

# PWM整流器的改进型PI控制方式

顾亦维<sup>1</sup>, 陈艳峰<sup>2</sup>, 廖慧<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640

<sup>2</sup> 华南理工大学电力学院, 广州 510640

**摘要:** 为PWM整流器提出了一种改进的PI控制器, 这种控制器具有结构简单的优点, 与此同时, 该控制器改进了传统的线性控制的PI环, 提出一种非线性控制的改进型PI环。通过在MATLAB/Simulink中建模仿真, 对所提方法进行了验证, 通过比较展示了本方案的优越性。

**关键词:** PWM整流器, 改进的PI控制, 误差平方

## 1 引言

PWM整流器已经在UPS电源中得到了广泛的应用。其中, 大部分整流器为了将输出电压稳定在特定值上, 都会使用PI环处理反馈信号, 稳定输出电压。然而, 目前常用的各个PI调节方式有的过于复杂, 或是过于简单, 难以满足实际工作中的需要。本文提出了一种改进的PI调节方式, 实现简单, 控制参数少, 并且可以灵活地运用于多种系统上。

## 2 PWM整流器的主电路模型

目前, 各类电力电子变换器的输入整流电路输入功率级一般采用不可控整流或相控整流电路。这类整流电路结构简单, 控制技术成熟, 但交流侧输入功率因数低, 并向电网注入大量的谐波电流。PWM整流器以功率因数可调、网侧电流正弦化、能量可双向传输, 真正实现了“绿色电能变换”, 已成为电力电子技术中的一个重大课题。用Simulink建立经典的PWM整流器的主电路模型如图1所示。

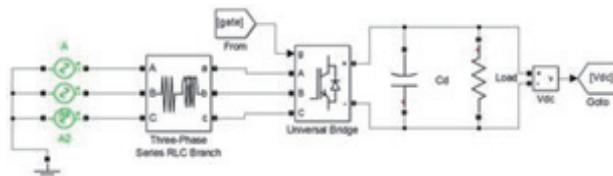


图1 PWM整流器的Simulink模型

电网输入三相电, 经过网侧等效电感、等效电阻后, 与三相IGBT整流桥堆交流侧相连。整流桥堆直流侧与滤波电容、负载相连。输出电压  $V_{dc}$  与输入电流通过双环PI

控制后, 得到整流桥堆的驱动信号组  $gate$ , 进而控制整流桥的输出电压。

## 3 控制方法与改良对策

### 3.1 传统的PI调节

传统的PI调节方式如(1)所示, 误差信号  $e_k$  为输出电压参考值与实际值之差, 该信号经过比例单元和积分单元调节后得到控制信号  $u_k$ 。

$$u_k = K_p [e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T}] \quad (1)$$

在Simulink中仿真, 绘出如图2所示的PI控制器模型。

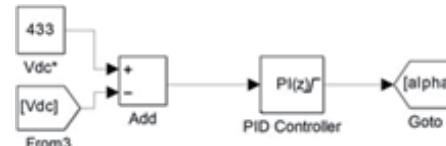


图2 传统PI的Simulink模型

传统PI调节方式虽然已经很成熟了, 但是却在一些方面无法满足本系统的需要。首先, 由于本系统位于UPS的整流前级, 经常会面临后级突发性的加、卸载, 导致输出电压有较大的突变。希望PI控制器能够尽快阻止较大的电压突变, 尽快将误差值控制在一定范围内; 而对于小幅度的电压扰动, 比如环境因素带来的噪音和干扰(电压误差小于1%), 则希望系统能够忽略它们, 因为这并不会影响后级的逆变/充电系统。也即, 希望控制器能够针对不同大小的误差值, 采用不同的控制方式。而传统PI的线性控

制方法并不能满足这一点。

### 3.2 现有的解决方案

#### 3.2.1 专家式 PI

专家式 PI 是指基于受控对象和控制规律的各种知识，以智能的方式利用这些知识来设计控制器。令  $e_k$  表示离散化的当前采样时刻的误差值， $e_{k-1}$  表示前一个采样时刻的误差值，则有

$$\square e_k = e_k - e_{k-1} \quad (2)$$

其中  $\square e_k$  代表误差的变化趋势，为正则误差正在上涨，为负则误差正在下降。以时间为横轴， $e_k$  为纵轴，绘制出曲线如图 3。

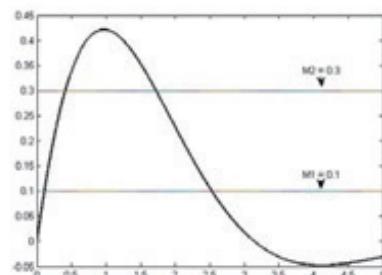


图 3 时间 - 误差曲线

专家式 PI 可以将误差信号分成三种情况，针对不同的情况分别采取不同的 PI 策略。

1)  $|e_k| \geq M_2$ ，说明当前的误差巨大，采用效果最强的控制器输出；2)  $e_k \square e_k > 0$ ，误差正在增大，采用较强控制器输出；3)  $e_k \square e_k < 0$ ，误差正在减小，可以考虑不改动控制器输出。

#### 3.2.2 模糊自适应整定 PI

模糊自适应整定 PI 是指用模糊数学的基本理论和方法，把规则的条件、操作用模糊集表示，并把这些模糊控制规则以及有关信息（如评价指标、初始 PI 参数等）作为知识存入计算机的知识库中，然后计算机根据控制系统的实际响应情况，运用模糊推理，自动实现 PI 参数的最佳调整。

理论上来说，模糊自适应整定 PI 的控制策略与专家式 PI 是类似的，都是在不同的情况下，对 PI 控制参数做不同的调整，以应对各种不同的情况。模糊自适应整定 PI 的优越性在于，其模糊逻辑在应对比较难以界定的边界时更加灵活。

#### 3.2.3 现有方法的局限性

不过，上述两种方法虽然各有千秋，却难以运用到本系统的实践中。专家式 PI 要界定确切的误差容限和相应的一套控制策略，将 PI 控制器原本简单有效的控制方法变得非常复杂，针对不同的系统，要调节的参数数量多了不少。而模糊自适应整定 PI 则更是如此，非但要确立一整套模糊逻辑，不同的隶属函数也会让控制效果大不相同，针对特定的系统，调试代价很高。

### 3.3 改进的 PI 控制策略

本文提出一种改进的数字式 PI 控制策略，当采样到本时刻输入误差值  $e_k$  后，在数字控制芯片中做数学运算，令

$$e_{k1} = e_k * \frac{|e_k|}{p} \quad (3)$$

式中  $e_{k1}$  就是改进型 PI 的输入误差， $e_k$  为误差值  $e_k$  的模，无量纲。系数  $p$  是待定的控制参数，也没有量纲。保持 PI 控制器的形式不变，将  $e_{k1}$  视为  $e_k$  代入 (1)，得到

$$u_{k1} = K_p \left[ \frac{e_k |e_k|}{p} + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k \frac{e_j |e_j|}{p} + T_d \frac{e_k |e_k| / p - e_{k-1} |e_{k-1}| / p}{T} \right] \quad (4)$$

由 (4) 可以发现，与传统 PI 的线性控制方法相比，改进型 PI 控制器是一种非线性控制方法，并且，除了改变输入误差值之外，改进方法并没有改动 PI 控制器的控制形式和 PI 参数。建立 Simulink 模型，有

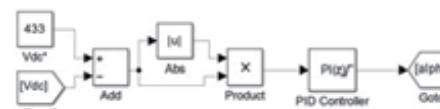


图 4 改进 PI 控制器的 Simulink 模型

比较一下改进控制方法和传统控制方法的输入误差值，令  $p=1$ ，则有

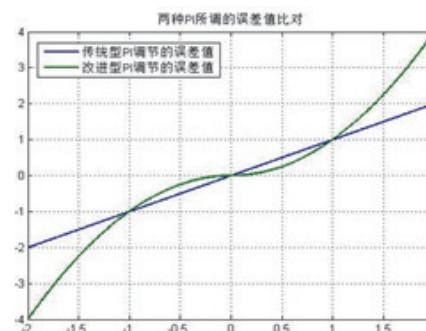


图 5 两种 PI 控制方式的误差值对比

如图 5 两种 PI 控制方式的误差值对比所示, 当误差值  $e_k \in [-p, p]$ , 改进 PI 的误差值  $e_{k1} \leq e_k$ ; 而当  $e_k \in [-\infty, -p] \cup [p, +\infty]$ , 改进方法得到的误差值  $e_{k1}$  迅速超过传统方法的误差值  $e_k$ , 并且随着误差增大,  $e_{k1}$  与  $e_k$  的差值也越来越大。易知, 在这种情况下, 一旦加卸载导致输出电压突变, 如果误差值超过系数  $p$ , 那么输入误差将以多项式速度增长, 远远快于线性控制的传统 PI 环。当系统受到高频小幅干扰, 导致电压有微小的扰动, 电压误差处于  $[-p, p]$  区间内时, 改进 PI 会比传统 PI 更加迟钝, 更不理会这些干扰。使用图 1 的 PWM 整流器主电路, 分别用改进型 PI 和传统 PI 对主电路进行加、卸载仿真, 电路参数如表 1 所示。令加载后的负载电阻为 11 欧姆, 卸载后的负载电阻为 20 欧姆。对比输出电压波形如图 6、图 7 所示。

表 1 仿真电路参数

参数名称	参数符号(单位)	值
输入电压	$V_{RMS}(V)$	220
网侧电感	$L_s(mH)$	5
网侧电阻	$R_s(Ohm)$	0.5
直流侧电容	$C_d(mF)$	4.7
改进型 PI 系数	$p$	5

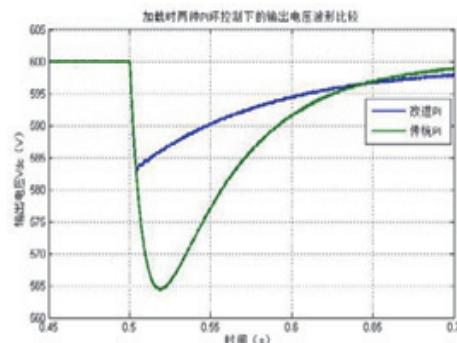


图 6 加载时的输出电压波形

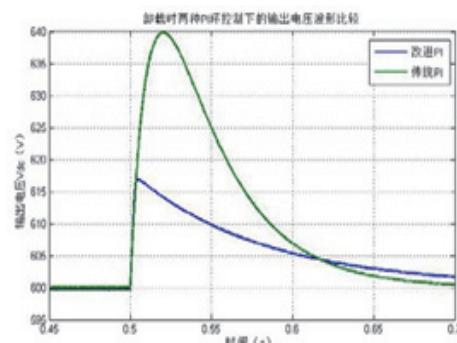


图 7 卸载时的输出电压波形

可以发现, 改进的 PI 控制器比传统的 PI 控制器对大的电压变化更加敏感, 反应更快, 很好地抑制住了电压突变。并且, 当误差减小后, 改进型 PI 接下来的回调速度会逐渐慢于传统 PI, 证明改进型 PI 对小扰动的确是脱敏的。而且, 相比较于专家式 PI 控制和模糊自适应整定 PI 控制, 这种控制方法不需要建立模糊逻辑、隶属函数, 也不需要界定误差容限, 建立不同的控制逻辑。实现起来非常简单, 效果比较理想。

#### 4 结论

由于目前用于 UPS 系统的 PWM 整流器的 PI 控制器有一些局限性, 无法很好地满足对大扰动更敏感, 对小扰动不敏感的特性。本文提出了一种改进的 PI 控制方法, 获得了比较理想的结果, 结果通过 Simulink 模型仿真得到了验证。进一步的实验验证将在后续工作中展开。

#### 参考文献

- [1] L. I. U. Guang Ya, F. Wang, and L. I. Xiaosong, “Design Research on Three-Phase PWM Rectifier Based on Double Closed Loop Control Technology,” 2014.
- [2] H. Qi, Y. Wu, and Y. Bi, “The main parameters design based on three-phase voltage source PWM rectifier of voltage oriented control,” in Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE), 2014 International Conference on, 2014, vol. 1, pp. 10 - 13.
- [3] H. Wang, Q. Cheng, M. Li, G. Chen, and L. Deng, “A novel variable-frequency hysteresis and space-vector current control strategy for three-phase PWM rectifier,” in Control Conference (CCC), 2014 33rd Chinese, 2014, pp. 3540 - 3545.
- [4] Datta A, Ho M T, Bhattacharyya S P. Structure and synthesis of PID controllers[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] 王述彦, 师宇, 和 冯忠绪, “基于模糊 PID 控制器的控制方法研究,” 机械科学与技术, no. 01, pp. 166 - 172, 2011.

#### 作者简介

顾亦维 (1991), 男, 工学学士, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术, gywgg@hotmail.com ;

陈艳峰 (1970), 女, 博士 (后), 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与非线性电路系统理论, eeyfchen@scut.edu.cn。