电流注入的电网阻抗在线检测原理结构图,其中 h 为注入谐波频率相对于基波频率的倍数.

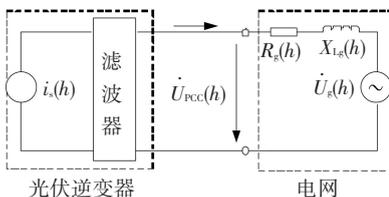


图 3 基于谐波电流注入的电网阻抗在线检测原理结构

Fig.3 Principle construction diagram of grid impedance on line detection based on harmonic current injection

为避免电网背景谐波对检测结果的影响,选取的扰动信号频率为高频偶次谐波;同时在实验过程中,结合频率特性分析仪对电网背景谐波进行检测,选择背景谐波较小的谐波进行注入. 基于此,在后面进行谐波电流注入法的阻抗计算过程中,忽略图 3 中的背景谐波 $\dot{U}_g(h)$.

根据注入谐波次数的不同,谐波注入法又可以分为单谐波注入法和双谐波注入法,由于原理基本相似,接下来将主要分析这两种方法的区别所在.

2.1 单谐波电流注入法

单谐波电流注入法只向电网中注入单一频率的谐波电流,结合图 3,所注入的谐波电流、响应电压与电网阻抗之间关系式为

$$z(h) = \frac{\dot{U}_{PCC}(h)}{I_{PCC}(h)} \quad (4)$$

$$z(h) = \frac{U_{PCC}(h) e^{j\varphi_v}}{I_{PCC}(h) e^{j\varphi_i}} = Z(h) e^{j\varphi_z} \quad (5)$$

$$z(h) = R_g(h) + j\omega_h L_g(h) \quad (6)$$

考虑到不同频率下的电阻和电感值会有所差异,但是差异不明显,不会造成较大的估算误差,因此本文忽略这个问题,假设电阻和电感都是理想的.

由式(4)~(6)可知,要估算出电网阻抗中的阻性和感性成分,需要同时获取并网点电压、电流在所注入频率处的幅值和相角信息. 实际情况中,定点数字信号处理芯片本身存在的精度以及弱电网中存在的干扰等问题,给相位角的辨识带来很大困难,同时也会影响估算结果的精度.

2.2 双谐波电流注入法

双谐波注入法即向电网中注入两种频率的扰动电流. 由于阻抗模值可以通过下式得到,即

$$Z(h) = \frac{U_{PCC}(h)}{I_{PCC}(h)} \quad (7)$$

同时,电网阻抗模值与电阻和电感之间关系为

$$\begin{cases} Z(h_1)^2 = R_g^2 + \omega_1^2 \cdot L_g^2, \\ Z(h_2)^2 = R_g^2 + \omega_2^2 \cdot L_g^2. \end{cases} \quad (8)$$

故可以得到电网电阻和电感的计算公式分别为

$$L_g = \sqrt{\frac{Z(h_1)^2 - Z(h_2)^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}} \quad (9)$$

$$R_g = \sqrt{\frac{\omega_1^2 Z(h_2)^2 - \omega_2^2 Z(h_1)^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}} \quad (10)$$

由式(9)、(10)可知,与单谐波电流扰动注入法相比,该方法在阻抗估算的过程中,只需获取并网点电压电流在两种特定频率处的幅值信息,不需要其相位信息,这样可以大大减小运算的复杂程度;但该方法

法也存在一定的难点,即在两种频率的选取方面:若两种频率相差较大,较高的频率将会受到系统谐振频率的影响,为此,本文在选择谐振频率时结合逆变器系统的开环传递函数,分析电网等效电感 L_g 和等效电阻 R_g 在可能变化区间内的频率特性,确定谐振频率可能出现的区间范围,避开该区间选择谐波频率。此外,若两种频率比较接近,会使得数字信号处理器,特别是定点 DSP 面临数值计算难题,因此在实际设计过程中,需折中考虑。

3 仿真与分析

基于以上原理,对弱电网下的单相光伏并网逆变器控制系统进行仿真。图 4 所示为基于谐波电流注入法的光伏并网逆变器控制结构图,单谐波电流注入和双谐波电流注入均在图中的扰动电流位置注入谐波,只是在谐波次数上有所差异。

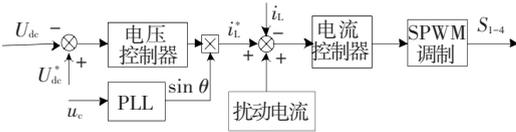


图 4 基于谐波电流注入法的光伏并网逆变器控制结构
Fig.4 Control structure of grid-connected PV inverter based on harmonic current injection

3.1 单谐波电流注入法仿真结果

选取扰动电流的频率为 600 Hz,为避免由不间断注入的扰动电流导致的电能质量问题,本文选择间歇性注入扰动信号。而两次扰动注入时间间隔不仅会影响并网电压、电流的 THD 值,还会影响电网阻抗的估算精度。本文选择每 13 个电网周期中,持续注入两个工频周期的扰动电流。另外,扰动信号的幅值也需要折中选取,较大的幅值可提高频谱分析的精度,但是同时使电网中的谐波含量增加,影响电能质量;太小的幅值又会增加信号检测及分析的难度。考虑到以上因素,本文选取的扰动电流幅值为并网电流的 10%左右。由于电网中本身含有的 12 次谐波分量基本可以忽略,因此可认为背景谐波对检测的结果无影响。采用单谐波电流注入法时,并网电流、扰动电流的仿真波形如图 5 所示。扰动注入前后并网电流的 FFT 结果如图 6 所示。由图 5 可知,在扰动电流注入期间,并网电流发生了一定的畸变,结合图 6 可知,扰动电流注入之前,并网电流中的 600 Hz 谐波分量基本为零,扰动注入之后,该频率下的谐波分量明显增加,其 THD 由 3.89% 增大到 4.20%,符合并网标准要求(THD<5%)。

图 7、8 分别为基于单谐波电流注入法获得的电网电阻和电感的估算值,通过计算,可以得到采用单谐波电流注入法时,电网电阻的估算误差约为 1.51%,电网电感的估算误差约为 12.11%。

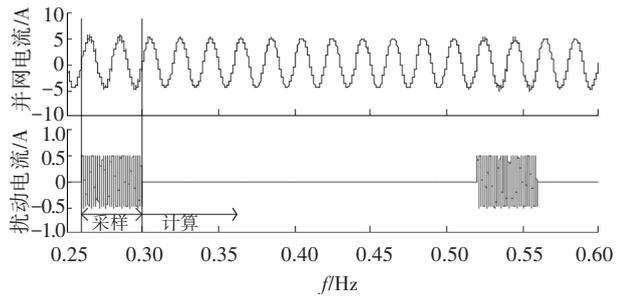
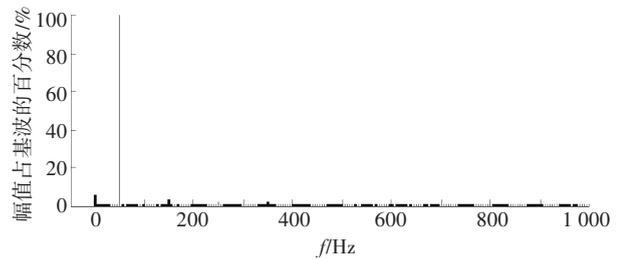
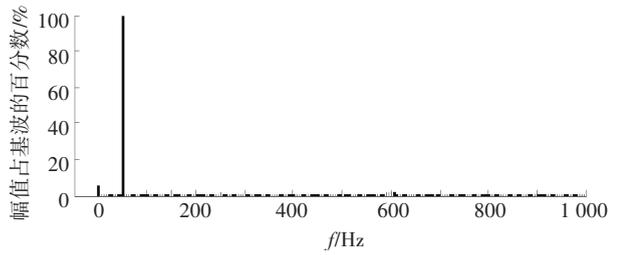


图 5 单谐波电流注入法的并网电流、扰动电流仿真波形
Fig.5 Simulation waveforms of grid-connected current and disturbance current with single harmonic current injection method



(a) 扰动注入前的并网电流 FFT 结果



(b) 扰动注入后的并网电流 FFT 结果

图 6 单谐波电流扰动注入前后并网电流的 FFT 结果

Fig.6 The FFT results of grid-connected current without and with single harmonic current disturbance injection

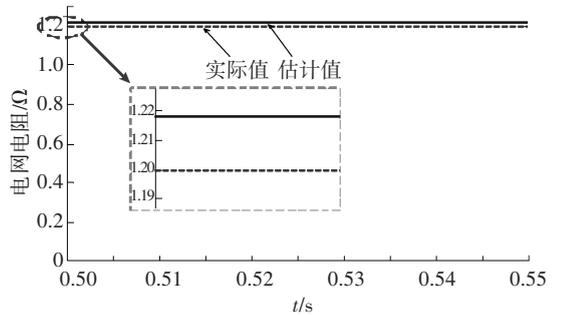


图 7 基于单谐波电流注入法的电网电阻估算结果

Fig.7 Estimation results of grid resistance with single harmonic current injection method

3.2 双谐波电流注入法仿真结果

与单谐波电流注入法不同,双谐波电流注入法的扰动电流中包含两种频率的谐波,本文选取 400、600 Hz 的谐波扰动电流。扰动注入前后的并网电流 FFT 结果如图 9 所示,从仿真结果中可以看出,扰动注入之后,并网电流中 400、600 Hz 对应的谐波含量明显增加,其 THD 值由 3.89% 增大到 4.5%,但是符合并网标准要求(THD<5%)。

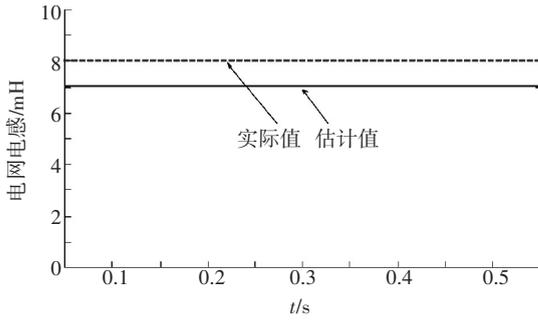


图 8 基于单谐波电流注入法的电网电感估算结果

Fig. 8 Estimation results of grid inductance with single harmonic current injection method

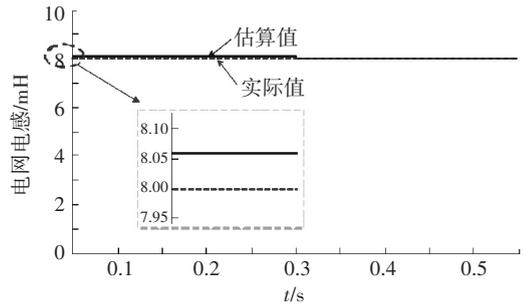
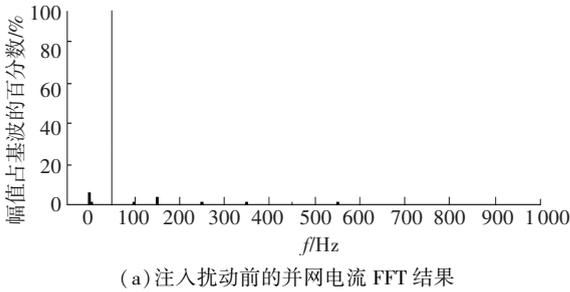
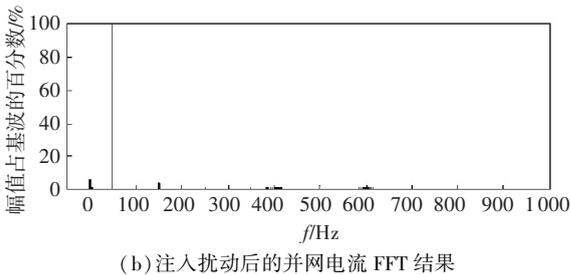


图 11 基于双谐波电流注入法的电感阻抗估算结果

Fig. 11 Estimation results of grid inductance with double harmonic current injection method



(a) 注入扰动前的并网电流 FFT 结果



(b) 注入扰动后的并网电流 FFT 结果

图 9 双谐波电流扰动注入前后并网电流的 FFT 结果

Fig. 9 The FFT results of grid-connected current without and with double harmonic current disturbance injection

基于双谐波电流注入法的电网电阻和电感在线估算结果分别如图 10、11 所示。由图 10、11 可知,估算出的电网电阻和电感值均与实际值较为接近。进一步计算可得:采用双谐波电流注入法时,电网电阻的估算误差约为 0.11%,电网电感的估算误差约为 0.75%。与单谐波电流注入法相比,电网电阻和电感的估算误差均有很大程度的减小。后续将结合具体实验平台验证双谐波电流注入法实现弱电网阻抗在线检测的实用性。

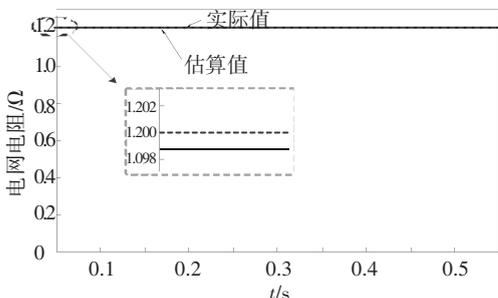


图 10 基于双谐波电流注入法的电网电阻估算结果

Fig. 10 Estimation results of grid resistance with double harmonic current injection method

4 实验结果

为了验证以上方法的正确性,搭建弱电网下光伏并网系统硬件平台,并进行阻抗在线检测实验。由于前面仿真分析中已对两种谐波电流注入法进行了对比分析,论证了双谐波电流注入法在电网阻抗检测中的优越性,以下将重点论证双谐波电流注入法的实验效果。利用阻抗网络箱与实验室正常电网串联模拟弱电网环境,并选取了两组电网阻抗参数进行实验验证。第 1 组参数: $R_g = 5.1 \Omega$, $L_g = 15 \text{ mH}$; 第 2 组参数: $R_g = 10.2 \Omega$, $L_g = 8 \text{ mH}$ 。

为使检测的阻抗值与实际值相等并达到较高的精度,在实验过程中需要注意的是:1) 为避免隔离变压器和电网自身的阻抗对检测过程的影响,需检测未串入阻抗时的电网背景阻抗,取多次结果的均值为基准值;2) 电网电压在不同时刻会在特定频率下有幅值上的波动,需要首先去除一些阻抗检测无效值,继而多次求和并进行平均。图 12 为基于双谐波电流注入的电网阻抗在线检测的程序流程图。

根据图 12,谐波电流间歇性地注入到电网中,首先判断是否到达扰动注入时刻,若判断为扰动注入开始时刻,则通过逆变器同时向电网中注入 400 Hz 和 600 Hz 的谐波电流,与此同时,采样并网电压和并网电流,否则的话,程序就在 While 里等待其他中断程序。当采样点数达到规定采样点个数时,停止注入扰动,开始调用 FFT 子程序和阻抗计算子程序,将本次的电网电阻和电感估算结果分别存放。最后,对一段时间内的阻抗检测结果进行处理。

将检测结果存放于长度为 20 的数组中,即取相邻 20 次的检测数据作为一组。得到图 13 第 1 组电网阻抗在线检测实验结果,图 13(a)、13(b) 分别为 600、400 Hz 谐波频率处计算得到的电网阻抗模值,图 13(c)、13(d) 分别为电网电阻、电感的估算值,实验估算值分别为 5.1Ω 和 15.9 mH ,与实际参数比

较接近,证明该阻抗检测方法具有较高的检测精度.

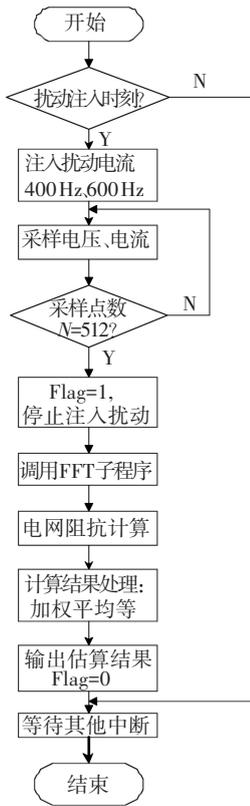


图 12 基于双谐波电流注入的电网阻抗在线检测的程序流程

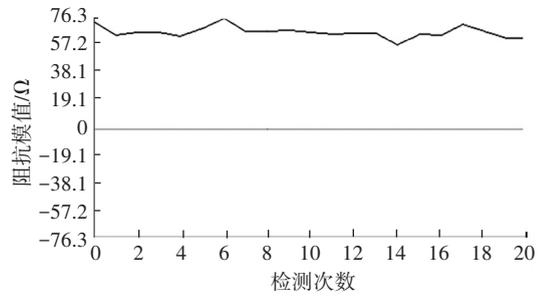
Fig.12 Program flow chart of grid impedance on line detection with double harmonic current injection method

利用类似的实验方法,获得第 2 组阻抗在线检测的实验结果,如图 14 所示,图 14(a)、14(b)分别为 600、400 Hz 谐波频率处计算得到的电网阻抗模值,图 14(c)、14(d)分别为电网电阻和电感的估算值,实验估算值分别为 10.15Ω 和 8.4 mH ,与实际参数比较接近,进一步验证了所用阻抗检测方法的有效性.

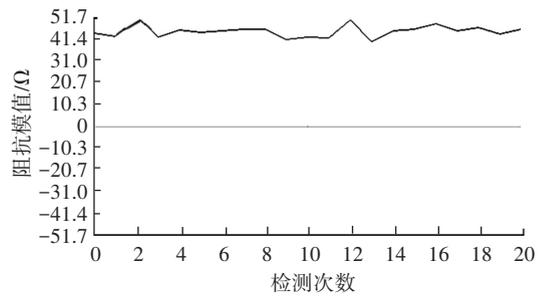
图 13、14 中所标注的直线为 20 次检测结果的均值. 由图可知,检测结果与给定值十分相近. 由于电网电压的波动和采样噪声等影响,每次检测到的结果各有不同,因此,需要对多次检测结果进行加权平均,得到一个平均值,作为后续进一步控制的参数依据.

对于阻抗检测误差主要来自两个方面:1) 为便于分析和计算,基于谐波注入的阻抗计算过程中忽略了电网背景谐波,但实际上不同时刻的电网谐波会发生实时变化,从而会对检测精度产生影响;2) 由采样精度导致的傅里叶分析误差,在本实验平台中,本文采用 DSP 自带的 ADC 转换模块进行采样处理,在实际使用中 ADC 的转换结果存在误差,进而导致傅里叶分析结果出现误差. 尽管电网阻抗估算过程中存在误差,但由于检测误差不大,满足工程需要,因此该方法依然具有较好的应用价值.

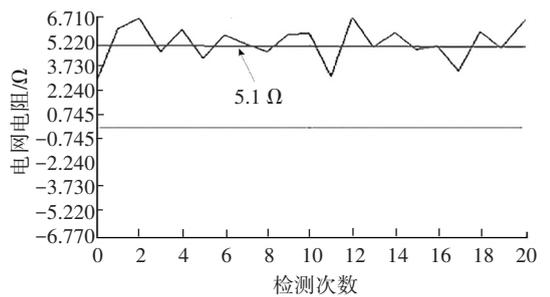
图 15 所示为扰动注入前后的并网电压、电流实验波形,由图可知,在扰动注入期间,电网电流中的谐波含量有所增加,但由于每 13 个电网工频周期扰动一次,因此对整体并网电流 THD 值影响不大.



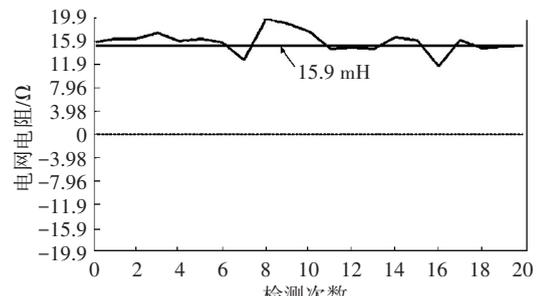
(a) 600 Hz 阻抗模值



(b) 400 Hz 阻抗模值



(c) 电网电阻估算值



(d) 电网电感估算值

图 13 第 1 组电网阻抗在线检测实验结果

Fig.13 The on line detection results with first grid impedance value

5 结 论

1)对弱电网下光伏并网逆变器控制系统进行建模分析,得出:弱电网情况下电网阻抗值较大,受控对象由强电网时的一阶模型变为三阶模型,电网阻抗的变化影响逆变器控制环路增益、带宽和控制性能。

2)从理论和仿真角度对单谐波电流注入法和双谐波电流注入法进行了对比分析,证明双谐波电流注入法无需计算相角信息,具有更高的检测精度,且并网电流 THD 值更低。

3)选取两组电网阻抗参数进行实验验证,实验结果表明双谐波阻抗检测方法可以实现对电网电阻、电感准确检测,扰动电流信号对整体并网电流 THD 值影响不大,双谐波注入法是弱电网阻抗检测的一种有效方式。

参考文献

[1] COBRECES S, BUENO E J, PIZARRO D, et al. Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(9): 3112-3121.

[2] 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 Shaojun, JI Lin, XU Jiming. Review of grid impedance estimation for grid-connected inverter [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 320-326.

[3] ASIMINOAEI L, TEODORESCU R, BLAABJERG F, et al. A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6): 1480-1490.

[4] GU Heron, GUO Xiaoqiang, WANG Deyu, et al. Real-time grid impedance estimation technique for grid-connected power converters [C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Hangzhou; IEEE Press, 2012: 1621-1626.

[5] HOFFMANN N, FUCHS F W. Minimal invasive equivalent grid impedance estimation in inductive-resistive power networks using extended kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 631-641.

[6] CIOBOTARU M, AGELEDIS V, TEODORESCU R. Line impedance estimation using model based identification technique [C]//Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham; IEEE Press, 2011: 1-9.

[7] CESPEDES M, SUN J. Online grid impedance identification for adaptive control of grid-connected inverters[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Raleigh; IEEE Press, 2012: 914-921.

[8] 吴学智, 梁建钢, 童亦斌, 等. 基于复数滤波器和非特征次谐波注入的电网阻抗估算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2796-2801.

WU Xuezhi, LIANG Jiangang, TONG Yibin, et al. Research on method of grid impedance estimation by complex filters based initiative harmonic injection[J]. Power System Technology, 2013, 37

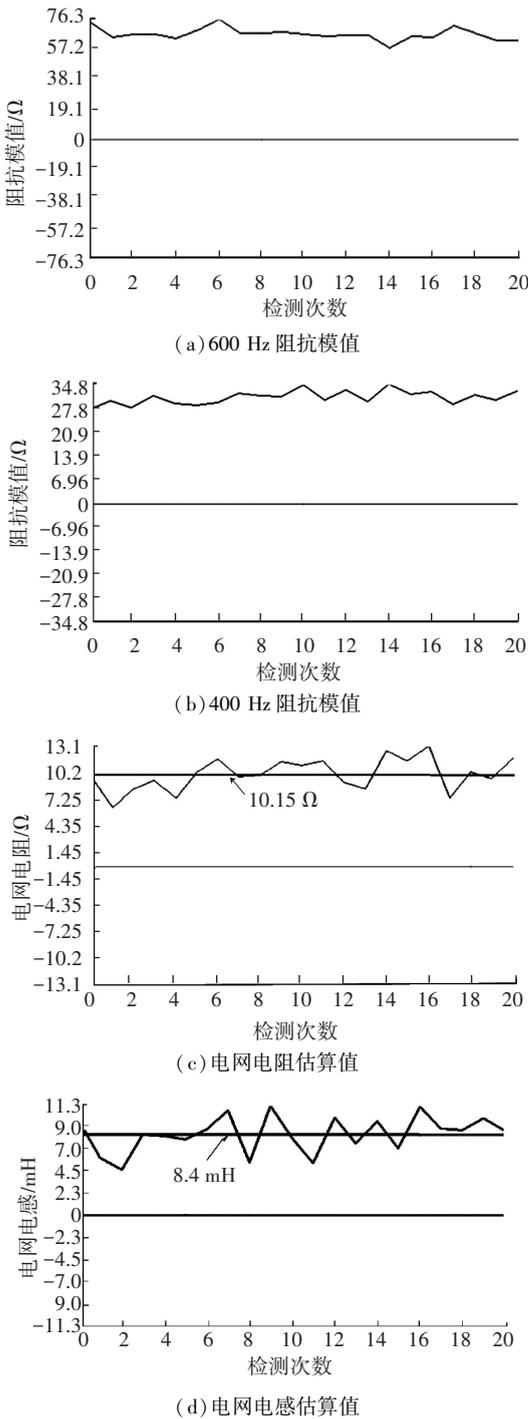


图 14 第 2 组电网阻抗在线检测实验结果

Fig.14 The on line detection results with second grid impedance value

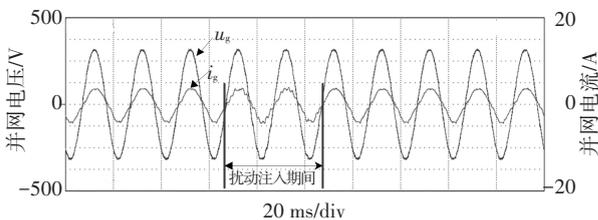


图 15 扰动注入前后的并网电压、电流波形

Fig.15 The voltage and current waveforms without and with double current disturbance injection

- (10): 2796-2801.
- [9] ROINILA T, VILKKO M, SUN J. Broadband methods for online grid impedance measurement[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver; IEEE Press, 2013: 3003-3010.
- [10] ISHIGURE N, MATSUI K, UEDA F. Development of an on-line impedance meter to measure the impedance of a distribution line [C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Pusan; IEEE Press, 2001: 549-554.
- [11] 汤婷婷, 张兴, 谢东, 等. 基于高频注入阻抗检测的孤岛检测研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(3): 70-72.
TANG Tingting, ZHANG Xing, XIE Dong, et al. Islanding Detection Method Based on Impedance Detection Using High Frequency Signal Injection[J]. Power Electronics, 2013, 47(3): 70-72.
- [12] TIMBUS A V, TEODORESCU R, BLAABJERG F, et al. ENS detection algorithm and its implementation for PV inverters[J]. Proceedings of IEEE Electric Power Applications, 2006, 153(2): 206-212.
- [13] ASIMINOAEI L, TEODORESCU R, BLAABJERG F, et al. Implementation and test of an online embedded grid impedance estimation technique for PV inverters[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2005, 52(4): 1136-1143.
- [14] 李军, 黄学良, 陈小虎, 等. 基于分压器原理的孤岛检测技术在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 15-21.
LI Jun, HUANG Xueliang, CHEN Xiaohu, et al. Islanding detection method based on voltage divider for microgrid[J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(34): 15-21.
- [15] 蔡文, 刘银, 段善旭, 等. 三相不对称条件下的电网阻抗检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 37-42.
CAI Wen, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. A grid impedance detection method under unbalanced three-phase conditions[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(18): 37-42.
- [16] ASIMINOAEI L, TEODORESCU R, BLAABJERG F, et al. A new method of on-line grid impedance estimation for PV inverters[C]// IEEE 19th Applied Power Electronics Conference and Exposition. Aachen; IEEE Press, 2004: 1527-1533.
- [17] LISERRE M, BLAABJERG F, TEODORESCU R. Grid impedance estimation via excitation of LCL-filter resonance[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(5): 1401-1407.
- [18] GHZAIEL W, GHORBAL M J B, ILHEM S B, et al. A novel grid impedance estimation technique based on adaptive virtual resistance control loop applied to distributed generation inverters[C]// Proceedings of the 15th European Conference on Power Electronics and Applications. Lille; IEEE Press, 2013: 1-10.
- [19] COBRECES S, BUENO E J, PIZARRO D, et al. Grid monitoring system for distributed power generation electronic interfaces[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(9): 3112-3121.
- [20] MIHAI C, REMUS T, PEDRO R, et al. Online grid impedance estimation for single-phase grid-connected systems using PQ variations [C]// IEEE Power Electronics Specialists Conference. Orlando; IEEE Press, 2007: 2306-2312.
- [21] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对LCL型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.
- [22] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高LCL型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2327-2335.
YANG Dongxu, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(15): 2327-2335.
- [23] 许津铭, 谢少军, 唐婷. 弱电网下LCL滤波并网逆变器自适应电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4031-4039.
XU Jinming, XIE Shaojun, TANG Ting. Adaptive current control for grid-connected LCL-filtered inverters in weak grid case [J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(24): 4031-4039.

(编辑 魏希柱)