

文章编号:0254-0096(2018)12-3413-08

# 非理想电网下并网逆变器直流分量检测及抑制方法

张奔奔, 胥芳, 艾青林, 吴乐彬

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310014)

**摘要:** 为抑制非理想电网条件下光伏并网发电系统中并网逆变器的并网电流直流分量,提出一种基于直流侧母线电压纹波分析的间接检测及补偿方法。首先建立并网逆变器数学模型,分析并网电流直流分量产生机理;然后研究并网电流与母线纹波电压的关系,得出在非理想电网条件下,并网电流直流分量可等效为母线纹波电压的奇倍频纹波分量的结论;通过分段积分一个电网周期的母线电压求得并网电流直流分量解析式,以该式为反馈量加入系统控制环节可有效抑制并网电流直流分量的产生。最后通过仿真和实验验证所提方法的可靠性。

**关键词:** 并网逆变器; 直流母线电压纹波; 直流抑制; 非理想电网

**中图分类号:** TM42

**文献标识码:** A

## 0 引言

并网逆变器作为光伏并网发电系统的核心部件,其性能的优劣直接影响到整个光伏系统的性能。早期的并网逆变器为实现与配电网之间的电气隔离,通常在输出侧串联工频隔离变压器,这使得并网逆变体积大、成本高、质量重、整机效率低。近年来,为提高并网逆变器的功率密度及整机效率,人们越来越青睐于采用无隔离变压器的拓扑结构。由于无输出隔离变压器的并网逆变器与电网之间不存在电气隔离,不可避免地使逆变器产生的直流分量注入电网,过多的直流分量注入会造成配电网变压器饱和、变电所接地网腐蚀等危害<sup>[1]</sup>。为此世界各国和组织制定了直流注入的相关标准,其中 IEEE-929 规定直流分量必须小于输出电流的 0.5%<sup>[2]</sup>。

目前可抑制直流分量注入的方法主要分为以下几类<sup>[3-17]</sup>:采用可抑制直流分量的拓扑<sup>[3-6]</sup>、电容隔直法<sup>[7,8]</sup>和检测补偿法<sup>[9-17]</sup>。文献[3-6]采用半桥拓扑结构使逆变器并网电流始终经过电容,从而避免

直流电流注入电网,由于输入侧电压相对于全桥拓扑增加了一倍,存在开关器件电压应力变大、开关动作变慢、损耗增大的缺点。文献[7]在逆变器输出侧与电网之间串联隔直电容,该方法虽可有效抑制直流分量,但所需电容容值大;针对隔直电容存在的问题,文献[8]提出基于虚拟电容的直流抑制方法。检测补偿法将所测量出的并网电流直流分量经过适当控制算法后补偿并网电流参考值或控制输出值来抑制直流分量产生。由于并网电流中的直流分量相对于交流分量非常小,如何准确测量直流分量是此类方法的关键<sup>[2]</sup>。文献[9-13]通过搭建额外的硬件电路直接或间接检测并网电流的直流分量,增加了系统成本和体积;文献[14]通过积分检测法对并网电流输出侧直流分量进行检测,但当并网电流与电压基频不一致时,需采用多次积分的方法,增加了计算难度,影响动态响应速度;文献[15]通过线性光耦采样并网电流,并通过重复控制抑制并网电流直流分量;文献[16,17]通过采样母线电容电压,分析母线电容电压的纹波组成间接提取并网电流的直流分量,该方法无需额

收稿日期: 2016-08-22

基金项目: 浙江省重点研发计划(2018C01081); 国家国际科技合作专项(2014DFE60020); 国家自然科学基金(51275470); 浙江省教育厅重点项目(Z201121137)

通信作者: 胥芳(1964—), 女, 博士、教授、博士生导师, 主要从事分布式能源并网发电技术及微网方面的研究。fangx@zjut.edu.cn

外的硬件电路及高精度的电流传感器,具有很好的实用性跟可靠性。但已有研究均在理想电网条件下进行分析,基于此,本文研究在非理想电网条件下并网电流与直流母线电压之间的关系,得出并网电流直流分量可等效为母线纹波电压的奇倍频纹波分量的结论。通过分段积分一个工频周期的母线电压后解析获得直流分量定量描述关系,以该解析值作为反馈量,经PI调节后实时在线补偿并网参考电流,从而有效抑制并网电流直流分量的产生。最后通过仿真和实验验证该方法的有效性。

## 1 直流分量产生机理

图1为输出串联LCL滤波器的典型单相光伏并网逆变器拓扑结构,由前级Boost电路和后级全桥逆变电路组成,这里假设太阳能电池以最大功率输出,母线电压稳定在380V。其中, $u_{dc}$ 为母线电压; $u_{ab}$ 逆变器侧a、b点的输出电压; $u_c$ 为滤波电容电压; $u_g$ 为电网电压; $i_l$ 为逆变侧电感电流; $i_g$ 为并网电流; $i_c$ 为电容电流; $L_B$ 为升压电路电感, $L_1$ 为逆变侧电感, $L_2$ 为并网侧电感; $R_L$ 、 $R_g$ 分别逆变电感和并网电感线路中的寄生电阻,由于阻值较小,这里忽略其影响。

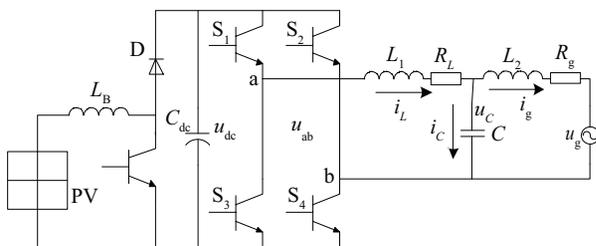


图1 LCL型光伏并网逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topology of LCL PV grid-connected inverter

选择逆变侧电感电流 $i_l$ 、电容电压 $u_c$ 、并网电流 $i_g$ 为状态变量,列写状态方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} u_{ab} = L_1 \frac{di_l}{dt} + u_c \\ C \frac{du_c}{dt} = i_l - i_g \\ u_c = L_2 \frac{di_g}{dt} + u_g \end{cases} \quad (1)$$

将逆变侧输出电压 $u_{ab}$ 和电网电压 $u_g$ 作为输入变量,并网电流 $i_g$ 作为输出变量,得并网逆变器状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{i}_l \\ \dot{u}_c \\ \dot{i}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_l \\ u_c \\ i_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_g \end{bmatrix} \\ y = [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_l \\ u_c \\ i_g \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $y$ ——并网电流。

进一步可推导出并网电流 $i_g$ 与输入变量的传递函数关系式为:

$$i_g(s) = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s} [u_{ab}(s) - (L_1 C s^2 + 1) u_g(s)] \quad (3)$$

由式(3)得,并网电流的直流分量由逆变器全桥输出端电压和电网电压共同决定,当并网电流能理想跟踪参考电流时,逆变器输出电压与并网参考电流成比例关系,所以光伏并网逆变器的并网电流直流分量可等效为由并网参考电流与电网电压决定。若能消除并网参考电流与电网电压中的直流分量,即可有效抑制实际并网电流中直流分量的产生。

## 2 基于直流母线间接检测控制策略

### 2.1 基于直流母线的直流分量间接检测方法

文献[9,10]对理想条件下的并网电流与直流母线电压的关系进行分析,即当电网为理想电网、并网电流与电网电压同频同相,且功率因数为1时,并网电流的直流分量可等效为直流母线电压的工频纹波。而在实际系统中,电网由基波及其背景谐波组成,本文将进一步分析在非理想电网条件下并网电流与母线电压的关系。当电网三相平衡或者单相应用时,电网只含奇次谐波,记为:

$$u_g(t) = \sum_{m=1,3,5,\dots} U_m \sin 2\pi m f t \quad (4)$$

式中, $m$ ——电网所含谐波次数,当 $m=1$ 时即为电网基波; $U_m$ ——各次电网谐波的电压峰值,这里假设电网频率为 $f=50$ Hz且保持不变。

实际并网电流也含有奇次谐波,记并网电流为:

$$\begin{aligned} i_g(t) &= i_{dc}(t) + i_{ac}(t) \\ &= I_{dc} + \sum_{n=1,3,5,\dots} I_n \sin(2\pi n f t + \theta_n) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $i_{dc}(t)$ ——并网电流的直流分量,在一个周期

内可认为是常数  $i_{dc}$ ;  $i_{ac}(t)$  —— 并网电流的交流分量;  $n$  —— 并网电流所含谐波次数, 当  $n=1$  时为基波电流;  $I_n$  —— 各次电流谐波的电流峰值;  $\theta_n$  —— 并网电流相对于电网电压的相移。

$$p_{inv}(t) = u_g(t) \times i_g(t) = p_{ac}(t) + p_{dc}(t) = \sum_{m=1,3,5,\dots} U_m \sin 2\pi m f t \times \left( \sum_{n=1,3,5,\dots} I_n \sin(2\pi n f t + \theta_n) + I_{dc} \right) \quad (6)$$

$$= \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{U_m I_n}{2} \{ \cos[2\pi f(n-m)t + \theta_n] - \cos[2\pi f(n+m)t + \theta_n] \} + I_{dc} \sum_{m=1,3,5,\dots} U_m \sin 2\pi m f t$$

$$p_{ac}(t) = \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{U_m I_n}{2} \{ \cos[2\pi f(n-m)t + \theta_n] - \cos[2\pi f(n+m)t + \theta_n] \} \quad (7)$$

$$p_{dc}(t) = \sum_{m=1,3,5,\dots} U_m i_{dc}(t) \sin 2\pi m f t \quad (8)$$

$$p_{ac}(t) = \sum_{m=n=1,3,5,\dots} \frac{U_m I_n}{2} \cos \theta_n - \sum_{m=n=1,3,5,\dots} \frac{U_m I_n}{2} \cos[2\pi f(n+m)t + \theta_n] + \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{U_m I_n}{2} \{ \cos[2\pi f(n-m)t + \theta_n] - \cos[2\pi f(n+m)t + \theta_n] \} \quad (9)$$

$p_{ac}(t)$  中的第 1 项即为逆变器输出功率的常数值, 其余为输出功率交流分量的脉动功率, 进一步简化可得输出功率交流分量的脉动功率的一般表达式为:

$$p_{ac-p}(t) = \sum_{k=2,4,6,\dots} \frac{1}{2} P_i \cos(2\pi f k t \pm \theta_n) \quad (10)$$

式中,  $P_i$  —— 各次谐波加减所得的系数。

联立式(8)和式(10)可得稳定时逆变器输出功率的脉动功率为:

$$p_r(t) = \sum_{k=2,4,6,\dots} \frac{1}{2} P_i \cos(2\pi f k t \pm \theta_n) + \sum_{m=1,3,5,\dots} U_m I_{dc} \sin 2\pi m f t \quad (11)$$

假设该脉动功率完全由母线电容吸收, 设母线电容为  $C_{dc}$ , 母线电压为  $U_{dc}$ , 纹波电压为  $u_r$ , 则:

$$p_r(t) = C_{dc} U_{dc} \frac{du_r}{dt} \quad (12)$$

将式(12)积分可得:

$$u_r(t) = \sum_{k=2,4,6,\dots} \frac{P_i \sin(2\pi f k t \pm \theta_n)}{4\pi f k C_{dc} U_{dc}} - \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{U_m I_{dc} \cos 2\pi m f t}{2\pi m f C_{dc} U_{dc}} = u_{ra}(t) - u_{rd}(t) \quad (13)$$

其中,

$$u_{ra}(t) = \sum_{k=2,4,6,\dots} \frac{P_i \sin(2\pi f k t \pm \theta_n)}{4\pi f k C_{dc} U_{dc}} \quad (14)$$

$$u_{rd}(t) = \frac{I_{dc}}{2\pi f C_{dc} U_{dc}} \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{U_m \cos 2\pi m f t}{m} \quad (15)$$

式(14)为并网电流直流分量在母线电容侧引起的奇倍频纹波电压, 两者为线性比例关系, 式(15)为

此时并网逆变器输出的瞬时功率为式(6), 设  $p_{ac}(t)$  为并网电流交流分量的瞬时功率,  $p_{dc}(t)$  为并网电流直流分量的瞬时功率, 即式(7)。同时, 式(7)可表示为式(8)。

并网电流交流分量在母线电容侧引起的偶倍频纹波电压, 可见并网电流的相移  $\theta_n$  只对母线电压的偶倍频纹波产生影响。若能消除直流纹波电压中的偶倍频分量, 提取奇倍频分量, 即可间接求出并网电流直流分量的值。直流侧奇倍频纹波, 偶倍频纹波与并网电流的相位关系如图 2 所示。由式(14)和式(15)结合图 2 不难发现, 分别在  $0 \sim T/4$ 、 $T/4 \sim T/2$ 、 $T/2 \sim 3T/4$  和  $T/4 \sim 3T/4$  周期对  $u_r(t)$  进行积分, 则有:

$$\left\{ \begin{aligned} \int_0^{t_0+T/4} u_r(t) dt &= \frac{U_1 I_{dc}}{4\pi^2 f^2 C_{dc} U_{dc}} \\ \int_{t_0+T/4}^{t_0+T/2} u_r(t) dt &= -\frac{U_1 I_{dc}}{4\pi^2 f^2 C_{dc} U_{dc}} \\ \int_{t_0+T/2}^{t_0+3T/4} u_r(t) dt &= -\frac{U_1 I_{dc}}{4\pi^2 f^2 C_{dc} U_{dc}} \\ \int_{t_0+3T/4}^{t_0+T} u_r(t) dt &= \frac{U_1 I_{dc}}{4\pi^2 f^2 C_{dc} U_{dc}} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

从式(16)可见, 在各个  $1/4$  周期段积分后, 虽然成功消除了母线电压的偶倍频, 除 1 倍频分量的奇波分量也被消除。考虑到高次奇倍频分量的幅值很小, 可忽略他们产生的影响。同时将  $0 \sim T/4$  与  $T/4 \sim 3T/4$  周期的积分值相加后, 减去  $T/4 \sim T/2$  周期与  $T/2 \sim 3T/4$  周期积分的和, 即可消除母线电压中的固定直流, 将分段积分后所得的差值记为  $D_{dc}$ , 得:

$$D_{dc} = \int_0^{t_0+T/4} u_{rd}(t) dt + \int_{t_0+3T/4}^{t_0+T} u_{rd}(t) dt - \int_{t_0+T/4}^{t_0+T/2} u_{rd}(t) dt - \int_{t_0+T/2}^{t_0+3T/4} u_{rd}(t) dt = \frac{U_1 I_{dc}}{4\pi^2 f^2 C_{dc} U_{dc}} \quad (17)$$

得最终的  $I_{dc}$  为:

$$I_{dc} = \frac{4\pi^2 f^2 C_{dc} U_{dc} D_{dc}}{U_1} \quad (18)$$

在一个工频周期内,  $U_{dc}$ 、 $U_1$  均不变, 即  $I_{dc}$  与  $D_{dc}$  成单调比例关系, 故可通过相应的控制方法消除并网电流的直流分量  $I_{dc}$ 。

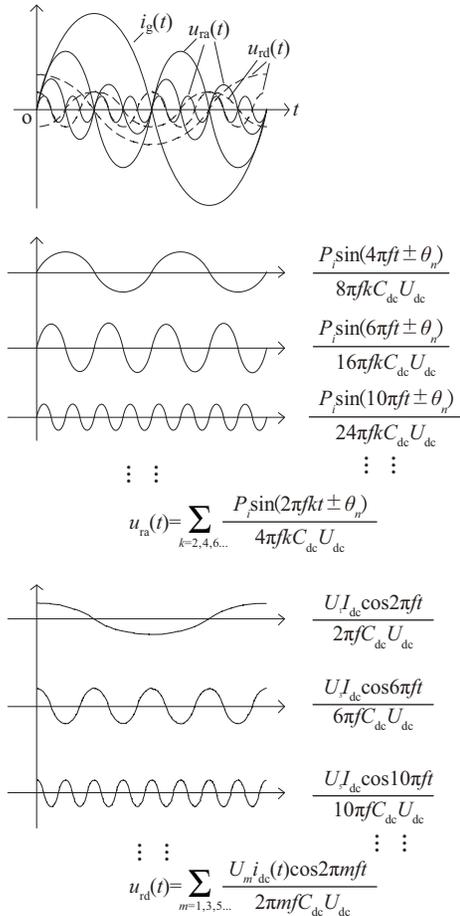


图2 母线电压纹波分量与并网电流相位关系图

Fig. 2 Phase relation between DC bus voltage ripples and grid current

### 2.2 具有直流分量抑制功能的并网电流控制策略

通过 2.1 节分析, 可得非理想电网条件下并网电流的直流分量的解析式可通过分段积分一个工频周期的直流母线电压后通过代数运算获得, 将该解析式作为补偿量对并网参考电流进行补偿, 即可有效抑制并网电流直流分量的产生。图 3 为本文所采用的控制策略原理框图。

由图 3 可得, 具有直流分量抑制功能的并网逆变器控制流程如下: 将直流分量参考值 0 与式(18)所得的  $I_{dc}$  相减得到一个误差值, 将该值送入 PI 调

节器后所得的输出补偿参考电流  $I_{ref}$ ; 然后将参考电流  $I_{ref}$  减去实际并网电流  $i_g$  后得电流误差值  $i_c$ ; 将该电流误差  $i_c$  通过 PI 调节后即可得控制信号的占空比; 最后将该占空比与逆变器全桥等效模型  $K_{PWM}$  相乘, 经过 LCL 滤波器滤除高次谐波后, 即可得并网输出电流  $i_g$ 。可见, 该方法与传统的并网电流控制方法区别只在于参考电流的修正, 故并网系统中如电流环 PI 参数的整定, LCL 滤波器的参数设计均与已有研究相同<sup>[18]</sup>。由于 LCL 滤波器是三阶系统, 在谐振频率处存在谐振峰值, 通常需增加额外的电容或电感电流内环以抑制谐振。对于数字控制系统, 由于数字延时的存在, 只需设计谐振频率高于 1/6 的采样频率, 则无需改变控制系统参数及控制方法, 即可使系统稳定运行。相关参数设计可参考文献<sup>[19, 20]</sup>, 在此不再赘述。

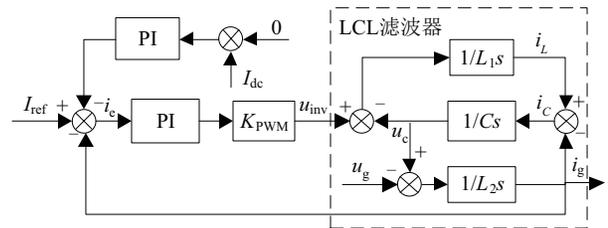


图3 控制策略原理框图

Fig. 3 Theoretic diagram of control method

## 3 仿真分析与实验验证

### 3.1 仿真分析

采用 Matlab/Simulink 搭建单相光伏并网发电系统仿真平台来验证所述算法的有效性, 取采样频率为 20 kHz, 其中 LCL 滤波器参数分别取 1.3 mH、5000 μF、0.3 mH。由式(19)可得谐振频率  $f_{res}$  为 4.5 kHz, 高于 1/6 的采样频率, 故可使并网逆变系统稳定运行, 系统参数如表 1 所示。

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \quad (19)$$

首先确定并网参考电流中直流分量  $I_{dc}$  与式(18)所得  $D_{dc}$  的关系, 假设并网参考电流中所含直流分量分别为 -200、-100、0、100、200 mA 时,  $D_{dc}$  的值如图 4 所示。可见,  $D_{dc}$  与参考电流中的直流分量成比例关系, 当并网参考电流的直流分量大于零时,  $D_{dc} > 0$ , 反之则  $D_{dc} < 0$ , 当并网参考电流不存在直流

分量时,  $D_{dc} = 0$ 。

表1 系统参数  
Table 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
$U_{oc}/V$	350	$C_d/\mu F$	5000
$I_{sc}/A$	12	$U_B/V$	220
$P_{mp}/kW$	3	$L_1/mH$	1.3
$L_2/mH$	0.3	$C/\mu F$	3.3
$U_{dc}/V$	380	$f/Hz$	50
$K_{PWM}$	65	$K_p$	1.2
$K_i$	100	$\xi$	0.707

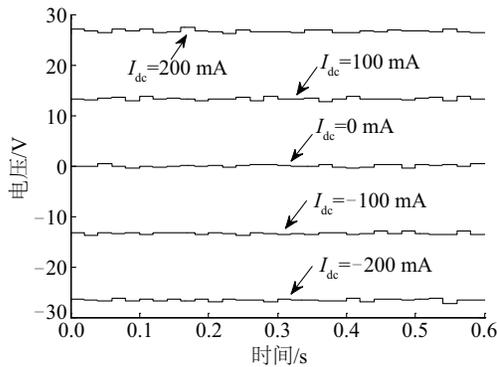


图4 直流分量与  $D_{dc}$  对应关系图

Fig. 4 Relationship between DC and  $D_{dc}$

设置电网电压除基波外,含有3、5、7、9、11和13次谐波,同时在并网参考电流中分别叠加1 A和-1 A的直流分量,所得并网电流波形如图5和图6所示。由图可见,当并网参考电流含有直流分量时,实际并网电流的中心线相对于电流零点存在一个较大的偏置。在0.1 s时加入本文所提直流分量

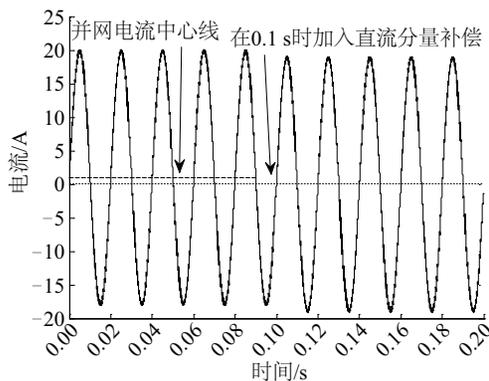


图5 参考电流直流分量为1 A时补偿前后电流波形

Fig. 5 Before and after compensating of grid injected current when reference dc current is 1 A

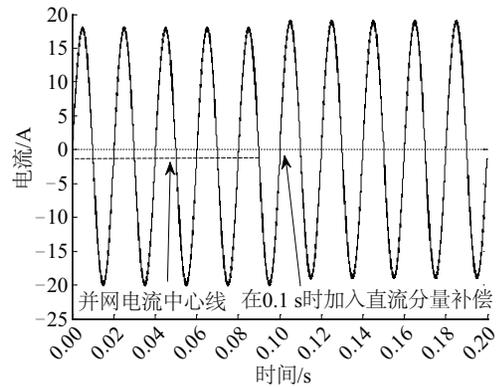


图6 参考电流直流分量为-1 A时补偿前后电流波形

Fig. 6 Before and after compensating of grid injected current when reference dc current is -1 A

补偿算法,从图5和图6可看出,并网电流正负半波的峰值均为约19 A,其并网电流中心线即为电流零点,说明直流分量得到了有效抑制。

### 3.2 实验验证

为更好验证上述方案的有效性,搭建以TI公司生产的Piccolo系列DSC TMS320F28035为控制芯片的3 kW单相光伏并网逆变器实验平台如图7所示,系统参数与仿真相同。



图7 单相光伏并网逆变器实验平台

Fig. 7 Experiment platform of single phase PV grid-connected inverter

为测量注入电网的直流分量,在逆变器输出与电网之间串联一个7.5 mR,0.1级的分流器,并且通过安捷伦台式万用表34461A显示分流器分压所得的直流分量值,万用表显示值与并网直流电流实际值的换算关系为:

$$i_{dc\_real} = \frac{2}{3} u_{disp} \quad (20)$$

式中,  $i_{dc\_real}$  ——实际并网电流直流分量值;  $u_{disp}$  ——台式万用表采得的电压值,测量示意图如图8所示。

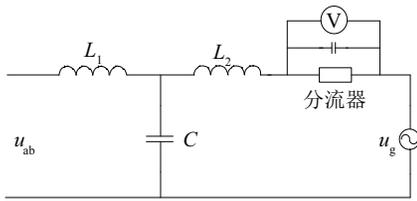


图8 并网电流直流分量测量方法

Fig. 8 DC component measurement of grid-connected current

图9为光伏并网逆变器在额定功率下的母线电压、电网电压及并网电流波形。在未加入直流分量补偿策略时,通过换算分流器所采得的并网电流值可得,此时并网电流存在0.1 A的直流分量,超出标准规定的0.5%额定电流,但该直流分量与额定电流比较相对较小,肉眼很难辨别出并网电流是否含有直流分量,通过对母线电压波形进行放大,可见直流母线电压中的交流纹波存在上下波动的情况,即并网电流正负半周的能量不对称,分析图2的相位关系可得此时并网电流含有正的直流分量。在图中虚线位置所在时刻加入含有直流分量补偿的控制策略,如果光看电并网电流波形,可见补偿前后的并网电流几乎无太大差别,但从图中左上角的母线电压交流纹波的局部放大可见,母线电压的交流纹波趋于对称,同时将台式万用表所采的分流器电压经过换算可得,并网电流直流分量减少到5 mA,说明并网逆变器的直流分量得到有效抑制。

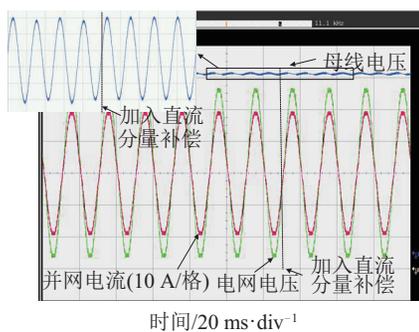


图9 直流分量补偿前后的并网电流

Fig. 9 Grid-connected current before and after DC current compensation

图10为将并网电流通过泰克电流探头TCPA300连接示波器后,采用示波器自带的FFT分析功能所得的补偿前后并网电流频谱图,其中直流分量在图中圈出,并用箭头指出基波与低次谐波分量。位于图10上方的为采用传统控制策略的并网

电流频谱图,可见并网电流除含有少量的低次谐波外,同时存在较大的直流分量;位于下方的并网电流频谱图为本文所采用的加入直流分量补偿后的控制策略,可见直流分量得到有效抑制。

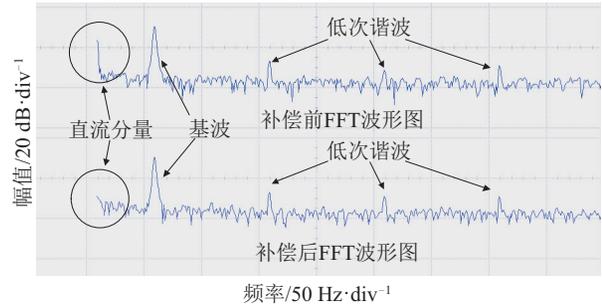


图10 并网电流FFT分析

Fig. 10 FFT Analyses of grid-connected current

## 4 结 论

非隔离型并网逆变器具有功率密度大、体积小,成本低等优点,但并网电流直流分量注入抑制是该类系统亟需解决的关键问题之一。本文通过建立单相光伏并网逆变器数学模型,分析并网电流直流分量产生机理;同时研究非理想电网条件下并网电流与直流母线电压的关系,得出其工频纹波由并网电流直流分量引起的结论。通过对母线电压分段积分后即可解析获得直流分量的值,无需增加外围硬件电路,利用该解析值作为反馈量补偿并网参考电流,从而有效抑制并网电流直流分量的产生。仿真和实验结果同时表明该方法具有很强的实用性。

### [参考文献]

- [1] Farag B, David A, Matthew A. A review of minimization of output dc current component methods in single-phase grid-connected inverters PV applications [A]. 2012 2nd International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA 2012) [C], Newcastle, UK, 2012.
- [2] 周林, 杨冰, 郭珂, 等. 光伏并网系统中直流注入问题最新进展及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 147—155.
- [2] Zhou Lin, Yang Bing, Guo Ke, et al. The progress and development trend of the DC injection issue in PV grid-connected systems [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 147—155.

- [3] Gonzalez R, Lopez J, Sanchis P, et al. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22 (2) : 693—697.
- [4] Lopezo O, Teodorescu R, Freijedo F. Leakage current evaluation of a single-phase transformerless PV inverter connected to the grid [A]. IEEE Applied Power Electronics Conference, 2007 [C], Anaheim, United States, 2007: 907—912.
- [5] Zhang Shao, Tseng King, Vilathgamuwa D-M, et al. Design of a robust grid interface system for PMSG-based wind turbine generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 316—328.
- [6] Blewitt W M, Atkinson D J, Kelly J, et al. Approach to low-cost prevention of DC injection in transformerless grid connected inverters [J]. IET Power Electronics, 2010, 3(1): 111—119.
- [7] Armstrong M, Atkinson D J, Mark J C. Auto-calibrating DC link current sensing technique for transformerless grid connected H-bridge inverter systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21 (5) : 1385—1393.
- [8] 王宝诚, 郭小强, 梅强, 等. 无变压器非隔离型光伏并网逆变器直流注入控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 23—29.
- [8] Wang Baocheng, Guo Xiaoqiang, Mei Qiang, et al. DC injection control for transformerless PV grid-connected inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36) : 23—29.
- [9] Ahmed A, Li Ran. Precise detection and elimination of grid injected DC from single phase inverters [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(8): 1341—1347.
- [10] Giampaolo B, Emilio L. Detection method of the DC bias in distribution power transformers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8) : 3539—3549.
- [11] 王翔, 郝瑞祥, 王剑. 变压器直流偏磁对光伏并网逆变器的影响及抑制方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 237—244.
- [11] Wang Xiang, Hao Ruixiang, Wang Jian. Research on the impact of transformer DC bias on PV grid-connected inverter and restraining method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12) : 237—244.
- [12] 张国月, 秦梦珠, 齐冬莲, 等. 三相光伏并网发电系统 THD 及 DCI 优化方法研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 238—245.
- [12] Zhang Guoyue, Qin Mengzhu, Qi Donglian, et al. Research on optimization method of THD and DCI in three-phase grid-connected PV generation system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 238—245.
- [13] He Guofeng, Xu Dehong, Chen Min. A novel control strategy of suppressing DC current injection to the grid for single-phase PV inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1266—1274.
- [14] Wang Baocheng, Guo Xiaoqiang. Real-time DC injection measurement technique for transformerless PV systems [A]. 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems [C], Hefei, China, 2010.
- [15] 陈堃, 刘涤尘, 陈昌旺. 基于改进重复控制的光伏并网逆变器直流抑制策略 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 159—166.
- [15] Chen Kun, Liu Dichen, Chen Changwang. A Strategy for restraining DC injection of photovoltaic grid-connected inverters based on improved repetitive control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 159—166.
- [16] 史晏君, 段善旭, 刘邦银. 链式 STATCOM 并网电流直流分量抑制 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 15—21.
- [16] Shi Yanjun, Duan Shanxu, Liu Bangyin. Suppression of DC current injection for cascade STATCOMs [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(36) : 15—21.
- [17] 胥芳, 张奔奔, 吴乐彬, 等. 基于母线电压纹波分析的并网逆变器直流分量检测及抑制方法 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1403—1409.
- [17] Xu Fang, Zhang Benben, Wu Lebin, et al. Detecting and suppressing method for DC component of grid-connected inverter based on ripple analysis of bus voltage [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(6) : 1403—1409.
- [18] 许津铭, 谢少军, 张斌锋. 分布式发电系统中 LCL 滤波并网逆变器电流控制研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4153—4166.
- [18] Xu Jinming, Xie Shaojun, Zhang Bin-feng. Overview of current control techniques for grid-connected inverters with LCL filters in distributed power generation systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16) : 4153—4166.

- [19] Parker S G, McGrath B P, Holmes D G. Regions of active damping control for LCL filters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(1): 424—432.
- [20] Dannehl J, Liserre M, Fuchs F. Filter-based active damping of voltage source converters with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(8): 3623—3633.

## DETECTING AND SUPPRESSING METHOD FOR DC INJECTION OF GRID-CONNECTED INVERTER UNDER NONIDEAL GRID CONDITION

Zhang Benben, Xu Fang, Ai Qinglin, Wu Lebin

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In order to suppress the DC component of grid-connected current in inverter of PV grid-connected power generation system under nonideal grid condition, an indirect detection and compensation method based on DC side bus voltage ripple analysis is proposed. Firstly, the mathematical model of the grid-connected inverter is established, and the generation mechanism of the DC component of the grid-connected current is analyzed. Then the relationship between the grid-connected current and the busbar ripple voltage is studied, and it is concluded that the DC component of the grid-connected current can be equivalent to the odd-frequency ripple component of the busbar ripple voltage under non-ideal grid conditions. Obtaining the DC component analytic of the grid-connected current by segmentally integrating the bus voltage of a grid cycle, adding the formula as feedback amount into the system control link can effectively suppress the generation of DC component of grid-connected current. Finally, the reliability of the proposed method is verified by simulation and experiment.

**Keywords:** grid-connected inverter; DC bus voltage ripple; DC suppress; nonideal grid