

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.1.11

# PI 参数自整定模糊光伏并网控制

陈拉拉, 王蔚\*

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 针对电网谐波, 在 PI 控制基础上加入模糊控制, 根据采样误差实时调整 PI 参数, 从而减小控制误差, 提高并网电流质量。仿真比较了在电网含有谐波情况下, PI 控制、重复补偿 PI 控制和 PI 模糊控制的电流输出结果。

**关键词:** 模糊控制; 参数调整; Simulink

**中图分类号:** TM 615    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-1374(2018)01-0061-07

## PI parameters self-adjustment fuzzy PV grid control

CHEN Lala, WANG Wei\*

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** For grid harmonic, PI control is combined with fuzzy control. PI parameters are adjusted in real time according to the sampling errors, to decrease the control error and improve the grid current quality. Simulation is carried to compare the grid current output with three control methods such as PI control, PI & repeat control and PI & fuzzy.

**Key words:** fuzzy control; parameter adjustment; Simulink.

### 0 引言

受到环境污染和化石能源有限性的制约, 开发利用新能源逐渐受到世界各国的广泛关注<sup>[1]</sup>。在光伏发电过程中, 逆变控制作为重要的一环, 其控制的好坏直接影响发电的质量。常见的控制方式有比例积分(PI)控制、比例谐振(PR)控制、重复控制和模糊控制等<sup>[2-3]</sup>。比例积分控制简单, 动态响应迅速, 但存在稳态误差; 比例谐振控制在基

波频率处具有高增益, 可以减小并网电流稳态误差; 重复控制可改善系统静态特性, 缺点是动态响应较差; 模糊控制不需要精确的系统模型, 适合非线性系统调节。当电网含有谐波时, 传统 PI 控制误差较大, 通过将模糊控制和传统 PI 控制相结合, 构成 PI 参数自整定模糊控制器, 把采样误差送模糊控制器处理, 通过对 PI 参数实时修改, 进一步减小并网电流的误差。

收稿日期: 2017-10-13

基金项目: 吉林省重大科技攻关项目(20140204031GX)

作者简介: 陈拉拉(1994-), 男, 汉族, 江苏徐州人, 长春工业大学硕士研究生, 主要从事电力变换技术与新能源开发方向研究, E-mail:1031390578@qq.com. \* 通讯作者: 王蔚(1976-), 男, 汉族, 吉林长春人, 长春工业大学副教授, 硕士, 主要从事电力变换与新能源开发方向研究, E-mail:wangwei@ccut.edu.cn.

## 1 系统原理及 $dq$ 坐标系下解耦

三相逆变光伏并网系统控制原理图如图 1 所示。

### 1.1 系统原理

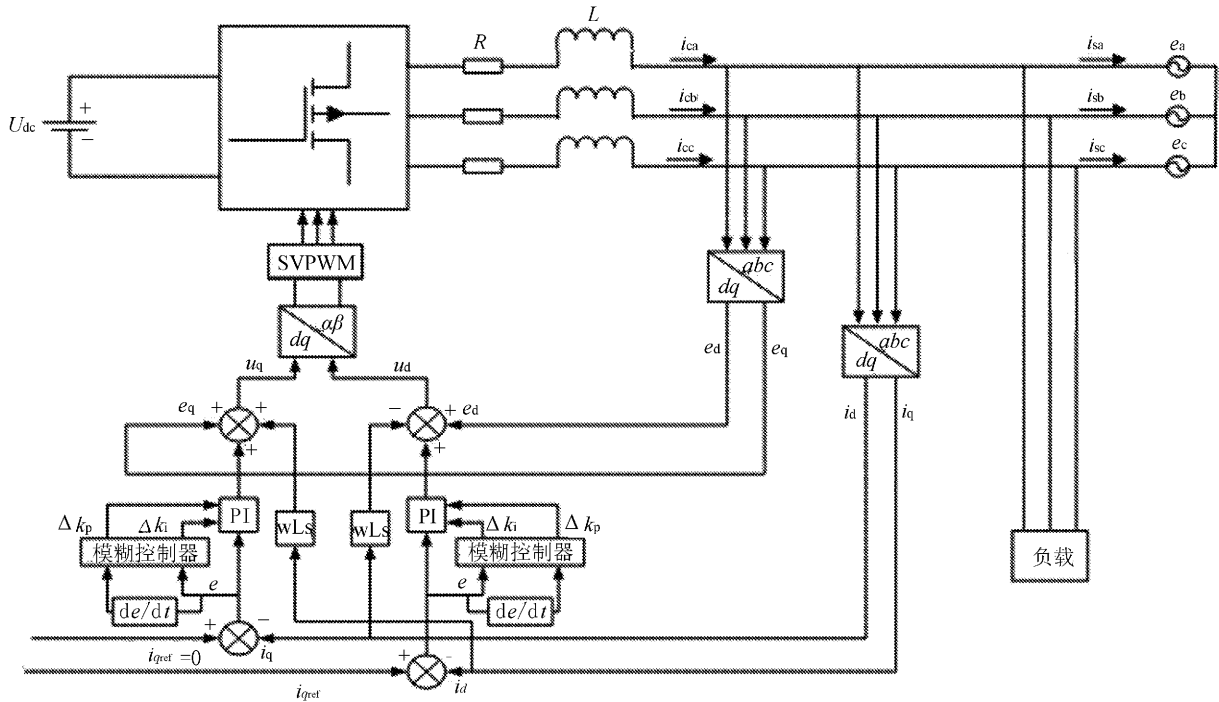


图 1 系统控制原理图

图中,滤波器为一阶  $L$  滤波,输出接本地负载和电网。通过坐标变换,将系统从三相自然坐标转换到两相旋转坐标,可直接控制逆变器有功和无功电流,采用 PI 控制即可实现并网电流基波无静差调节<sup>[4]</sup>。电压外环产生有功电流给定值  $I_{dref}$  和经坐标变换采样的有功电流实际值作差,误差送 PI 调节器;为实现高功率因数并网,将无功电流给定值  $I_{qref}$  设为零,同样和采样的实际无功电流作差,误差送 PI 调节器;当电网为理想状态时,PI 调节即可达到理想的并网效果,但现实电网多存在扰动,普通 PI 存在局限性,在本系统中,用 PI 参数自整定模糊控制器代替常规的 PI 控制器,在 PI 控制的基础上,通过模糊控制对比例、积分参数实时修改,参数修改后的 PI 控制器输出控制量经过解耦控制和坐标变换,最后经 SVPWM<sup>[5]</sup> 模块产生控制信号,经驱动电路送入逆变器,进行并网逆变控制。

### 1.2 $dq$ 坐标下解耦

$dq$  坐标下三相并网逆变器的数学模型为

$$\begin{cases} e_d = u_d - i_d R - L \frac{di_d}{dt} + \omega L i_q \\ e_q = u_q - i_q R - L \frac{di_q}{dt} - \omega L i_d \end{cases} \quad (1)$$

由于  $d$  轴中存在  $i_q$  分量,  $q$  轴中存在  $i_d$  分量,两者耦合,这会加大设计电流调节器难度,需要对两者解耦,把式(1)变为:

$$\begin{cases} i_d R + L \frac{di_d}{dt} = u_d + \omega L i_q - e_d \\ i_q R + L \frac{di_q}{dt} = u_q - \omega L i_d - e_q \end{cases} \quad (2)$$

令:

$$\begin{cases} u'_d = u_d + \omega L i_q - e_d \\ u'_q = u_q - \omega L i_d - e_q \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2):

$$\begin{cases} i_d R + L \frac{di_d}{dt} = u'_d \\ i_q R + L \frac{di_q}{dt} = u'_q \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,把  $u'_d$  和  $u'_q$  作为等效电流变量时,  $d$  轴与  $q$  轴实现了独立控制,  $u'_d$  与  $u'_q$  由

电流环 PI 控制器产生<sup>[6]</sup>, 即:

$$\begin{cases} u'_d = \Delta u_d = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi} s}\right) (i_d^* - i_d) \\ u'_q = \Delta u_q = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi} s}\right) (i_q^* - i_q) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\Delta u_d, \Delta u_q$  —— PI 调节器  $d$  轴和  $q$  轴分量的输出;

$\tau_{pi}$  —— 积分时间常数;

$i_d^*, i_q^*$  ——  $d$  轴和  $q$  轴电流给定值。

可得控制变量  $u_d$  和  $u_q$  的控制方程为:

$$\begin{cases} u_d = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi} s}\right) (i_d^* - i_d) - \omega L i_q + e_d \\ u_q = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi} s}\right) (i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (6)$$

通过以上推导, 借助引入电流状态反馈, 实现  $dq$  解耦, 方便环路设计。

## 2 PI 参数自整定模糊控制器设计

传统 PI 控制器的比例和积分参数是固定的, 当电网扰动较大, 其控制误差偏大。文中所设计的 PI 参数自整定控制器在 PI 控制的基础上, 通过模糊控制器对比例和积分参数进行实时修改, 从而减小跟踪误差, 提高并网电流质量。

### 2.1 模糊控制器结构原理设计

PI 参数自整定模糊控制器如图 2 所示。

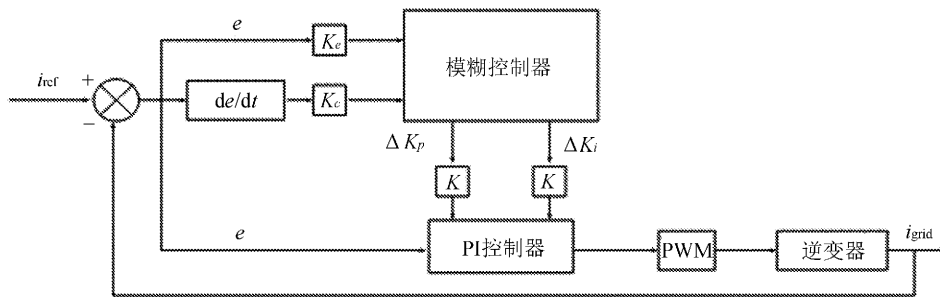


图 2 PI 参数自整定模糊控制

PI 参数自整定模糊控制器原理为: 采样获得并网电流给定值和实际值比较作差, 误差  $e$  送 PI 控制器; 误差变化率  $de/dt$  和误差  $e$  分别乘以系数  $K_c$  和  $K_e$  送模糊控制器, 通过每个采样周期的采样数据, 模糊控制器产生比例和积分系数修正量  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  分别乘以系数  $K$  送入 PI 控制器, 进行在线修改<sup>[7]</sup>, 一个采样周期后的  $K_p$  值为:

$$K_{p1} = K_{p0} + \Delta K_p * K$$

最后, PI 控制器输出信号经 PWM 调制后通过驱动电路进行逆变控制。

### 2.2 模糊控制规则

模糊控制规则是模糊控制器的核心, 通过对输入、输出变量词集的编辑来决定控制器的控制精度。文中模糊控制器为双输入、双输出结构, 即误差  $e$  和误差变化率  $de/dt$  作为输入, 比例系数修正量  $\Delta K_p$  和积分系数修正量  $\Delta K_i$  作为输出。词集包含 7 个词汇: 分别是[负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大], 即[ $NB, NM, NS, ZE, PS,$

$PM, PB$ ], 控制器的 4 个变量都采用这个结构。

确定词汇集后可进行隶属度函数编辑, 具体操作在 Matlab 中的模糊逻辑工具箱实现。文中词汇集含有 7 个词汇, 故需要编辑 7 个隶属度函数, 4 个变量的论域均为  $[-6, 6]$ , 以其中一个为例, 隶属度函数见表 1。

表 1 隶属度函数

名称	类型	参数
NB	zmf	$[-6, -2]$
NM	trimf	$[-6, -4, 0]$
NS	trimf	$[-6, -2, 2]$
ZE	trimf	$[-4, 0, 4]$
PS	trimf	$[-2, 2, 6]$
PM	trimf	$[0, 4, 6]$
PB	smf	$[2, 6]$

通过分析 PI 参数对系统控制精度的影响, 建

立误差  $e$  和误差变化率  $\Delta e/\Delta t$  对比例系数修正量  $\Delta K_p$  和积分系数修正量  $\Delta K_i$  的模糊规则, 见表 2。

表 2  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  模糊控制规则

$e_c$	$e$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZE/ZE	ZE/ZE
NM	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	ZE/ZE	NS/ZE
NS	PM/NB	PM/NM	PM/NS	PS/NS	ZE/ZE	NS/PS	NS/PS
ZE	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZE/ZE	NS/PS	NM/PM	NM/PM
PS	PS/NM	PS/NS	ZE/ZE	NS/PS	NS/PS	NM/PM	NM/PB
PM	PS/ZE	ZE/ZE	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PB	NB/PB
PB	ZE/ZE	ZE/ZE	NM/PS	NM/PM	NM/PM	NB/PB	NB/PB

以上规则可在 Matlab 中的模糊逻辑工具箱中, 通过规则编辑器以 If...Then 的形式进行模糊规则编辑。

### 2.3 解模糊化设计

解模糊化就是将模糊控制器产生的模糊量转化为参与控制的精确量, 文中采用加权平均法解模糊, 具体可在 Matlab 的模糊逻辑工具箱中选择需要的方法, 算法如下:

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} \mu_{pj}(\Delta K_p) \Delta K_{pj}}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{pj}(\Delta K_p)}$$

## 3 重复补偿 PI 控制器

重复补偿 PI 控制器如图 3 所示。

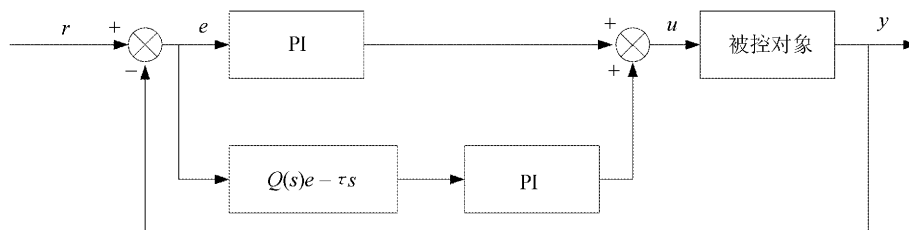


图 3 重复补偿 PI 控制器

由图 3 可以看出, 送入被控对象的控制量除了误差  $e$  的 PI 整定量, 还叠加了一个上一周期的误差, 通过把上个采样周期的误差和当前采样的误差经处理后一起送被控对象, 将这种方式叫做重复控制。其中  $Q(s)$  为低通滤波器, 一般  $Q(s) = 1/(1 + T_q s)$ 。

## 4 仿真验证

借助 Simulink 工具箱进行仿真系统搭建, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 通过加入谐波源验证在电

网扰动的情况下, 将传统 PI 控制、重复补偿 PI 控制和 PI 参数自整定模糊控制三种方法作比较。系统仿真设置如下, 光伏阵列输出电压 370 V, 经 Boost 电路升压至 700 V 供逆变桥; 滤波电感  $L = 3 \text{ mH}$ ,  $R = 0.01 \Omega$ ; 交流侧三相电压有效值 220 V, 频率 50 Hz; 谐波源设置为 3 次谐波电压幅值 30 V, 5 次谐波电压幅值 25 V; 模糊控制器参数  $K_e = K_c = 3$ ,  $K = 0.1$ ; PI 控制器初始值  $K_p = 20$ ,  $K_i = 10$ ; 仿真时间设置为 0.3 s; 调制方式为 SVPWM<sup>[8]</sup>。通过仿真分别得出 3 种控制方式下的并网电流和并网电流谐波分析。

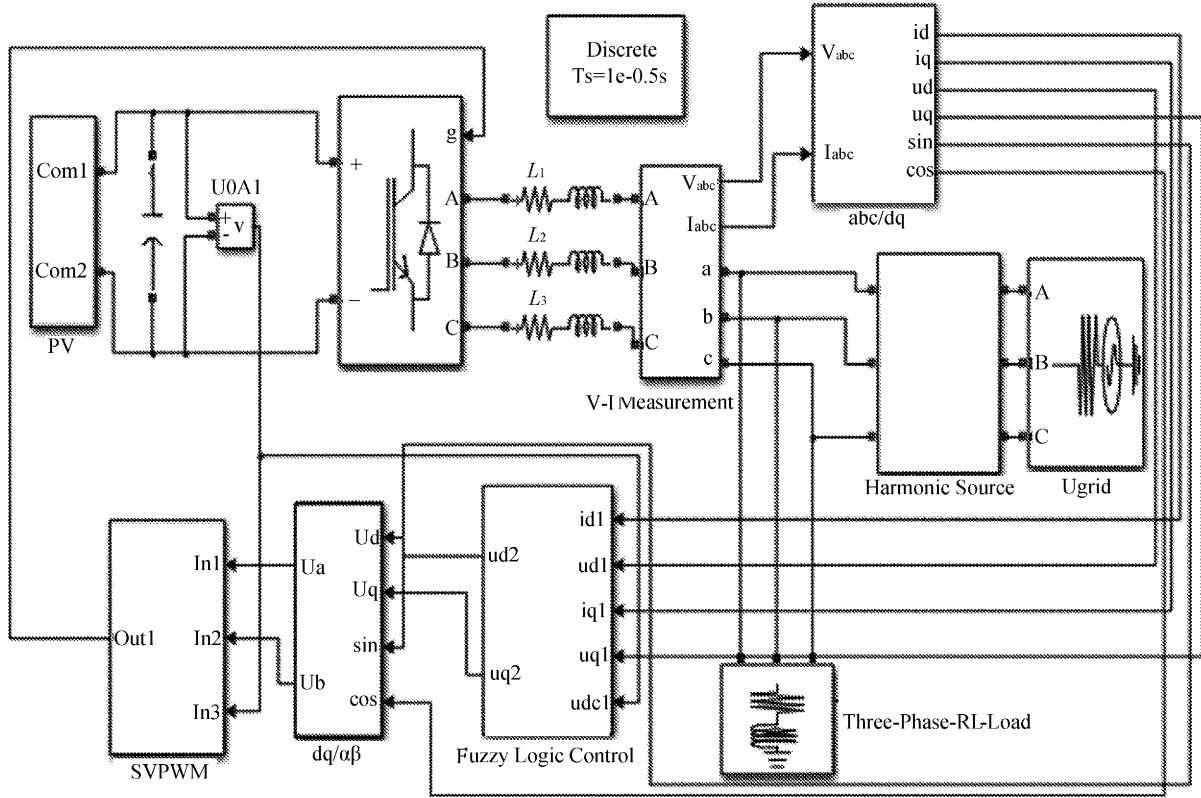
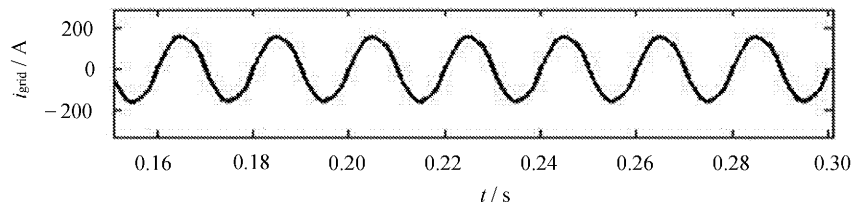


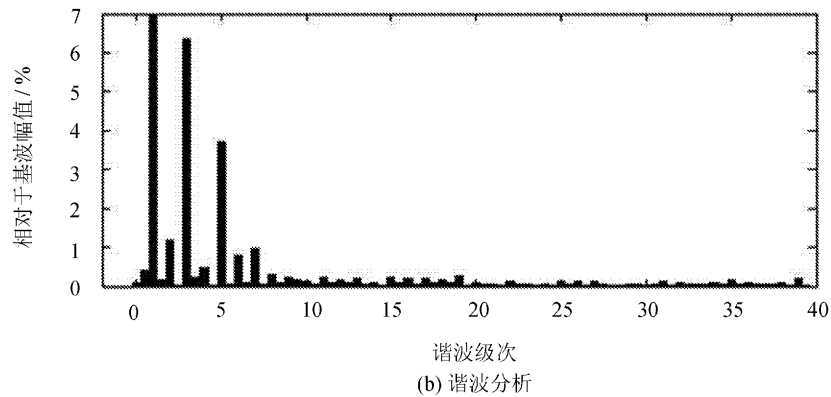
图 4 Simulink 系统模型搭建

传统 PI 控制、重复补偿 PI 控制和 PI 参数自整定模糊控制分别如图 5~图 7 所示。



(a) 并网电流

Fundamental (50 Hz) = 159.9, THD=4.78%



(b) 谐波分析

图 5 传统 PI 控制

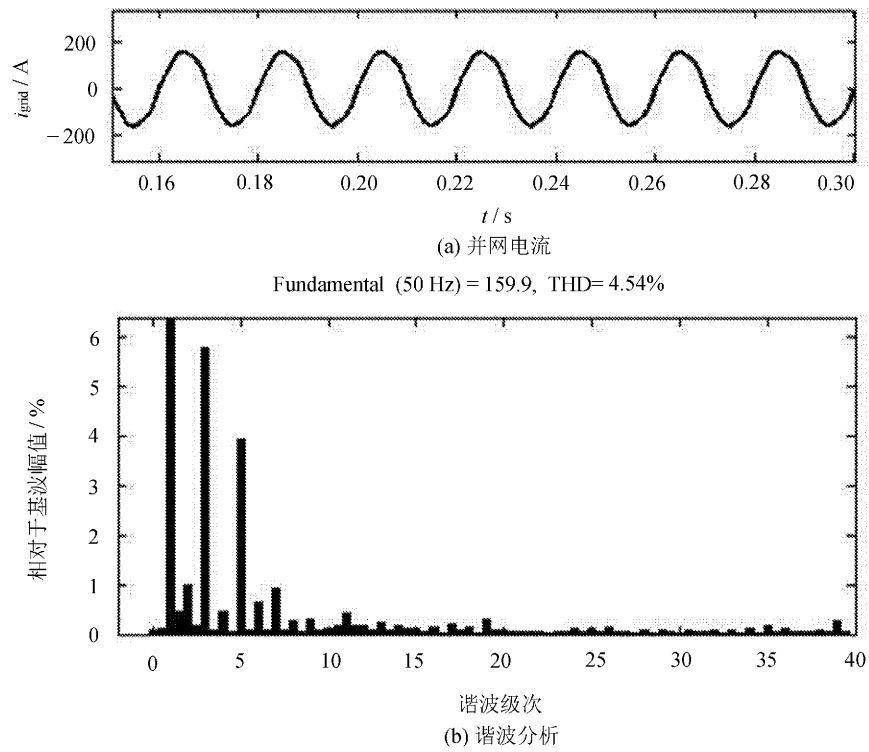


图 6 重复补偿 PI 控制

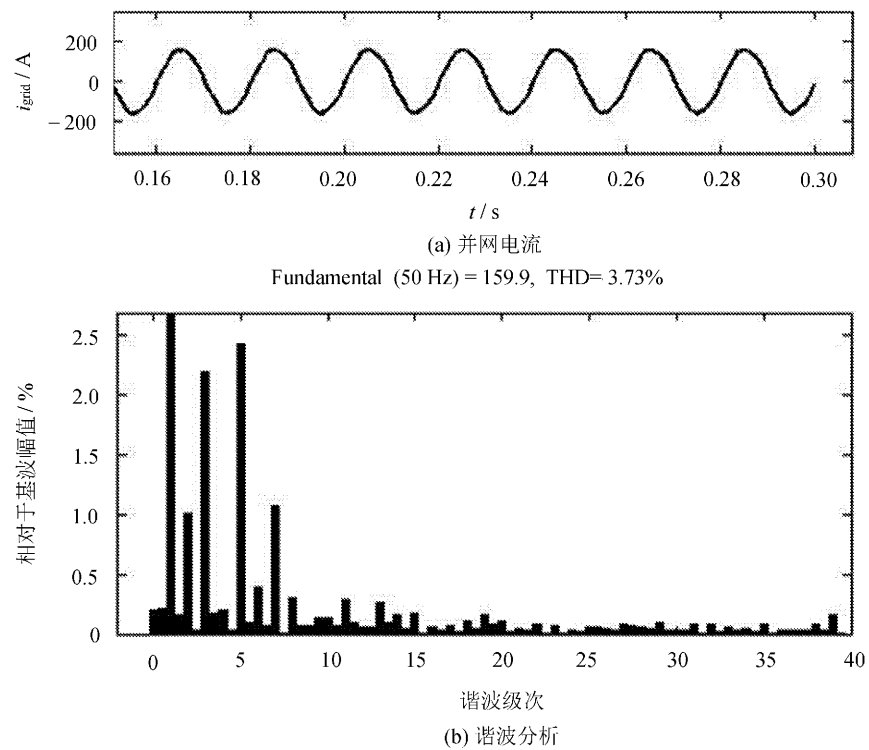


图 7 PI 参数自整定模糊控制

从图 5~图 7 可以看出,当电网含有谐波时,传统 PI 控制、重复补偿 PI 控制和 PI 参数自整定模糊控制电流总谐波畸变率分别为 4.78%、

4.54%和 3.73%,而且传统 PI 控制和重复补偿 PI 控制的 3 次、5 次谐波含量明显高于 PI 参数自整定模糊控制,所以 PI 参数自整定模糊控制的整体

控制效果要优于其他两种。通过仿真表明,文中所提出的控制策略相比传统 PI 控制和重复补偿 PI 控制在电网扰动情况下具有一定的优越性。

## 5 结 语

借助 Simulink 工具箱设计了 PI 参数自整定模糊控制器,当电网存在谐波时,对传统 PI 控制、重复补偿 PI 控制和 PI 参数自整定模糊控制三种方法进行了对比,仿真结果表明,当电网含有一定 3 次、5 次谐波时,采用 PI 参数自整定模糊控制的系统,整体控制效果优于其他两种控制方式,验证了所提控制策略的可行性。

### 参考文献:

- [1] 曾正,赵荣祥,汤胜清,等.可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(24):1-12.
- [2] 滕国飞,肖国春,张志波,等.采用重复控制的 LCL 型并网逆变器闭环电流控制[J].中国电机工程学报,2013,33(24):13-21.
- [3] 顾和荣,王德玉,沈虹,等.三相四桥臂逆变器控制技术研究[J].电力系统保护与控制,2012,39(24):41-46.
- [4] 阮新波,王学华.LCL 型并网逆变器的控制技术[M].北京:科学出版社,2015.
- [5] 李波,安群涛,孙兵成.空间矢量脉宽调制的仿真研究及实现[J].电机与控制应用,2006,33(6):40-44.
- [6] 朱晓亮.基于电网电压定向三相并网逆变器的研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.
- [7] 杜佳妮.基于自适应模糊控制的并网逆变器控制策略分析与研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [8] 郁琰.基于 SVPWM 的交流调速系统仿真[J].长春工业大学学报:自然科学版,2012,33(6):667-671.