

# 分布式发电系统中并网逆变器的比例反馈积分控制技术

郭小强, 邬伟扬, 顾和荣, 王立乔, 赵清林

(电力电子节能与传动控制河北省重点实验室; 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 分布式发电系统并网逆变单元输出电流的控制性能直接影响到系统输出的电能质量. 传统PI控制无法消除并网电流(交流)的稳态误差, 但稳态误差存在的根本原因相关文献描述较少. 为了解释其原因, 首先建立了并网电流线性控制模型, 然后通过线性叠加定理和频域分析, 揭示了传统PI控制交流量存在稳态误差的本质, 并提出一种新的PI控制, 即比例反馈积分PFI控制. PFI控制不仅解决了传统并网电流PI控制中存在稳态误差的问题, 而且还具有直流抑制特性. 此外, 提出的PI控制具有原理简单, 实现方便, 单相三相系统均适用等优点. 和理论分析一致, 仿真结果验证了提出的PI控制的有效性.

**关键词:** 分布式发电系统; 并网逆变单元; PI控制; 零稳态误差; 直流抑制

**中图分类号:** TM615      **文献标识码:** A

## A proportion-feedback-integration control for the grid-connected inverter in distributed generation systems

GUO Xiao-qiang, WU Wei-yang, GU He-rong, WANG Li-qiao, ZHAO Qing-lin

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province;  
College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

**Abstract:** Current control for the grid-connected inverter of distributed power generation systems has a significant impact on the power quality. The conventional PI control can not achieve the null steady-state error for the ac grid current, and the underlying reason for that is rarely depicted at length in literature. In this paper, the linear model for the grid current control is built, and then, the causes for the steady-state error in the conventional PI control is revealed based on the superposition theorem and frequency-domain analysis. A novel proportion-feedback-integration(PFI) control is proposed to eliminate the steady-state error and reject the dc component. It is easy to implement and applicable to both single-phase systems and three-phase systems. The simulation results are in agreement with the theoretical analysis, thus, verifying the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** distributed generation system; grid-connected inverter; PI control; zero steady-state error; dc rejection

### 1 引言(Introduction)

近年来, 基于可再生能源的分布式并网发电技术, 如光伏发电、燃料电池发电和风力发电等, 得到广泛关注, 成为人类能源可持续发展战略的重要组成部分<sup>[1]</sup>. 众所周知, 无论光伏单元和燃料电池单元, 还是风力发电单元, 与电网接口通常采用逆变器<sup>[2]</sup>. 逆变器单元的控制性能直接影响到发电系统输出的电能质量. 因此, 研究并网逆变器单元的控制具有重要的现实意义.

并网逆变单元(grid-connected inverter, GCI)通常采用输出电流控制. 并网电流控制性能指标主要有稳态幅值相位误差、动态响应、单位功率因数、谐

波畸变率、直流分量等<sup>[3]</sup>. PI控制因其算法简单, 技术成熟等特点, 成为并网工程领域广泛采用的控制方案. 然而, 根据古典控制理论可知, PI控制对交流量(并网电流)难以达到理想的控制效果, 存在稳态误差的问题. 文献[4]采用基于内模原理的比例谐振PR控制解决了交流量控制存在稳态误差的问题. 但是, 对于IEEE std.1547-2003中规定的直流偏置问题, 该方法不能有效抑制.

本文提出一种新的PI控制, 即比例反馈积分PFI控制, 实现了对交流量(并网电流)的零稳态误差控制, 与传统控制相比, 该方法最大特色是可以有效抑制并网电流中的直流分量, 而大部分GCI常常忽略

这一点<sup>[5]</sup>.

## 2 并网电流控制原理(Grid current control principle)

### 2.1 传统并网控制(Conventional control)

为了便于分析,首先以单相GCI为研究对象,如图1为GCI并网原理图,其中直流母线由可再生能源提供,电感 $L$ 用于滤除由于开关动作引起的高次谐波电流,输出与电网电压同频同相的正弦波,实现单位功率因数并网运行.

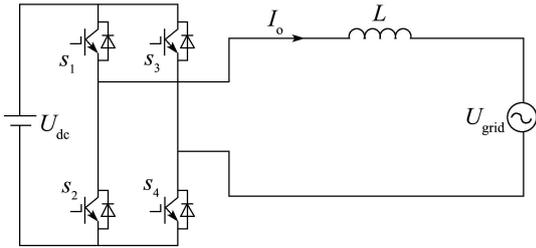


图1 并网逆变单元原理图

Fig. 1 Diagram of grid-connected inverter

当GCI开关频率远高于并网电流基波频率时,其控制模型可由线性化平均开关模型表示如图2所示.其中: $G(s)$ 为系统控制器, $R$ 为电感 $L$ 的等效串联电阻, $K$ 为全桥电路PWM等效增益.

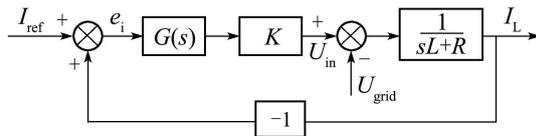


图2 线性控制模型

Fig. 2 Linear control model

图2中,电感等效串联电阻 $R$ 一般很小,为便于分析将其忽略.根据GCI线性控制模型可推出GCI输出交流电流为

$$I_L(s) = \frac{KG(s)}{Ls + KG(s)} I_{ref}(s) - \frac{1}{Ls + KG(s)} U_{grid}(s). \quad (1)$$

为了分析交流量控制的稳态误差,本文从线性系统叠加定理和频域分析角度出发,分别研究电流参考 $I_{ref}$ 和电网电压 $U_{grid}$ 对输出电流 $I_L$ 的影响.首先设 $U_{grid} = 0$ ,只考虑参考电流 $I_{ref}$ 的影响,此时输出电流幅频特性为 $|I_L(s)| = \left| \frac{KG(s)}{Ls + KG(s)} \right| |I_{ref}(s)|$ .根据复变函数理论,在电流基波角频率 $\omega$ 以外的任何频率处,参考电流 $I_{ref}$ 的幅频特性均为0,因此,对应的输出电流 $I_L$ 的幅频特性亦为0.而在基波角频

率 $\omega$ 处,若要实现电流控制的零稳态幅值误差,则必须满足: $|Ls + KG(s)|_{s=j\omega} = |KG(s)|_{s=j\omega}$ .而为有限值,所以必须满足 $|G(s)|_{s=j\omega} = \infty$ .

同理,对于相频特性,若满足 $|G(s)|_{s=j\omega} = \infty$ ,则有 $\varphi(\omega) = \angle \frac{KG(j\omega)}{jL\omega + KG(j\omega)} = 0$ .因此,只要控制器 $G(s)$ 在基波频率处具有无穷增益即可实现并网输出电流基波的零稳态幅值相位误差控制.

设 $I_{ref} = 0$ ,只考虑电网电压的影响,此时输出电流为 $I_L(s) = \frac{1}{Ls + KG(s)} U_{grid}$ ,根据上文的频域分析可知,只要满足 $|G(s)|_{s=j\omega} = \infty$ 即可将电网电压的扰动衰减为0.

传统的PI控制 $G(s) = k_p + k_i/s$ 控制并网电流存在稳态幅值和相位误差,其根源是其基波频率处增益为 $\sqrt{k_p^2 + (k_i/\omega)^2}$ ,不具有无穷增益特性.而比例谐振控制 $G(s) = k_p + \frac{2k_r s}{s^2 + \omega_0^2}$ 基波频率处具有无穷增益 $\sqrt{k_p^2 + \left(\frac{2k_r \omega_0}{-\omega_0^2 + \omega_0^2}\right)^2}$ ,使得闭环系统基波频率处的幅频特性为1,相频特性为0,因此可以实现并网电流的零稳态误差控制.

### 2.2 比例反馈积分控制(PFI control)

如图3所示,传统比例积分PI控制本质为比例误差积分PEI控制(虚线),而提出的PI控制本质为比例反馈积分PFI控制(实线).

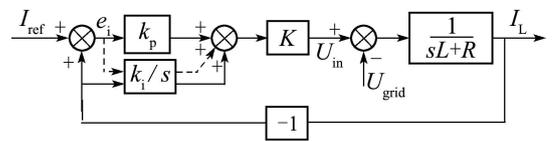


图3 PI控制模型

Fig. 3 PI control model

为便于分析,将较小值 $R$ 忽略.根据图3可推出PFI控制下的GCI输出电流为

$$I_L(s) = \frac{Kk_p s}{Ls^2 + Kk_p s + Kk_i} I_{ref}(s) - \frac{s}{Ls^2 + Kk_p s + Kk_i} U_{grid}(s). \quad (2)$$

根据上文线性叠加定理和频域分析,首先考虑参考电流 $I_{ref}$ 的影响.很明显,当 $L\omega^2 = Kk_i$ 成立时,闭环系统基波频率处的幅频特性为1,相频特性为0,即实现并网输出电流基波的零稳态幅值相位误差控制.然而在考虑电网电压 $U_{grid}$ 的影响时,在 $k_i = L\omega^2/K$ 成立的情况下,基波频率处电网电压

的扰动衰减 $1/Kk_p$ , 说明电网电压扰动不可忽略, 引起并网输出电流基波的稳态误差。

为了消除电网电压扰动影响, 引入电网电压前馈解耦方案. 如图4所示, 此时GCI输出电流为

$$I_L(s) = \frac{Kk_p s}{Ls^2 + Kk_p s + Kk_i} I_{ref}(s). \quad (3)$$

只要满足 $k_i = L\omega^2/K$ 即可实现并网电流的零稳态误差控制。

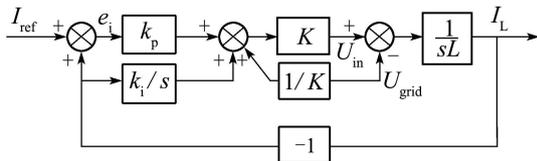


图 4 电网电压解耦PFI控制模型

Fig. 4 PFI control with grid voltage decoupling

此外, 提出的PFI控制还具有直流分量抑制特性. 导致直流分量的产生的原因一般可分为两大类: 1) 参考信号直流偏置、载波直流偏置等, 第1类均可等效为参考信号直流偏置; 2) 电网电压直流偏置, 电路不对称等, 第2类均可等效为电网电压直流偏置. 表1给出直流和基波频率处系统闭环频域分析的数据结果(系统参数见3).

表 1 频域分析数据

Table 1 Frequency-domain analysis data

	DC(0 Hz)		AC(50 Hz)	
	幅值/pu	相位/(°)	幅值/pu	相位/(°)
PEI	1	0	1.36	45
PR	1	0	1	0
PFI	0	90	1	0

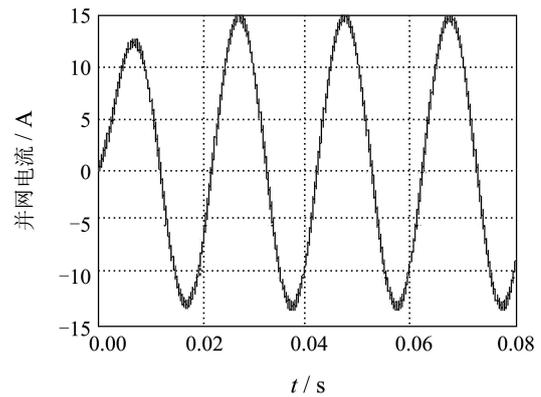
根据上文频域分析可知, 实现并网电流基波零稳态误差和直流分量抑制必须满足两个条件: 1) 基波处幅频特性为1, 相频特性为0; 2) 直流(0 Hz)幅频特性为0. 表1所示数据表明, PEI控制存在基波稳态误差, 且无直流抑制特性; PR控制虽然可实现基波零稳态误差, 但无直流抑制特性; PFI不仅可实现零稳态误差, 还具有直流抑制特性. 同理, 对于第2类直流偏置, PFI同样可以有效抑制。

对于三相GCI单元, 由于其第 $i(i = a, b, c)$ 相并网电流的线性控制模型均可由图4表示, 因此, 上文提出的PFI控制可直接应用到三相并网系统。

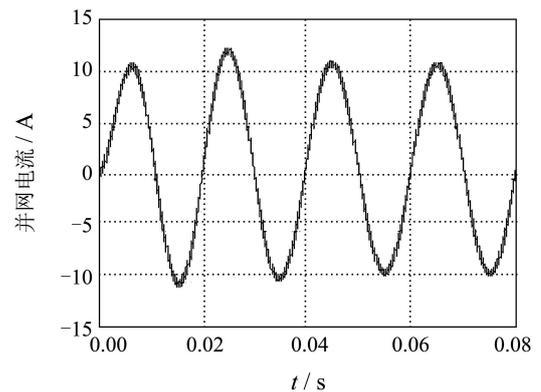
### 3 仿真实验(Simulation verification)

本文采用MATLAB R2006a/SimPowerSystems对PFI控制的有效性进行仿真验证, 系统参数如下: 电网电压(单相220 V)/(三相380 V), 直流母线电压(单相400 V)/(三相800 V), 额定并网电流10 A, 滤波电感3 mH, 开关频率20 kHz, 比例系数0.0025, 积分系数0.74.

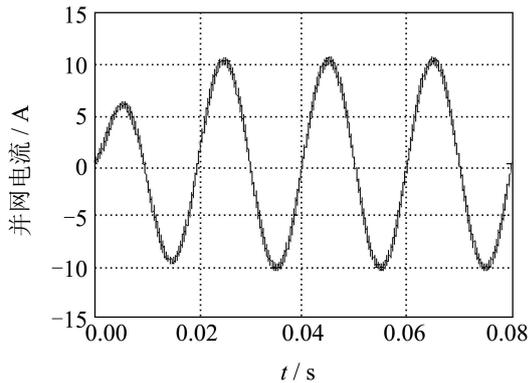
本文以第1类直流偏置, 即等效参考信号直流偏置(DC= 1 A)为例进行测试. 电网电压解耦后PEI, PR和PFI并网电流控制的仿真结果如图5所示. 和表1频域分析一致, 由于PEI, PR闭环控制系统直流幅频特性为1相频特性为0, 因此直流分量将无衰减地通过闭环系统反映在输出端, 造成图5(a), 5(b)中并网电流存在1 A的直流分量. 而PFI闭环控制系统直流幅频特性为0, 不论相频特性如何, 直流分量将被闭环系统完全衰减, 因此并网电流的直流分量可以得到有效抑制. 和表1频域分析一致, 不考虑直流偏置时, 稳态情况PI控制幅值为1.36 pu, 相位差45°. PR控制和PFI控制幅值均为1.0 pu, 相位差0°, 但PR控制存在超调且暂态响应40 ms, 而PFI控制无超调, 20 ms后进入稳态, 仿真结果验证了PFI控制具有良好的稳态性能和动态性能。



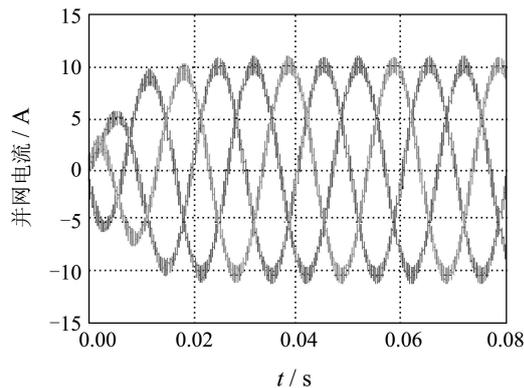
(a) PEI (单相GCI)



(b) PR(单相GCI)



(c) PFI(单相GCI)



(d) PFI(三相GCI)

图5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results

实际应用中系统参数可能存在一定波动,其是否影响PFI控制的精确度?表2列出3种情况下PFI控制的误差分析.可以看出,并网电流控制精度在系统参数变化时精度仍然很高,实际应用中,电感及其等效串联电阻一般变化不大,电网频率波动范围一般小于0.5 Hz,因此实际应用中PFI控制精度比表2列出的精度高.

表2 PFI控制误差分析

Table 2 Error analysis of PFI control

系统参数	电流幅值/pu	电流相位/(°)
电感变化(0.3 mH)	0.996	-5.4
串联电阻变化(10 mΩ)	0.991	0
电网频率变化(0.5 Hz)	0.990	1.2

## 4 结论(Conclusion)

本文通过理论分析和仿真结果得出以下结论:

- 1) 比例反馈积分PFI控制可实现并网交流电流的零稳态误差控制.
- 2) 比例反馈积分PFI并网电流控制具有直流抑制特性.
- 3) 系统参数在一定范围内波动不会影响PFI控制的精度.
- 4) 提出的PFI控制不仅适用于单相并网逆变控制系统,还适用于三相系统.

## 参考文献(References):

- [1] 张淼, 刘立强. 光伏三相并网系统的自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 175 - 177.  
(ZHANG Miao, LIU Liqiang. Disturbance rejection controller for photovoltaic three-phase grid-connected system[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 175 - 177.)
- [2] 郑家伟. 新能源发电系统中的电力电子变换器[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 125 - 132.  
(ZHENG Jiawei. Switched mode power conversion for alternative energy[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 125 - 132.)
- [3] INFIELD D G, ONIONS P, SIMMONS A D, et al. Power quality from multiple grid-connected single-phase inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(4): 1983 - 1989.
- [4] ZMOOD D N, HOLMES D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2001, 18(3): 814 - 822.
- [5] SALAS V, ALONSO A M, OLIAS E, et al. DC current injection into the network from PV inverters of less than or equal 5 kW for low-voltage small grid-connected PV systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, 91(9): 801 - 806.

## 作者简介:

**郭小强** (1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式发电系统并网控制及谐波抑制, E-mail: yeduming@163.com;

**郭伟扬** (1940—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高频功率变换、功率因数校正、牵引电力传动等;

**顾和荣** (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电系统并网控制技术、电能质量控制技术等;

**王立乔** (1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高频功率变换、多电平变流技术、有源电力滤波技术等;

**赵清林** (1969—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为逆变器并联与并网技术、功率因数校正、有源滤波等.