

Research on the Application of Improved Fuzzy-PI Control in STATCOM

Zhao Zhenxing, Liu Fugui, Wang Yangang

Electromagnetic Field and Electrical Reliability Laboratory, Hebei University of Technology, Tianjin, China

Email address:

1410961015@qq.com (Zhao Zhenxing), 2974513115@qq.com (Liu Fugui), 1260737215@qq.com (Wang Yangang)

To cite this article:

Zhao Zhenxing, Liu Fugui, Wang Yangang. Research on the Application of Improved Fuzzy-PI Control in STATCOM. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 1, 2016, pp. 39-44. doi: 10.11648/j.sd.20160401.17

Received: April 2, 2016; Accepted: April 13, 2016; Published: April 18, 2016

Abstract: According to some shortcomings that Fuzzy PI Control strategy can not meet certain occasions where higher control accuracy is required, the improved Fuzzy-PI control is applied to the static synchronous compensator (STATCOM). Simulating and analyzing the compensation effects of Fuzzy-PI control strategy, improving the membership function of the Fuzzy-PI control strategy, and testing the compensation performances of the improved Fuzzy-PI control with the MATLAB/SIMULINK simulation experiments. The simulation and experimental results show that the improved Fuzzy-PI control can improve the control precision, and can meet the requirements of power system for reactive power compensation better.

Keywords: Improved Fuzzy-PI Control, Static Synchronous Compensator, Membership Function, Reactive Power Compensation

改进型模糊PI控制在STATCOM中应用研究

赵振兴, 刘福贵, 王彦刚

电磁场与电器可靠性实验室, 河北工业大学, 天津市, 中国

邮箱

1410961015@qq.com(赵振兴), 2974513115@qq.com(刘福贵), 1260737215@qq.com(王彦刚)

摘要: 静止无功发生器(STATCOM)的控制策略采用的是改进型模糊PI控制策略, 仿真分析模糊PI控制策略的补偿效果, 模糊PI控制策略无法满足某些对控制精度要求更高的场合。针对该控制精度问题, 通过对模糊PI控制策略的隶属度函数进行改进, 提升控制精度。通过MATLAB/SIMULINK仿真实验进行验证, 论证其良好的补偿性能, 更好的满足电力系统对无功功率补偿的要求。

关键词: 改进型模糊PI控制, 静止无功发生器, 隶属度函数, 无功功率补偿

1. 引言

对于无功功率补偿设备来说, 静止无功发生器有着不可或缺的作用。静止无功发生器是通过产生或者消耗无功功率, 进而维持电网水平稳定。由于静止无功发生器具有良好的性能, 其是FACTS设备中重要的一部分。通过国际

专家和学者不断的努力, 此种设备的性能得到了很大的提升, 控制精度得到明显的改善[1]。

静止无功发生器的核心在于其控制策略上, 其控制策略经过长时间的研究在不断的演变着。文献[2]介绍了PID控制策略下STATCOM的工作原理以及实现无功补偿的过程。PID的应用范围广、参数易整定。但其自身缺点比多, 无法进行连续的自身整定模式, 对非线性、时变、耦合以及

参数和结构不确定的复杂过程, 工作效果不理想。美国的 L. A. Zadeh 创建的模糊数学理论在 20 世纪 60、70 年代得到了大量的应用, 此方法也在 STATCOM 中进行了应用。模糊控制理论模仿人工智能的方式调节无功功率的大小, 文献 [3] 对相关内容作了介绍。但由于模糊控制缺乏系统性, 无法保证解决模糊控制中稳定性和鲁棒性问题。模糊 PI 控制是一种较为理想的控制策略, 其结合了模糊控制理论和 PI 控制策略, 吸收两者优点。刚好解决了其稳定性和鲁棒性问题。为了扩大使用范围, 对模糊 PI 控制策略进行优化, 通过调整隶属度函数优化控制效果。常规的隶属度函数是均匀分布的, 本文采用的隶属度函数是不均与的, 根据实际的经验, 适当的调整区间范围, 使调整输入无功功率的大小更趋于实际大小, 补偿的效果更为明显, 补偿性能得到改善, 基本控制策略依旧是模糊 PI 控制策略, 对此策略进行优化。

本文的主要工作是详细论述了 STATCOM 在 d-q 坐标系下的数学模型, 通过调整隶属度函数的区间范围, 对补偿效果进行优化, 与常规的模糊 PI 控制器进行对比, 通过 MATLAB/Simulink 进行仿真验证。证明改进型模糊 PI 控制方式的合理性和有效性。

2. d-q 坐标系下 STATCOM 的数学模型

对 STATCOM 进行等效, 其等效电路图见图 1, 根据输入量和输出量来建立 SVG 的相关数学模型 [4], 假设电阻 R 为在 STATCOM 中桥式变流器导通电阻以及相关的各种线路电阻的总和, X 为电网系统所连接的电抗器, 根据电压建立 STATCOM 方程。

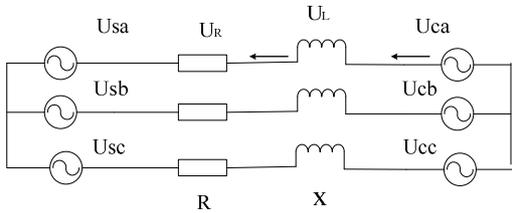


图1 STATCOM的三相等效电路图。

u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 分别假设为系统的三相电压, 且其是对称的, 即电网电压的瞬时值见公式 1:

$$\begin{cases} u_{sa}(t) = U_s \sin(\omega t) \\ u_{sb}(t) = U_s \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{sc}(t) = U_s \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{ca}(t) = Ku_{dc} \sin(\omega t - \delta) \\ \quad = \sqrt{2}U_c \sin(\omega t - \delta) \\ u_{cb}(t) = Ku_{dc} \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) \\ \quad = \sqrt{2}U_c \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) \\ u_{cc}(t) = Ku_{dc} \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta) \\ \quad = \sqrt{2}U_c \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta) \end{cases} \quad (2)$$

根据基尔霍夫电压和电流就可以列出 STATCOM 三相的回路方程。

$$\begin{cases} L \frac{di_a(t)}{dt} = u_{ca}(t) - u_{sa}(t) - Ri_a(t) \\ L \frac{di_b(t)}{dt} = u_{cb}(t) - u_{sb}(t) - Ri_b(t) \\ L \frac{di_c(t)}{dt} = u_{cc}(t) - u_{sc}(t) - Ri_c(t) \end{cases} \quad (3)$$

对其进行 d-q 变换, 就可以计算出旋转坐标系下, STATCOM 的电压以及电流方程。

$$\begin{cases} L \frac{di_d(t)}{dt} = u_{cd}(t) - Ri_d(t) + \omega Li_q(t) \\ L \frac{di_q(t)}{dt} = u_{cq}(t) - \omega Li_d(t) - Ri_q(t) + \sqrt{3}U_s \end{cases} \quad (4)$$

式中

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (5)$$

对相关式子进行一系列的化简, 得到其帕克变换。

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

式中 ω —电网电压角频率。

对式 4 分析可以知道, 在 d-q 坐标系下, 电流之间并不是独立存在的, 其存在着交叉耦合。STATCOM 系统是一个耦合系统。在设计 STATCOM 的时候, 根据 STATCOM 交/直流侧关于瞬时功率平衡的原理, 推到直流侧的电容电压, 其方程为:

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{u_{di}d + u_{qi}q - (i_d^2 + i_q^2)R}{Cu_{dc}} - \frac{u_{dc}}{CR_{dc}} \quad (7)$$

式中 R_{dc} —直流侧电容等效损耗电阻

u_{dc} —直流侧电容电压

式 4 和式 7 为 STATCOM 在旋转坐标系下的数学模型 [5]。在旋转坐标系下, 建立起来的系统数学模型是一个两输入两输出且其相互耦合的非线性系统。

3. 模糊 PI 控制器的设计

根据模糊 PI 控制器的原理, 画出其结构框图, 如图 2 所示; 选取接入点的电压参考值, 与实际值的偏差作比较, 计算出变化趋势 e ; 还需知道接入点电压参考值和实际值的偏差变化趋势 Δe , 使用模糊推理的方法进行模糊运算,

得出当前时刻的 ΔK_i 和 ΔK_p ，进而来实现PI参数的最优调整[6]。即

$$K_p = K'_p + \Delta K_p \quad (8)$$

$$K_i = K'_i + \Delta K_i \quad (9)$$

式中 K'_p, K'_i 为控制器整定值，采用Ziegler-Nichols对预整定值进行求解。

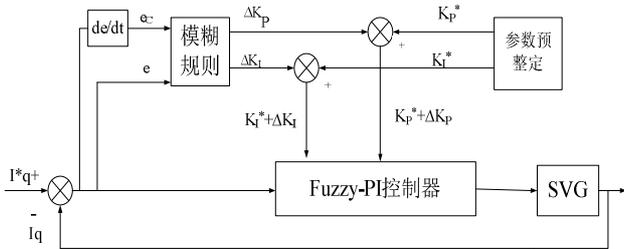


图2 模糊PI控制结构框图。

进行Fuzzy-PI控制器的设计，先置 $K'_p=K'_i=0$ ，再增加 K'_p ，直到系统发生震荡，在此临界状态得到的 K'_p 值就是 K_{cr} ，其振荡周期是 T_{cr} 。此时，可确定控制器参数为 $K'_p=0.45K_{cr}$ ， $K'_i=0.83T_{cr}$ 。在确定 K'_p 和 K'_i 值后，就可以开始设计模糊PI控制器，相关设计内容主要由三个部分组成。

3.1. 模糊化

模糊控制量的输入变量以及输出变量都必须是精确量，然而模糊推理针对的是模糊量，所以必须模糊化处理相应的输入量。将输入变量和输出变量的语言值均分为相应的7个语言值：{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB}，隶属度函数采用灵敏性强的三角函数[7]，如图3所示，各变量的模糊量分别为E, EC, 的 $\Delta K_i, \Delta K_p$ ，其论域均为[-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4]。

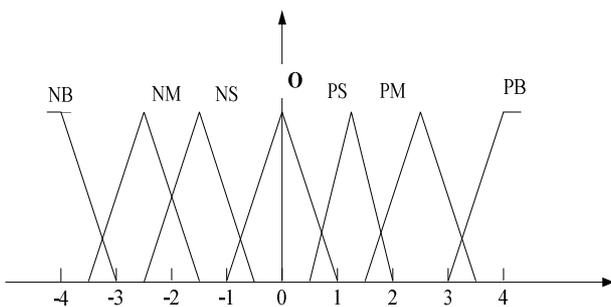


图3 隶属度函数。

3.2. 参数整定规则的确定及模糊推理

模糊推理的核心问题就是如何设置控制器参数的整定规则，其是由长期的现场调试经验以及相关领域专家的经验所得。当系统出现偏差之后，此时控制器发挥其控制作用，以防止偏差增大。根据实际对象的特征以及长期丰富的调试经验，进而总结出关于 $\Delta K_i, \Delta K_p$ 两个参数的模糊控制规则，如表1、表2所示。

表1 ΔK_i 模糊控制规则。

U	e_e							
	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB	
e	NB	PB	PB	NB	PM	PS	PS	0
	NM	PB	PB	NM	PM	PS	0	0
	NS	PM	PM	NS	PS	0	NS	NM
	0	PM	PS	0	0	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	0	NS	NS	NM	NM
	PM	0	0	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	0	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表2 ΔK_p 模糊控制规则。

U	e_e							
	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB	
e	NB	PB	PB	NB	PM	PS	PS	0
	NM	PB	PB	NM	PM	PS	0	0
	NS	PM	PM	NS	PS	0	NS	NM
	0	PM	PS	0	0	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	0	NS	NS	NM	NM
	PM	0	0	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	0	NS	NS	NM	NM	NB	NB

对输入的 Δe 和 e 两个参数，选取相应的语言值后，按照整定规则表，通过采用公式法进行模糊决策，可以分别得出 $\Delta K_i, \Delta K_p$ 两个修正参数的模糊量。

3.3. 去模糊化

对模糊推理完成以后，根据Fuzzy-PI控制器整定出两个修正参数以后，需要对其进行去模糊化处理，此时得到的是精确量，进一步计算输出的控制量。去模糊化处理主要采用最大隶属度法和重心法[8]。本文控制器所采用的是重心法，求取输出量的精确值。

$$\Delta K_p = f_p(e, \Delta e) = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j(e, \Delta e) \Delta K_{pj}}{\sum_{j=1}^n \mu_j(e, \Delta e)} \quad (10)$$

$$\Delta K_i = f_i(e, \Delta e) = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j(e, \Delta e) \Delta K_{ij}}{\sum_{j=1}^n \mu_j(e, \Delta e)} \quad (11)$$

根据 $K_p=K'_p + \Delta K_p$ ， $K_i=K'_i + \Delta K_i$ 可得 K_p, K_i

$$\Delta K_p = K'_p + \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j(e, \Delta e) \Delta K_{pj}}{\sum_{j=1}^n \mu_j(e, \Delta e)} \quad (12)$$

$$\Delta K_i = K'_i + \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j(e, \Delta e) \Delta K_{ij}}{\sum_{j=1}^n \mu_j(e, \Delta e)} \quad (13)$$

当系统在线运行的时候,控制系统根据模糊逻辑规则计算出的结果来进行处理、查表以及完成运算,实现参数的在线自整定。

4. 对隶属度函数进行改进

静止无功发生器的核心在于其控制策略上,对于模糊PI控制策略的STATCOM而言,主要对模糊控制这一部分进行优化,本文主要对专家定义语言变量的隶属度函数进行改进。隶属度函数的确定过程既有主观性又有客观性。隶属度函数的实质反应的是函数的渐变性。设计常规的隶属

度函数时,将每个语言变量进行均与的分布。此种方式的误差比较大,为了提高系统的控制精度,经过相关学者的大量研究,将语言变量进行不均匀的分布更加符合实际情况。离参照点越近的时候,隶属度函数曲线越陡。即离参照点越近越敏感,当系统在0值附近时,需要控制策略更加敏感,补偿效果更好,因此让其更陡些。相比于常规模糊控制器的隶属度函数,本文做了相应的改进,如图4所示。将此隶属度函数应用在STATCOM中,并在MATLAB/Simulink中进行仿真验证[9]。

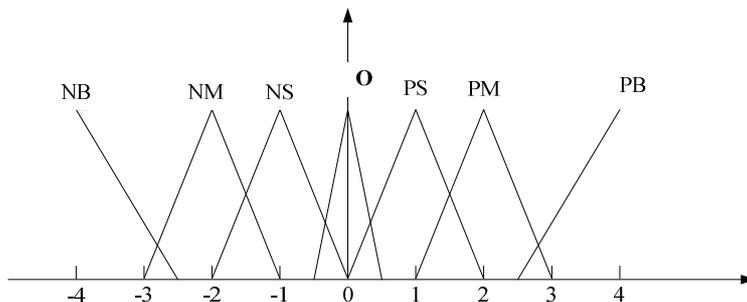


图4 改进的隶属度函数。

5. 仿真与验证

对改进型模糊PI控制算法的补偿效果进行论证,检验其有效性和可行性。还需要对模糊PI控制策略和改进型模糊PI控制策略两种控制策略的仿真进行对比。系统仿真的设计参数如下:系统电压500V;频率50Hz;直流侧电容1500 μ F; SPWM载波频率: 5KHz; 耦合变压器和滤波电感等效电感为: 5mH、等效电阻0.3 Ω ; 公共连接点电压控制器的

初始参数: $K_p=3$, $K_i=150$; 直流侧电容电压控制器的初始参数: $K_p=1$, $K_i=100$ 。

为了检验控制器的动态性能和自适应性能,在STATCOM和系统电网的公共连接点模拟电压跌落的情况,改变STATCOM系统中的电气参数来研究系统工作状态的变化[10]。如图5所示,在 $t=0.15$ s时给系统添加无功负荷,可以看出两种控制策略下对系统负荷变化的响应曲线(标么值); $t=0.3$ s时,系统基本恢复。

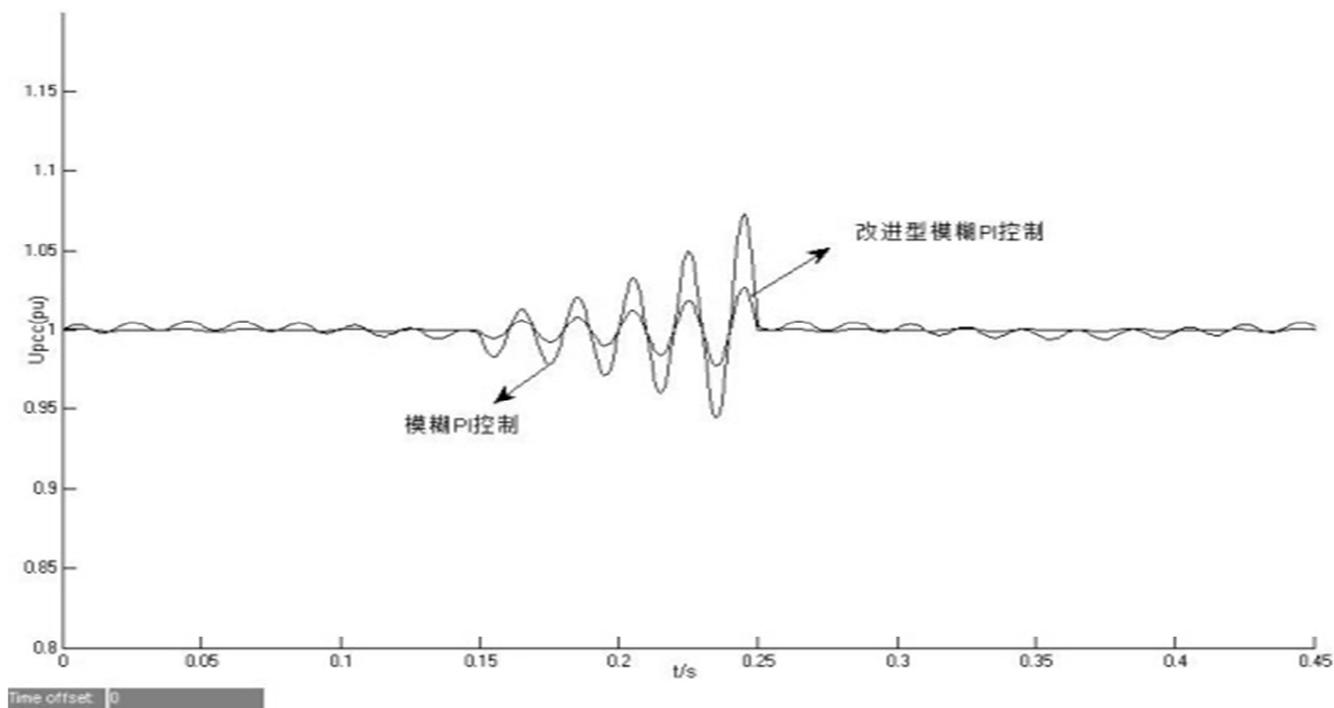


图5 公共连接点电压响应曲线。

分析图5可以发现,改进型模糊PI控制动态性能更好,其超调量小而且调节时间也比较短。

从图6是有关直流侧电容电压的波形图,当有外界无功负荷加到系统中时,公共连接点的电压会下降,此时STATCOM需要输送无功电流,进而使系统恢复到原来的电

压水平,保持系统恒定[11]。对比两种控制策略,也就是模糊PI控制和改进型模糊PI控制策略,采用改进型模糊PI控制这种策略时,其直流侧电容电压的波形波动幅度不大,具有良好的性能。

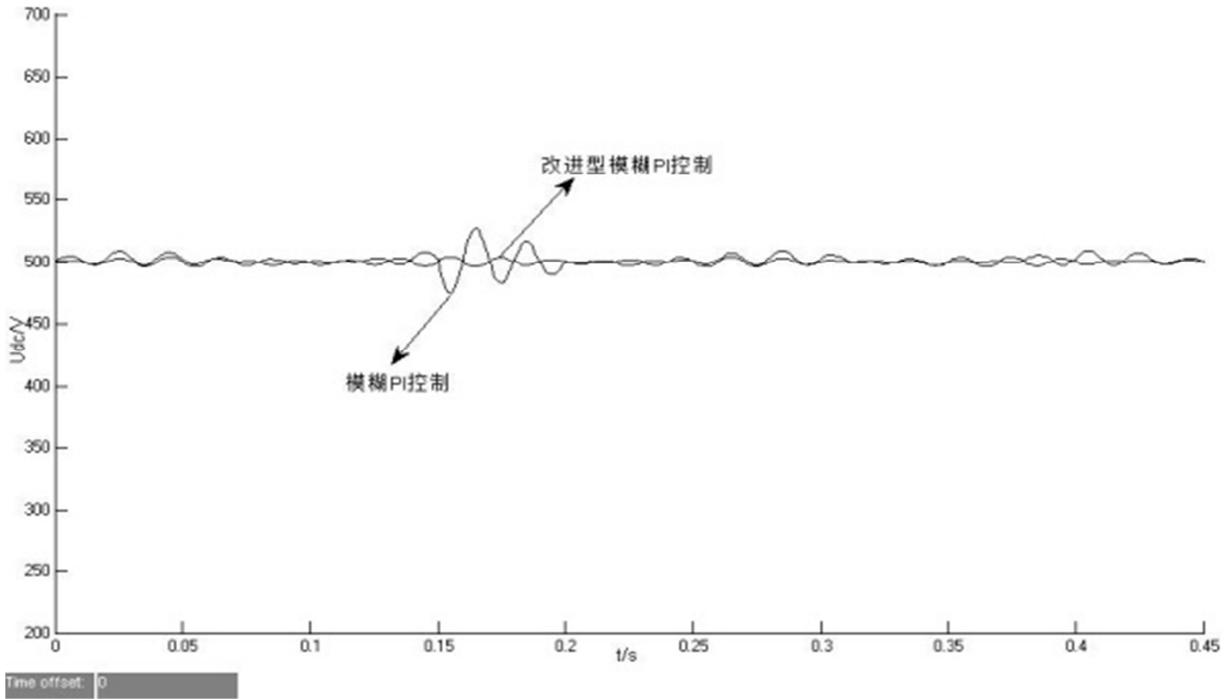


图6 直流侧电容电压波形。

为了更好的说明改进型模糊PI控制策略比模糊PI控制策略的动态性能和可行性更好,改变系统参数,将耦合变压器和滤波电感等效电感参数设置为8mH,等效电阻设置为0.7Ω。图7、图8分别给出了两种控制策略下,公共连接点电压以及直流侧电容电压波形。

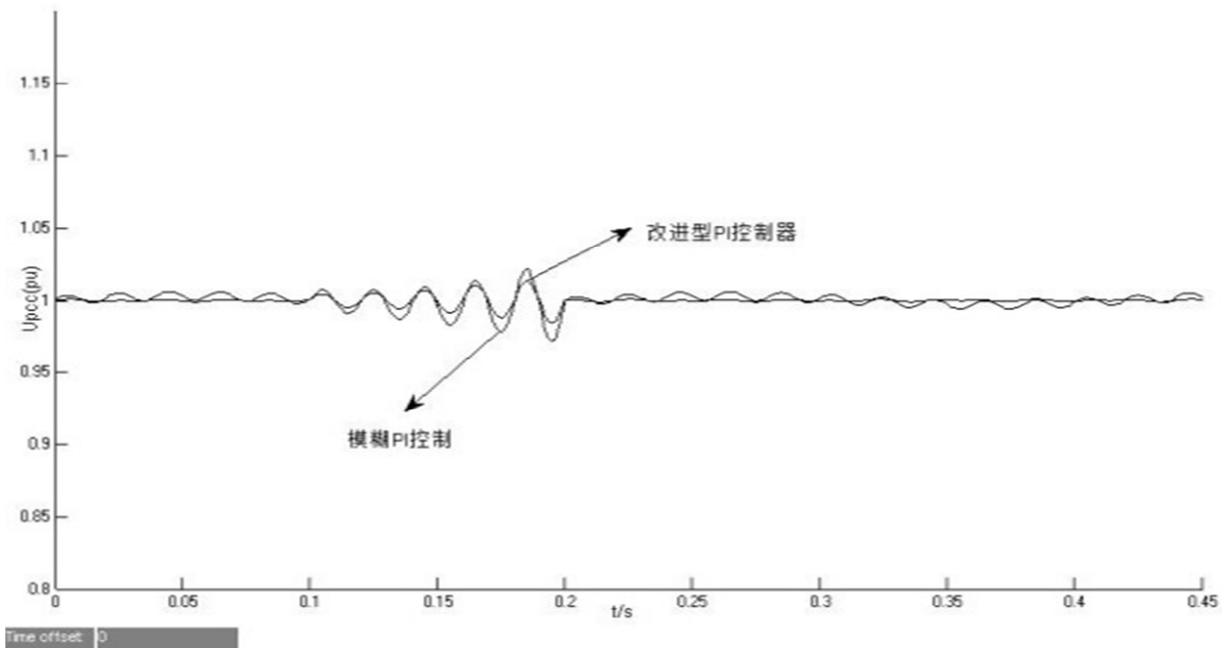


图7 公共连接点电压响应曲线。

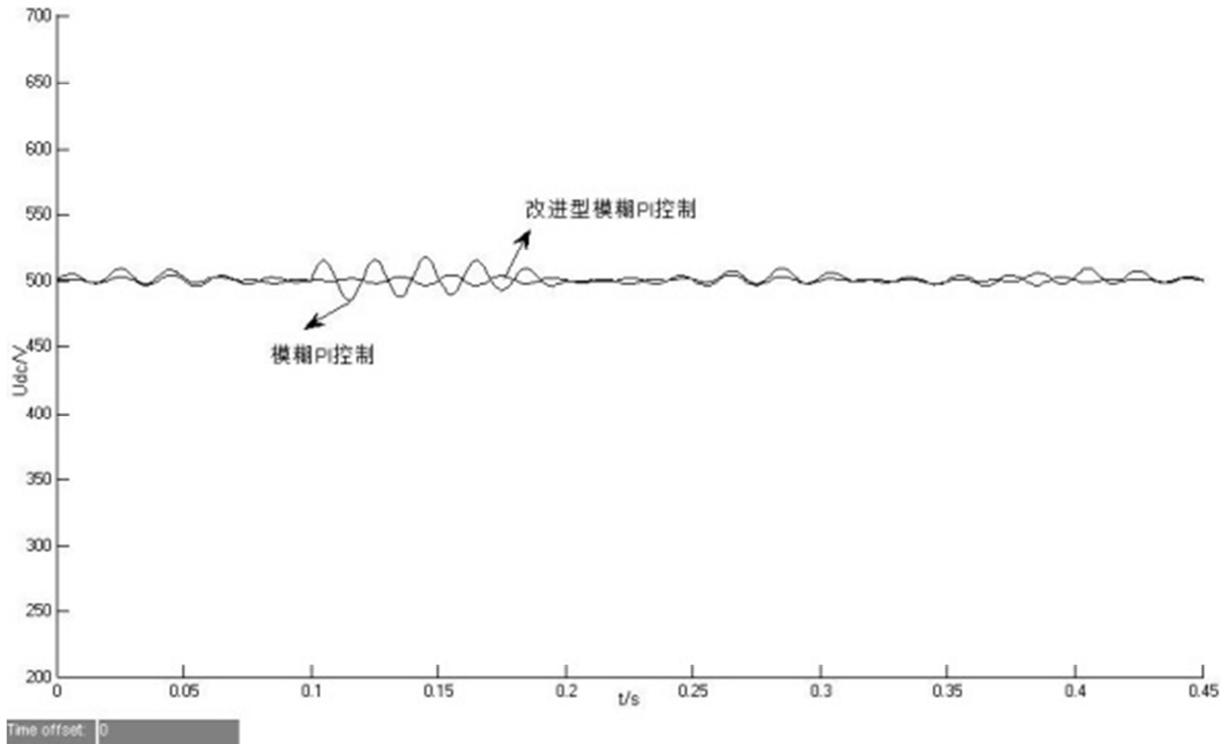


图8 直流侧电容电压波形。

从图7、图8可以看出, 系统等效参数发生变化时, 改进型模糊PI控制策略可以使系统更好的恢复到原来的水平, 没有受到等效系统参数的影响而影响, 其鲁棒性好, 补偿效果更好。

6. 结论

本文对模糊PI控制策略的隶属度函数进行了改进, 使系统控制精度得到了提升, 在发挥模糊控制的优势的同时, 也对模糊控制在调节变化过程中出现的偏差以及偏差变化率进行了最佳整定, 达到系统所需补偿的要求。模糊PI控制可以消除静差, 对其隶属度函数进行改进, 使模糊PI控制策略性能更加优良。满足控制精度要求更高的场合, 为STATCOM的应用提供了更为广阔的应用场合。

参考文献

- [1] 罗承廉, 季勇, 刘遵义. 静止同步补偿器 (STATCOM) 的原理与实现. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] Hanzelka Z, Szpyra W, Cziker A, et al. Reactive power compensation[J]. *Electrical energy: technologies and application*, 2012: 371-398.
- [3] A. Ghafour; M. R. Zolghadri; M. Ehsan; O. Elmatboly; A. Homaifar. Fuzzy Controlled STATCOM for Improving the Power System Transient Stability [J]. *Power Symposium*, 2007: 212-216.
- [4] B. Singh; K. V. Srinivas. Fuzzy logic control with constant dc link voltage of 48-pulse VSC based STATCOM [J]. *Power Electronics*, 2011: 1-7.
- [5] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] S. Raman; R. Gokaraju; A. Jain. An adaptive fuzzy mho relay for phase backup protection with infeed from STATCOM [J]. *Power and Energy Society General Meeting*, 2013: 1-1.
- [7] 邓明锋, 邓素英. 参数自整定模糊PI控制的级联STATCOM外环电压控制[J]. *电工技术*. 2015 (4): 100-103.
- [8] M. Janaki; R. Thirumalaivasan; N. Prabhu. Energy function based Fuzzy Logic Discrete control with STATCOM for stability improvement [J]. *Advances in Electrical Engineering*, 2014: 1-5.
- [9] 储月娥, 吕宗伟. 模糊控制器的设计原理及其应用[J]. *自动化与仪表*. 2005 (5): 42-48.
- [10] 常鲜戎, 陈新超, 季国庆, 邓燕山. DSTATCOM直流侧电压简易模糊PI控制研究[J]. *电能计量与负荷控制*. 2015 (14): 11-15.
- [11] 曾光, 柯敏倩, 张静刚. 用于静止无功补偿器的模糊-PID控制方法研究[J]. *电力电子技术*, 2006, 39 (5): 89-95.