

# 基于幅值积分的光伏并网功率调节系统研究

周林, 廖波, 龙崦平, 张林强, 李怀花, 杜金其

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 三相光伏并网功率调节系统控制的关键之一是谐波、无功电流的准确检测和光伏有功电流指令信号的形成。为得到与电网电压正序基波同频同相的光伏有功电流, 分析了幅值积分正序基波提取方法中参数  $K$  对输出正序基波电压相位偏移的影响, 推导出  $K$  与频率偏差和正序基波电压相位偏移的关系式, 合理取  $K$  值可准确提取正序基波电压。该系统无需锁相环可得到同步正、余弦信号。在  $i_p-i_q$  法基础上, 引入 2 个标准选择器, 使光伏有功电流与谐波、无功电流任意组合形成并网指令电流, 实现有功注入与谐波抑制、无功补偿的任意组合性功能。MATLAB/Simulink 仿真和 RT-LAB 实验结果验证了理论分析的正确性。

**关键词:** 光伏功率调节系统; 幅值积分; 指令电流运算; 选择器; 电能质量; 太阳能

**中图分类号:** TM 615; TK 514

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.020

## 0 引言

随着能源危机的出现, 新能源的研究开发具有战略意义, 而太阳能作为清洁可再生能源已成为研究热点。光伏发电是将太阳光能直接转换为电能的一种重要形式<sup>[1]</sup>。传统的光伏并网系统对电网注入有功, 要求并网电流与电网电压同频同相<sup>[2-3]</sup>, 而电网中存在大量的非线性负载, 向电网注入无功和谐波, 在电网末梢对电压影响很大。考虑到有源滤波器主电路及控制与光伏并网逆变系统的相似性, 将光伏并网与有源滤波器进行统一控制, 使系统具有光伏有功注入、无功补偿和谐波抑制的功能。这样既能改善电网电能质量, 也从一定程度上节省了设备。

对光伏功率调节系统, 得到与电网正序基波同频同相的注入有功电流和准确的谐波电流检测是关键。从目前研究现状来看, 文献[4-6]研究了具有谐波抑制和无功功率补偿的光伏并网系统, 但都仅限于单相电路, 控制方法不能扩展到三相系统。文献[7-9]研究了光伏并网功率调节系统, 将有源滤波器与光伏并网统一控制, 利用检测 a 相电网电压同步相位进行谐波、无功电流检测, 但所得光伏有功电流不是与电网正序基波同相。文献[10-12]采用幅值积分法提取正序基波, 得到同步正、余弦, 但未对幅值积分的频率特性及参数  $K$  设计进行分析。

本文研究了基于幅值积分的光伏并网功率调节系统, 考虑实际电网电压存在畸变、不平衡和频率偏差, 为得到准确的正序基波电压和与其同频同相的光伏有功电流, 深入分析了幅值积分法提取正序基波频率偏移与参数  $K$  及相位偏移的联系, 推

出  $K$  与频率偏差和正序基波相位偏移的关系式, 以便合理选取  $K$  值。利用  $\alpha-\beta$  轴系下的正序基波运算得到同步同相正、余弦信号, 无需锁相环。采用  $i_p-i_q$  法检测谐波及无功电流并结合光伏有功电流形成并网功率调节系统电流指令信号。引入 2 个标准选择器, 通过选择性地合成电流指令信号, 实现具有光伏有功注入与谐波抑制、无功补偿任意组合功能的光伏并网功率调节系统。

## 1 光伏并网功率调节系统原理

本文讨论的光伏并网功率调节系统主电路及控制结构如图 1 所示。图 1 中的光伏并网系统为 2 级结构: 前级为光伏电池阵列和 Boost DC/DC 电路, 光伏电池经 1 个隔离二极管和稳压电容  $C_1$  接入电路, Boost 电路实现升压功能和最大功率点跟踪 (MPPT)<sup>[13]</sup> 控制; 后级为三相电压型逆变器, 经电抗

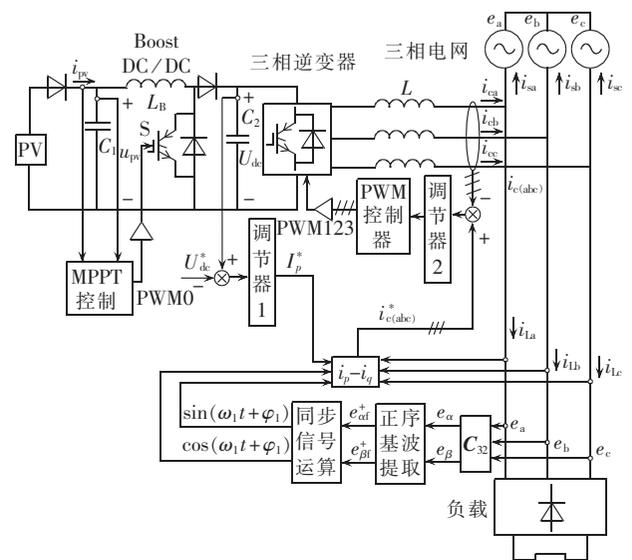


图 1 系统结构及控制原理图

Fig.1 Schematic diagram of system and its control

收稿日期: 2012-01-07; 修回日期: 2012-11-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA05A-301)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program(863 Program)(2011AA05A301)

器  $L$  接入电网,电网末端接有交流非线性负载。由于光伏并网逆变器直流侧电压控制和有源滤波器直流母线电压控制方式相同<sup>[6]</sup>,都通过控制并网有功电流大小和方向来稳定直流侧电压,因此,可对光伏并网与有源滤波进行统一控制,实现光伏并网功率调节。

## 2 基于幅值积分的光伏功率调节系统指令电流合成分析

### 2.1 幅值积分法正序基波提取分析

在实际电网中,三相电压畸变且不平衡现象普遍存在,电网电压可分解为基波正序、负序、零序分量和谐波正序、负序、零序分量:

$$\begin{cases} e_a = \sum_{m=1}^{\infty} [E_m^+ \sin(m\omega_1 t + \varphi_m^+) + E_m^- \sin(m\omega_1 t + \varphi_m^-) + E_m^0 \sin(m\omega_1 t + \varphi_m^0)] \\ e_b = \sum_{m=1}^{\infty} [E_m^+ \sin(m\omega_1 t + \varphi_m^+ - 120^\circ) + E_m^- \sin(m\omega_1 t + \varphi_m^- + 120^\circ) + E_m^0 \sin(m\omega_1 t + \varphi_m^0)] \\ e_c = \sum_{m=1}^{\infty} [E_m^+ \sin(m\omega_1 t + \varphi_m^+ + 120^\circ) + E_m^- \sin(m\omega_1 t + \varphi_m^- - 120^\circ) + E_m^0 \sin(m\omega_1 t + \varphi_m^0)] \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\omega_1$  为电网实际角频率,  $\varphi_m$  为电压初相角。

由文献[9]知,可将幅值积分构成闭环控制,控制方法见图 2。  $X(t) = A \sin(\omega_1 t + \theta)$ ,  $Z(t) = At \sin(\omega_1 t + \theta)$ , 对应的拉普拉斯变换为:

$$\begin{cases} X(s) = \frac{A\omega_1 \cos \theta}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{As \sin \theta}{s^2 + \omega_1^2} \\ Z(s) = \frac{s}{s^2 + \omega_1^2} \left( \frac{A\omega_1 \cos \theta}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{As \sin \theta}{s^2 + \omega_1^2} \right) + \frac{\omega}{s^2 + \omega_1^2} \left( \frac{As \cos \theta}{s^2 + \omega_1^2} - \frac{A\omega_1 \sin \theta}{s^2 + \omega_1^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

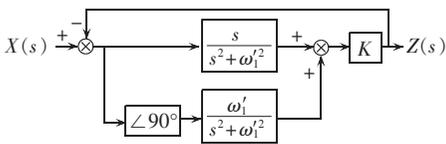


图 2 幅值积分闭环控制图

Fig.2 Close-loop control of amplitude integral

$\omega_1' = 2\pi \times 50 / s$ ,  $90^\circ$  移相由  $s / \omega_1'$  表示,则幅值积分的闭环传递函数可表示为:

$$G_F(s) = \frac{2Ks}{s^2 + 2Ks + \omega_1'^2} \quad (3)$$

幅值积分闭环 Bode 图见图 3,从图 3 可知基频 50Hz 处幅值为 0dB,高次谐波呈 20dB 衰减,  $K$  值选取与相位偏移要求有关,  $K$  越大,基频处带宽越宽,滤波效果差,但相位变化更缓慢,相位偏移越小。由相角公式可推导出  $K$  与频率、相位偏移的关系式:

$$\tan(90^\circ - \Delta\varphi_f^+) = \frac{2K\omega_1}{\omega_1'^2 - \omega_1^2} \quad (4)$$

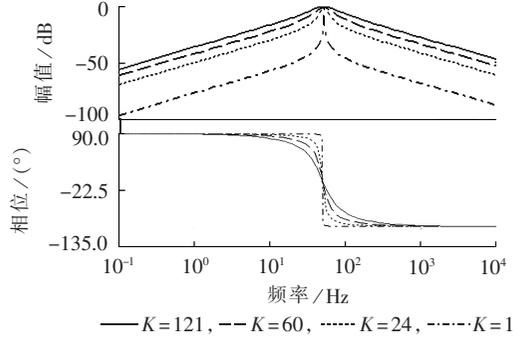


图 3 幅值积分闭环 Bode 图

Fig.3 Bode plots of amplitude integral close-loop

GB / T15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》规定<sup>[14]</sup>:电网正常频率偏差允许值为  $\pm 0.2$  Hz,容量较小时可放宽到  $\pm 0.5$  Hz。考虑频率偏差不超过 2 Hz 时,则:

$$\tan(90^\circ - \Delta\varphi_f^+) \approx \frac{K}{2\pi \Delta f} \quad (5)$$

其中,  $\Delta f$  为工频处频率偏移量。

根据《光伏电站接入电网技术规定》<sup>[15]</sup>,并网光伏系统的功率因数应不小于 0.98。考虑一定裕量,以相位偏移  $|\Delta\varphi_f^+| \leq 3^\circ$  为分析指标,使并网光伏系统功率因数理论值达到 0.99 以上。由式(4)计算  $K$  值相对误差不超过 1.96%。频率偏差为  $\pm 0.5$  Hz 时,相对误差为 0.417%,频率偏差越小,相对误差越小。电力系统频率偏差现象普遍存在,利用正弦幅值积分可准确提取不平衡畸变电网电压的正序基波,控制原理图如图 4 所示,图中  $e_a, e_b, e_c$  为电网电压,  $e_{a\alpha}, e_{\beta}$  为三相电网电压转换为两相静止坐标系下得到,  $e_{a\alpha}^+, e_{\beta\alpha}^+$  为提取的正序基波电压。可采用自适应软件测频方法<sup>[16]</sup>对  $K$  值进行自适应调整,其原理如图 5 所示。

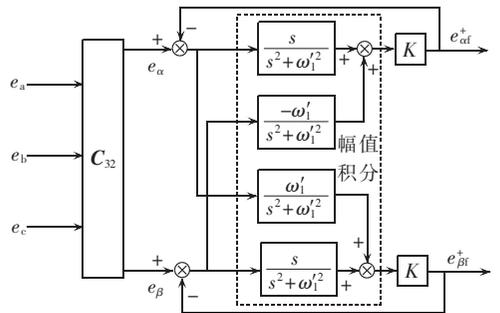


图 4 正序基波提取原理图

Fig.4 Schematic diagram of positive-sequence fundamental extraction

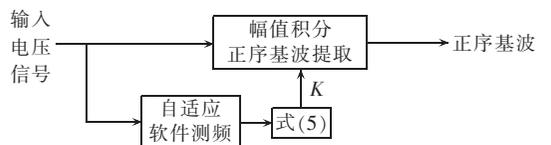


图 5  $K$  值自适应调整原理图

Fig.5 Schematic diagram of adaptive parameter  $K$  adjustment

以相位偏移  $|\Delta\varphi_1^+| \leq 3^\circ$  为分析指标, 分别以电网频率偏移为  $\pm 0.2$  Hz、 $\pm 0.5$  Hz、 $\pm 1$  Hz, 计算出的  $K$  分别为 24、60、121。不同频率偏差下正序基波相位偏移结果如表 1 所示。

表 1 频率偏差对相位偏移  $\Delta\varphi_1^+$  的影响  
Tab.1 Influence of frequency-deviation on phase-deviation  $\Delta\varphi_1^+$

K	$\Delta\varphi_1^+ / (^\circ)$					
	0	0.2Hz	0.5Hz	1.0Hz	1.5Hz	2.0Hz
24	0	2.99	7.20	14.58	19.44	23.98
60	0	1.17	3.00	6.12	9.18	12.12
121	0	0.81	1.62	2.98	5.22	6.12

## 2.2 谐波和无功电流检测及指令电流合成分析

对于光伏功率调节系统, 谐波、无功电流的检测和获得准确的光伏有功指令电流是其关键。将直流母线电压控制得到的光伏有功电流幅值  $I_p^*$  与  $i_p-i_q$  法中的  $\bar{i}_p$  相加, 得到并网指令电流。

图 6 所示为带光伏有功电流注入的  $i_p-i_q$  法。图中矩阵  $C_{32}$ 、 $C_{23}$ 、 $C$  表达式如下:

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$C_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t + \varphi_1^+) & -\cos(\omega_1 t + \varphi_1^+) \\ -\cos(\omega_1 t + \varphi_1^+) & -\sin(\omega_1 t + \varphi_1^+) \end{bmatrix}$$

2.1 节中已得到正序基波, 根据文献[17]可知:

$$\begin{cases} \sin(\omega_1 t + \varphi_1^+) = \frac{e_{af}^+}{\sqrt{(e_{af}^+)^2 + (e_{bf}^+)^2}} \\ \cos(\omega_1 t + \varphi_1^+) = \frac{-e_{bf}^+}{\sqrt{(e_{af}^+)^2 + (e_{bf}^+)^2}} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)直接得到了同步正、余弦。经图 6 中运算可得式(7)。

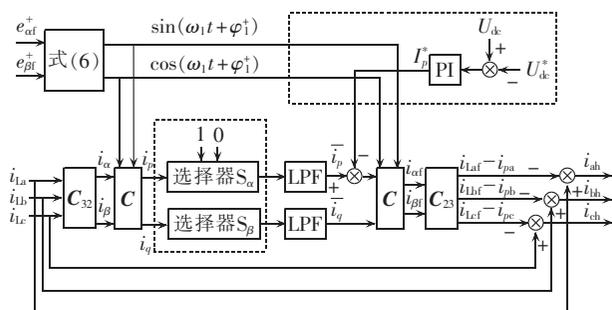


图 6 谐波、无功电流检测及指令合成方法  
Fig.6 Harmonic and reactive power currents detection and reference current combination

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} I_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) - I_p^* \sin(\omega_1 t + \varphi_1^+) \\ -\sqrt{3} I_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + I_p^* \cos(\omega_1 t + \varphi_1^+) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $I_1$  为负载电流基波有效值,  $\varphi_1$  为负载电流基波初相位。

从式(7)运算结果可知: 负载电流的基波分量与电网电压的初相角无关, 且能得到与电网电压正序基波同频同相的光伏有功电流。

经图 6 中框图的运算得到有功电流参考, 即:

$$\begin{cases} i_{pa}^* = I_p^* \sin(\omega_1 t + \varphi_1^+) \\ i_{pb}^* = I_p^* \sin(\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_1^+) \\ i_{pc}^* = I_p^* \sin(\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_1^+) \end{cases} \quad (8)$$

在  $i_p-i_q$  法中引入标准选择器<sup>[18]</sup>  $S_\alpha$ 、 $S_\beta$  (如图 6 所示), 可实现对谐波和无功电流的分时检测。选择器均置 1 导通, 置 0 输出 0。按图 1 所示的电流参考方向和图 6 的检测方法, 检测出的电流可直接形成逆变器的指令电流。表 2 为 4 种不同补偿条件下指令电流合成方式。P、H、Q 分别表示有功注入、谐波抑制、无功补偿;  $i_{c(abc)}^*$  和  $i_{p(abc)}^*$ 、 $i_{h(abc)}^*$ 、 $i_{q(abc)}^*$  分别为三相并网指令电流和光伏有功、谐波、无功指令电流。

表 2 指令电流合成  
Tab.2 Reference current combination

补偿功能	选择器	指令电流合成
P, H, Q	$S_\alpha$ 置 1 $S_\beta$ 置 0	$i_{c(abc)}^* = i_{p(abc)}^* + i_{h(abc)}^* + i_{q(abc)}^*$
P	$S_\alpha$ 置 0 $S_\beta$ 置 0	$i_{c(abc)}^* = i_{p(abc)}^*$
P, H	$S_\alpha$ 置 1 $S_\beta$ 置 1	$i_{c(abc)}^* = i_{p(abc)}^* + i_{h(abc)}^*$
P, Q	$S_\alpha$ 置 0 $S_\beta$ 置 1	$i_{c(abc)}^* = i_{p(abc)}^* + i_{q(abc)}^*$

## 3 仿真及实验结果分析

本文研究了具有有功注入和谐波抑制、无功补偿任意组合功能的光伏并网系统, 得到了准确的并网指令电流。为了验证理论分析的正确性, 本节进行仿真与实验对比分析。

### 3.1 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 中建立仿真模型, 系统参数如下: 光伏系统输出有功功率  $P_{pv} = 4500$  W, Boost 电路中  $C_1 = 200 \mu\text{F}$ ,  $L_B = 4$  mH, 直流侧电容  $C_2 = 2800 \mu\text{F}$ ; 直流侧电压  $U_{dc} = 400$  V, 并网滤波电感  $L = 6$  mH, 交流电网相电压有效值  $E_s = 85$  V, 经隔离变压器接入 220 V 电网, 开关频率  $f_s = 10$  kHz。

畸变的三相电网的频率为 50.5 Hz, 且含有 5、7 次谐波。提取的正序基波如图 7 所示,  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为三相电网电压,  $e_{af}^+$ 、 $e_{bf}^+$ 、 $e_{cf}^+$  为正序基波电压。K 取 60, 正序基波为标准正弦波。

接入光伏系统电网电流仿真波形如图 8 所示,

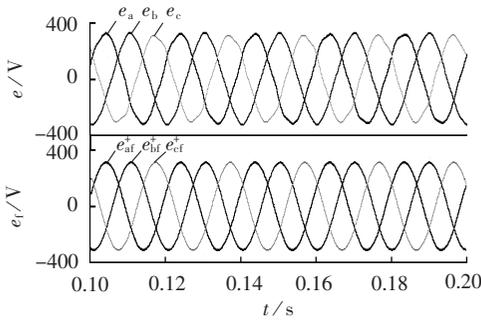
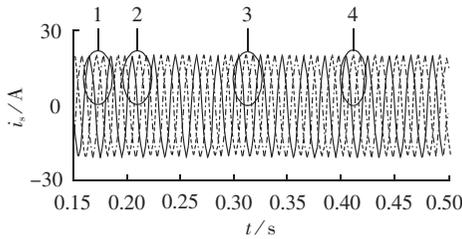


图 7 正序基波电压仿真波形图

Fig.7 Simulative waveforms of positive-sequence fundamental voltage



(a) 电网电流仿真波形

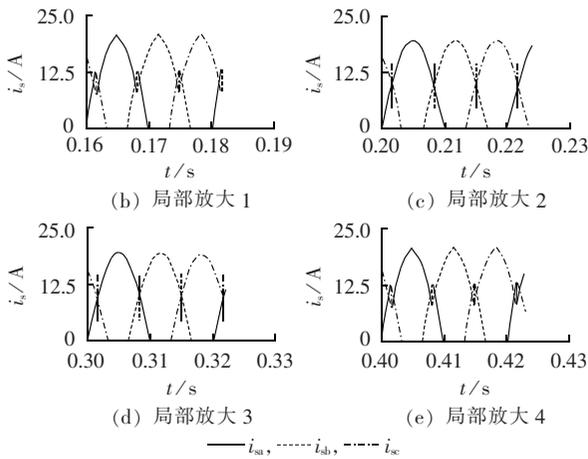


图 8 接入光伏系统电网电流仿真波形

Fig.8 Simulative current waveforms of grid with photovoltaic system

由标准选择器的作用,可选择性地进行谐波抑制和无功补偿。在 0~0.2 s 之间只对电网注入光伏有功功率,没有谐波和无功功率补偿,电网电流中含谐波和无功分量,电网电流呈尖顶波;在 0.2~0.3 s 之间为有功注入、谐波和无功补偿,电网电流为正弦,抑制了谐波和无功电流,经 FFT 分析可知电网电流 THD 为 3.23%,各次谐波含量都降到 0.6% 以下,达到补偿效果;在 0.3~0.4 s 之间为有功注入和谐波抑制,电网电流为正弦波,但含无功电流;在 0.4~0.45 s 之间为有功注入和无功补偿,没有抑制谐波,电网电流仍呈尖顶波。

### 3.2 实验结果分析

本文通过 RT-LAB 实验平台建立控制模型,处理采样得到的相应电流、电压信号,通过控制模型算法产生主电路的驱动信号。实验参数设计如下:电

网相电压为幅值 20 V,经隔离变压器接入 220 V 电网,直流侧电压 80 V,光伏注入有功功率 108 W,直流侧电容 1 120  $\mu$ F,交流侧滤波电感 7 mH,开关频率 5 kHz,非线性负载为带阻感负载的三相不控整流桥,电阻为 15  $\Omega$ ,电感为 17.6 mH。

接入光伏系统后的电网电流波形如图 9 所示,  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $i_{sc}$  分别为电网 a、b、c 相电流。图 9(a)显示了光伏系统只向电网注入有功功率,无谐波抑制和无功补偿,电网电流波形是畸变的尖顶波,幅值为 1.28 A;图 9(b)显示了光伏有功注入和无功补偿后的电网电流,也未抑制谐波,电流仍是尖顶波,幅值为 1.32 A;图 9(c)显示了注入光伏有功和谐波抑制后的电网电流,可见电流为正弦波,幅值为 1.16 A,未补偿无功;图 9(d)显示了对电网注入有功、抑制谐波和补偿无功,电网电流基本呈正弦波,且与电网电压同相,幅值为 1.04 A。

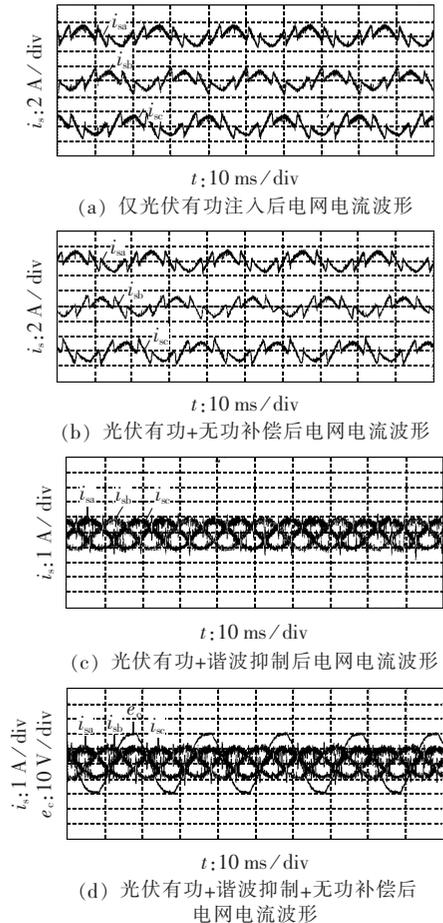


图 9 接入光伏系统后电网电流实验波形

Fig.9 Experimental current waveforms of grid with photovoltaic system

从上述仿真与实验结果分析知,本文的光伏并网系统向电网注入光伏有功的同时,能选择性地抑制谐波和补偿无功。在不同的场合,可任意选择适当的补偿功能进行组合,实现对电网电能质量的调节。

## 4 结论

本文将谐波抑制与无功补偿和光伏发电并网统一控制,改善了电网的电能质量,提高供电可靠性,同时节省了其他无功或谐波补偿装置。考虑实际电网电压存在畸变、不对称和频率偏移,深入分析了幅值积分正序基波提取法的参数  $K$  对提取的正序基波相移的影响,并推导出  $K$  与频率偏差、相位偏移的关系式。准确提取出正序基波,利用正序基波计算出同步正、余弦信号。在  $i_p-i_q$  法基础上,推导出光伏并网功率调节系统指令电流的运算方式。引入 2 个标准选择器,实现光伏有功注入与谐波抑制、无功补偿任意组合功能。最后建立了 MATLAB/Simulink 模型仿真,并进行 RT-LAB 实验分析,验证了理论分析的正确性。

## 参考文献:

- [1] 赵争鸣,连建政,孙晓瑛,等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005:9-15.
- [2] 王飞,余世杰,苏建徽,等. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报,2005,20(5):72-74.  
WANG Fei,YU Shijie,SU Jianhui,et al. Research on photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(5):72-74.
- [3] 张厚升,赵艳雷. 单相双极式光伏并网逆变器[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):95-99.  
ZHANG Housheng,ZHAO Yanlei. Single-phase double-stage photovoltaic grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):95-99.
- [4] 吕哲. 无功功率补偿和谐波抑制的光伏并网系统研究[D]. 无锡:江南大学,2008.  
LÜ Zhe. Research on photovoltaic grid-connected with reactive power compensation and harmonic restrain[D]. Wuxi:Jiangnan University,2008.
- [5] WU Taifu,NIEN Hongshou,SHEN Chihlung,et al. A single-phase inverter system for PV power injection and active power filtering with nonlinear inductor consideration[J]. IEEE Trans on Industry Applications,2005,41(4):1075-1083.
- [6] 何金伟. 单相光伏并网功率调节系统的研究[D]. 广州:中山大学,2009.  
HE Jinwei. Research on the single-phase photovoltaic grid-connected power conditioner system[D]. Guangzhou:Sun Yat-Sen University,2009.
- [7] 汪海宁,舒建徽,张国荣,等. 光伏并网发电及无功补偿的统一控制[J]. 电工技术学报,2005,20(9):114-118.  
WANG Haining,SHU Jianhui,ZHANG Guorong,et al. Unit control of PV grid connected generation and reactive compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(9):114-118.
- [8] 汪海宁,舒建徽,张国荣,等. 光伏并网功率调节系统[J]. 中国电机工程学报,2007,27(2):75-79.  
WANG Haining,SHU Jianhui,ZHANG Guorong,et al. Photovoltaic grid connected power conditioner system[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(2):75-79.
- [9] 汪海宁,舒建徽,张国荣,等. 具有无功功率补偿和谐波抑制的光伏并网功率调节器控制研究[J]. 太阳能学报,2006,27(6):540-544.  
WANG Haining,SHU Jianhui,ZHANG Guorong,et al. Study on PV grid connected power conditioner with reactive power compensation and harmonic restrain[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2006,27(6):540-544.
- [10] 汤锡,罗安,程莹,等. 基于正序基波提取器的无功、谐波和负序电流检测方法[J]. 变流技术与电力牵引,2008(5):43-48.  
TANG Xi,LUO An,CHENG Ying,et al. A current detecting method for reactive power,harmonic and negative sequence based on positive sequence extractor of fundamental wave[J]. Converter Technology & Electric Traction,2008(5):43-48.
- [11] 周君求,陈兰玉,周沛锋,等. 同步参考坐标法和正、负序基波提取器在电流检测中的比[J]. 中南大学学报:自然科学版,2008,39(4):816-823.  
ZHOU Junqiu,CHEN Lanyu,ZHOU Peifeng,et al. Contrastive research on improved synchronous reference frame method and detecting method based on sequence extractor of positive and negative fundamental wave for detecting current[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2008,39(4):816-823.
- [12] 刘水强,张颖,陈继业. 基于同步坐标的有源电力滤波器检测策略[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):41-44.  
LIU Shuiqiang,ZHANG Ying,CHEN Jiye. Detection strategy for APF based on synchronous-reference-frame method[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):41-44.
- [13] 杨水涛,张凡,丁新平,等. 基于输入-输出参数的光伏电池最率控制的比较[J]. 电工技术学报,2009,24(6):95-102.  
YANG Shuitao,ZHANG Fan,DING Xinping,et al. Comprehensive research on the photovoltaic maximum power point tracking based on input parameters or output parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(6):95-102.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T15945—2008 电能质量 电力系统频率偏差[S]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [15] 国家电网公司. Q/GDW617—2011 光伏电站接入电网技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [16] 牟龙华,邢锦磊. 基于傅里叶变换的精确频率测量算法[J]. 电力系统自动化,2008,32(23):67-70,94.  
MU Longhua,XING Jinlei. An accurate frequency measuring algorithm for power systems based on Fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(23):67-70,94.
- [17] 陈东华,谢少军,周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):62-67.  
CHEN Donghua,XIE Shaojun,ZHOU Bo. An improved synchronous reference frame method for harmonics and reactive currents detection of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(20):62-67.
- [18] SHU Zeliang,XIE Shaofeng,LI Qunzhan. Single-phase back-to-back converter for active power balancing,reactive power compensation,and harmonic filtering in traction power system[J]. IEEE Power Electronics Society,2011,26(2):334-343.

作者简介:

周 林(1961-),男,四川内江人,教授,博士研究生导师,

主要从事可再生能源理论、电能质量分析与控制研究;

廖 波(1986-),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事

光伏并网发电系统方面的研究(E-mail:liaobo2006@163.com)。

## Grid-connected photovoltaic power conditioner system based on amplitude integral

ZHOU Lin, LIAO Bo, LONG Yanping, ZHANG Linqiang, LI Huaihua, DU Jinqi

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,  
Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The accurate detection of harmonics and reactive currents and the generation of photovoltaic active current reference are essential for the control of three-phase grid-connected photovoltaic power conditioner system. In order to get the photovoltaic active current with same frequency and phase as the positive-sequence fundamental voltage of grid, the influence of parameter  $K$  in the amplitude integral positive-sequence fundamental extraction on the phase deviation of output positive-sequence fundamental voltage is analyzed and the relationship between  $K$  and frequency/phase deviation of positive-sequence fundamental voltage is derived. The positive-sequence fundamental voltage can be accurately extracted when  $K$  is set properly. Synchronous sine or cosine signals can be obtained without PLL. Based on  $i_p-i_q$  method, two standard selectors are applied, which combine randomly the photovoltaic active current with the harmonic or reactive current to form the grid-connection reference current for realizing the random functional combination of active power injection, harmonic restraint and reactive power compensation. Results of the simulation with MATLAB/Simulink and the experiment based on RT-LAB verify the correctness of theoretical analysis.

**Key words:** photovoltaic power conditioner system; amplitude integral; reference current calculation; selector; power quality; solar energy

(上接第 103 页 continued from page 103)

## PV array output power forecasting based on similar day and RBFNN

WANG Xiaolan<sup>1,2</sup>, GE Pengjiang<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** As the solar radiation time, solar radiation intensity and air temperature are the main influencing factors of PV array output power and there is strong correlation in output power among the similar days, a forecasting model of PV array output power is designed based on similar days and RBFNN (Radial Basis Function Neural Network), which takes the difference of meteorological feature vector between the nearest similar day and the day to be forecasted as the input variable of RBFNN and its output as the forecasted PV array output power. The proposed model is trained and verified with the measured power data of a PV array in Northwest China. Its mean absolute percentage error obtained is 13.82% and its root mean square error is 0.4054, showing its high accuracy.

**Key words:** PV array; output power; radial basis function networks; similar day; forecasting; models; neural networks