

基于模糊 PI 控制算法的微电网并网控制策略研究

李 诚¹, 陈定辉¹, 涂 勇¹, 杨少智¹, 付文雯², 曾成碧²

(1. 国网四川电力公司凉山供电公司, 四川西昌 615000;

2. 四川大学电气信息学院, 四川成都 610065)

Study of the Grid-connected Control Strategy for Micro-grid Based on Fuzzy PI Control

LI Cheng¹, CHEN Dinghui¹, TU Yong¹, YANG Shaozhi¹, FU Wenwen², ZENG Chengbi²

(1. Sichuan Electric Power Company, Liangshan Power Supply Company, Xichang, 615000, China;

2. Electrical and Information College of Sichuan University, Chengdu, 610065, China)

摘 要: 由于微电网的逆变输出波形和功率因数效果不理想, 本文提出了基于模糊 PI 控制的双闭环微电网并网逆变控制策略, 结合了模糊控制和 PI 控制的优点, 实现双闭环控制。仿真结果表明, 新控制策略控制性能良好: 并网电流和大电网电压保持同相位, 并网功率因数较高, 并网电流最大谐波畸变率降低, 滤波效果非常理想。

关键词: 模糊 PI 控制; 微电网; 双闭环控制; 并网逆变器

Abstract: In this paper, due to unsatisfactory output waveform of inverter and bad power factor of micro-grid, a double closed-loop control strategy for the micro-grid inverters is presented based on combining the advantages of fuzzy control and PI control to realize double-loop control. Simulation results show that the proposed control method has good control performance, can maintain the same phase of grid-connected current as that of grid voltage, provides higher power factor, reduces the maximum harmonic distortion rate of the grid-connected current, and achieves extremely ideal filtering effect.

Keywords: fuzzy PI control; micro-grid; double closed loop control; grid connected inverter

0 引 言

微电网是有效利用可再生能源的措施之一, 微电网并入大电网才能保证供电可靠性^[1], 良好的逆变控制策略是微电网电能质量的保证^[2-4]。采用 LCL 滤波器的并网逆变器双闭环控制技术输出电压波形较好^[5-6]。本文结合模糊控制与 PI 控制, 实现微电网的逆变器双闭环控制。

基金项目: 四川省科技支撑项目(2014GZ0069)

1 微电网并网运行模式

微电网并网运行就是通过公共连接点与大电网连接, 如图 1 所示, 与外部电网并联运行时, 并网电压受大电网钳制而不变。单相并网逆变器把微电源输出的直流电转换成满足系统要求的交流电, 经过 LCL 滤波器, 改善电能质量, 接入外部电网, 微电网也为自身的交流负荷供电。微电网并网运行时, 控制系统采集并网电流作为控制信号, 控制器的输出信号再经过高频脉宽调制(PWM)对并网逆变器进行控制, 在保证输出高功率因数的同时, 使逆变器输出接近正弦波的电流^[2]。

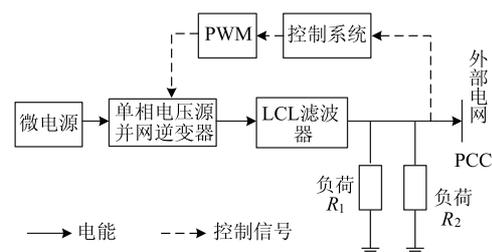


图 1 并网逆变器控制系统结构图

2 模糊 PI 控制算法

模糊控制是以模糊集合理论为基础的一种专家控制系统^[7]。常规 PI 控制采用固定不变的 PI 参数难以适应变化的环境。当偏差绝对值较大时, 比例系数 k_p 难以获得较好的响应特性。而采用模糊 PI 控制综合 PI 控制与模糊控制的优点, 响应速度更快, 输出波动更小。设模糊控制器的两个输入量为

误差 $e(k)$ 和误差变化率 $\Delta e(k)$ ^[7]，其表达式为

$$e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = \frac{di(k)}{dt} = \frac{i(k) - i(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \quad (2)$$

该系统是一个双输入双输出系统，输入包括误差 $(e(k))$ 和误差变化率 $(\Delta e(k))$ ，通过模糊规则调节 Δk_p 和 Δk_i ，从而调节 k_p 和 k_i 。本文选择并网电流作为控制信号，那么输入是并网电流误差及误差变化率，即 $e(k) = i_2 - i_{ref}$ 及其误差变化率。输入输出一共有 4 个变量，定义其模糊集合为 $\{PB, PS, ZE, NS, NB\}$ 。如图 2 是输入输出的隶属度函数，除 PB 和 NB 为梯形隶属度函数外，其余均为三角隶属度函数。采用 Mamdani 模糊推理方法，以输出电流能快速达到给定值为目标，建立模糊规则。图 3 是 k_p 和 k_i 的输出曲面图。

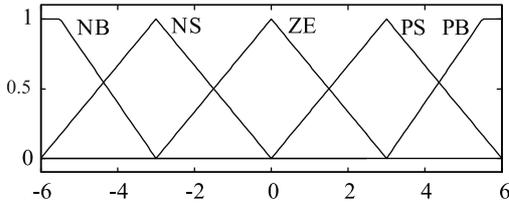


图 2 输入输出的隶属度函数

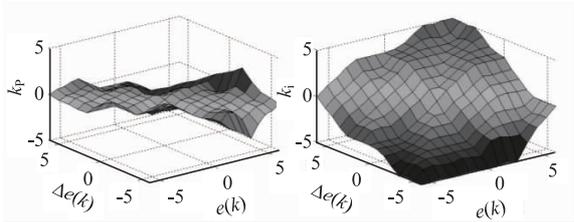


图 3 k_p 和 k_i 的输出曲面

3 基于模糊控制的并网电流外环和电容电流内环的双闭环控制策略

基于 LCL 滤波器的单相并网逆变器如图 4 所示。图 4 中 U_{dc} 代表微电网中的发电系统输出的直

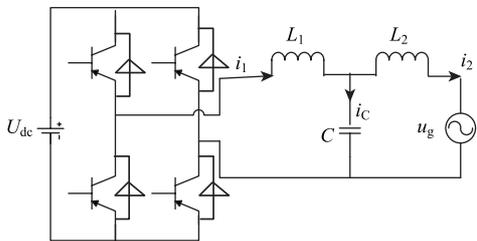


图 4 并网逆变器控制系统等效电路图

流电源， i_1 是逆变器输出电流， i_2 是并网电流， i_c 是流经滤波器电容的分电流， u_g 是电网电压。

将逆变器的输出电压 u_i 作为输入，并网电流 i_2 作为输出，根据基尔霍夫定律，LCL 滤波器的暂态方程如下(忽略寄生电阻)：

$$\begin{cases} u_i(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + u_c(t) \\ u_c(t) = L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + u_g(t) \\ i_1(t) = i_2(t) + i_c(t) \\ i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

低频情况下 LCL 滤波器相当于一个单电感滤波器，其电感值 L 为 $L_1 + L_2$ ，其开环传递函数为

$$G(s) = \frac{I_2(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{s^3 L_1 L_2 C + s(L_1 + L_2)} \quad (4)$$

本文采用的双闭环控制系统是以电容电流作为内环，并网电流 i_2 作为外环。控制框图如图 5 所示， i_{ref} 是 i_2 的电流参考值，其中 $k_p + k_i/s$ 是 PI 控制器， $k_0 = k \times k_{PWM}$ ， k_{PWM} 只与并网逆变器本身有关， k 作为加入电容电流反馈之后的增益，可调节。

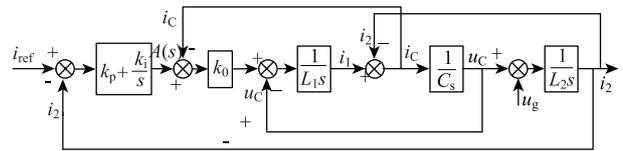


图 5 采用 LCL 滤波的双闭环并网控制结构图

电容电流作为内环和并网电流作为外环的双闭环 PI 控制器的开环传递函数为

$$G_K(s) = \frac{kk_{PWM}}{L_1 L_2 C s^3 + kk_{PWM} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2)s} \quad (5)$$

当采用 PI 控制器后，开环传递函数为

$$G_H(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) G_K(s) = \frac{kk_{PWM}(k_p s + k_i)}{L_1 L_2 C s^4 + kk_{PWM} L_2 C s^3 + (L_1 + L_2)s^2} \quad (6)$$

则闭环传递函数：

$$G(s) = \frac{kk_{PWM}(k_p s + k_i)}{L_1 L_2 C s^4 + kk_{PWM} L_2 C s^3 + (L_1 + L_2)s^2 + kk_{PWM} k_p s + kk_{PWM} k_i} \quad (7)$$

其特征方程如(8)式：

$$D(s) = L_1 L_2 C s^4 + kk_{PWM} L_2 C s^3 + (L_1 + L_2)s^2 + kk_{PWM} k_p s + kk_{PWM} k_i \quad (8)$$

根据劳斯-赫尔维茨稳定性判据，系统稳定条件

$$L_1 + L_2 - k_p L_1 > 0$$

$$k_p(L_1 + L_2) - kk_{PWM}k_iL_2C - k_p^2L_1 > 0 \quad (9)$$

可见系统是条件稳定的，与控制器参数的设置有关，参数 k_p 、 k_i 直接影响系统的稳定性和动态性能， k_p 和 k_i 必须满足稳定条件(9)式。

利用模糊 PI 控制器实现并网电流外环 i_2 和电容电流内环 i_c 的双闭环控制策略，将并网电流外环 i_2 的 PI 控制器改为模糊 PI 控制器，如图 6 所示。当系统中有较多非线性器件和在外界条件不断变化的情况，该控制器能够不断在线通过模糊规则调节 Δk_p 和 Δk_i ，进而修正 PI 控制器的比例和积分系数(即 k_p 和 k_i)。采用该控制器的双闭环控制系统具有更好的动态和鲁棒性能。为保证系统满足劳斯稳定性判据，比例和积分调节系数仍应满足式(9)。

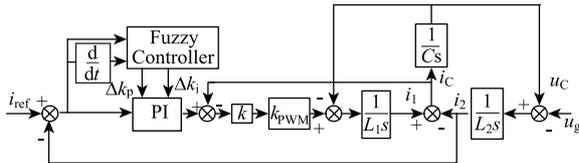


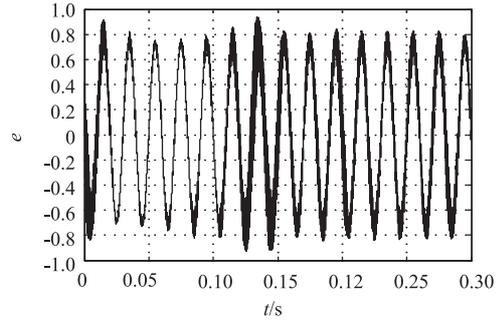
图 6 基于模糊控制的双闭环控制策略结构框图

4 系统仿真

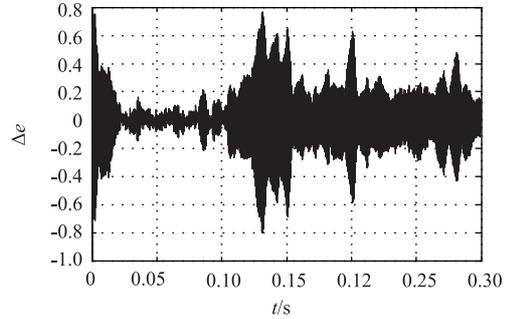
本文基于 MATLAB/Simulink 平台做了相关仿真研究，包含一个 400V 的直流电源(U_{dc})，该直流电源用以代替微电网中其他形式的电源；逆变器为单相电压源型全桥逆变器，采用绝缘栅双极晶体管；滤波器采用 LCL 型滤波器，参数分别为^[6]： $L_1=2\text{mH}$ ， $L_2=4\text{mH}$ ， $C=2\mu\text{F}$ ；电网电压为一个幅值为 311V、频率为 50Hz 的交流电压，微电网本地负载 $R=4.84\Omega$ 。PI 控制器的参数： $k_p=2.43$ ， $k_i=98.1$ ； k 比例系数的值为 100。

模糊控制器根据不断地检测 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ ，对比例和积分系数进行模糊调整，系统仿真时间为 0.3s，首先得到模糊控制器双输入 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的波形以及输出 Δk_p 和 Δk_i 的波形图，如图 7 和图 8 的(a)和(b)所示，可以看出输出的 Δk_p 和 Δk_i 这两个调节系数的变化较小， k_p 和 k_i 系数只进行了微调，不会破坏劳斯-赫维茨稳定性判据，即仍然满足式(9)，所以不影响系统的稳定条件。

通过对比发现，基于模糊控制的双闭环控制系统，具有很好的控制性能，如图 9 所示，其中 i_{2f} 指模糊控制，表明这两种控制方法都具有很好的控制效果，放大图形可知模糊 PI 控制的输出电流波形更

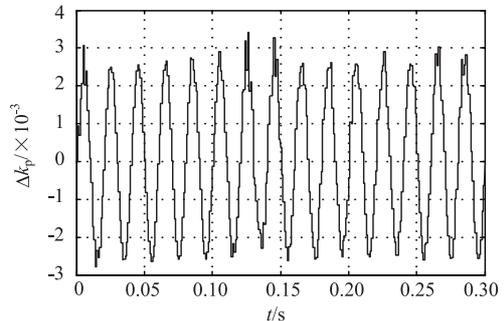


(a) $e(k)$ 波形

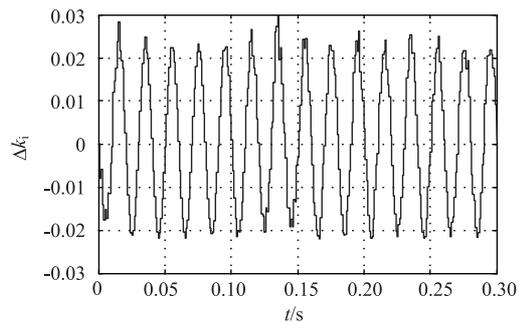


(b) $\Delta e(k)$ 波形

图 7 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 波形图



(a) Δk_p 波形图



(b) Δk_i 波形图

图 8 Δk_p 和 Δk_i 波形图

好。仿真数据表明，双闭环并网电流最大谐波畸变率 (THD) 为 0.49%，模糊 PI 控制的并网电流最大谐波畸变率为 0.04%，如图 10 所示，模糊 PI 控制滤波效果非常理想。由图 11 可知模糊 PI 控制能使并网电流和大电网电压保持同相位，提供很高的并网功率

因数。

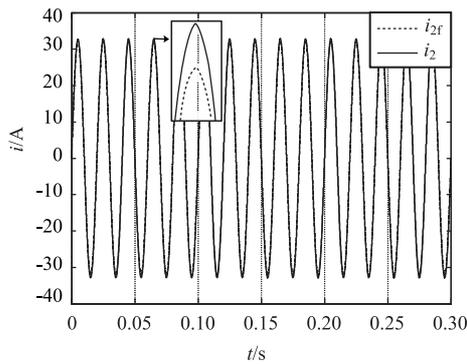
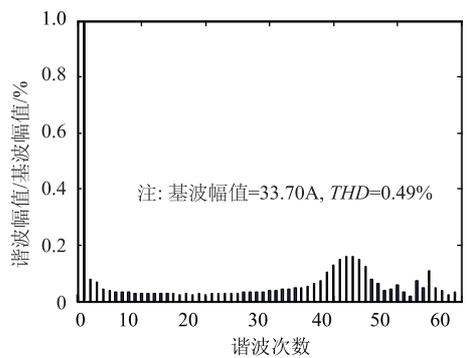
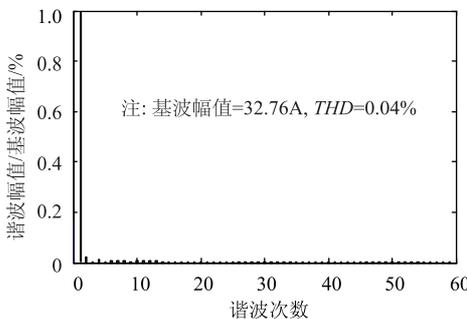


图 9 模糊控制和双闭环控制的并网电流波形图



(a) 双闭环控制



(b) 模糊PI双闭环控制

图 10 并网电流谐波分析图

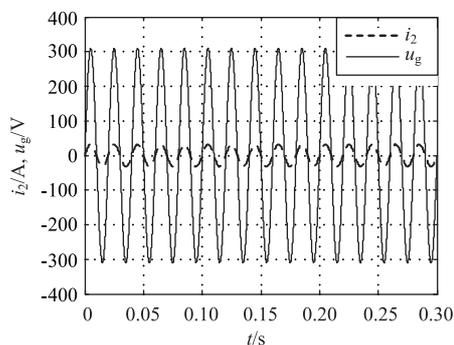


图 11 并网电流和大电网电压波形图

5 结束语

本文中微电网并网逆变控制采用模糊 PI 双闭环控制器，结合了模糊控制和 PI 控制的优点，仿真结果验证了基于模糊控制的双闭环并网控制策略控制性能更好，并网电流和大电网电压保持同相位，提供很高的并网功率因数，并网电流谐波畸变率低，滤波效果非常理想，有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 王成山, 李鹏. 分布式电网、微网和智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
- [2] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
- [3] Russel J Kerkman, David Leggate, David W Schlegel, et al. Effects of parasitics on the control of voltage source inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 140-150.
- [4] Serpa L A, Kolar J W, Ponnaluri S, et al. A modified direct power control strategy allowing the connection of three-phase inverter to the grid through LCL filter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 43(5): 1388-1400.
- [5] 徐志英, 许爱国, 谢少军. 采用 LCL 滤波器的并网逆变器双闭环并网电流控制技术 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 36-41.
- [6] 王要强, 吴凤江, 孙力, 等. 带 LCL 输出滤波器的并网逆变器控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 31(12): 34-39.
- [7] 张云红, 曾成碧, 吴传来, 等. 模糊控制在永磁同步电机调速系统中的应用 [J]. 微电机, 2012, 45(7): 69-73.

收稿日期：2014-08-15

作者简介：

李 诚 (1977—), 男, 高级工程师, 主要从事电网规划研究与管理方面的工作;

曾成碧 (1969—), 女, 博士, 副教授, 通信作者, 研究方向为分布式发电与微电网, E-mail: zengchengbi@ sina.com.

(责任编辑：杨秋霞)