

基于模糊控制的有源电力滤波器控制方法

陈宇¹, 王碧芳^{1,2}, 刘会金¹

(1. 武汉大学, 湖北 武汉 410072; 2. 武汉职业技术学院电信系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 用传统的比例积分控制方法来控制 APF 直流电压时由于其中比例微分系数不好确定, 并且对控制对象的特性变化很敏感, 所以效果不理想。该文引入 Fuzzy-PI 调节器对有源滤波器直流电压进行控制, 即将模糊控制和比例积分调节器相结合, 采用模糊控制方法对比例积分调节器的参数进行调节。在实际装置中进行了实验, 实验结果与单纯的比例积分调节的结果相比, 表明该方法比传统比例积分控制有更好的控制效果, 从而证明了理论的正确性。在此基础上进一步提出对有源滤波器的补偿电流也进行模糊控制。理论分析和实验结果表明, 模糊控制具有一系列传统控制无法与之比拟的优点。

关键词: 有源滤波器; 模糊控制; 隶属度; 控制规则

中图分类号: TM714; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)16-0040-06

0 引言

有源滤波器(APF)的工作原理是根据所检测到的负荷或系统谐波电流分量对主电路进行控制, 使其发出一个大小相等, 相位相反的谐波电流进行抵消, 这样在系统中将不再含有这个谐波电流成分, 从而起到补偿作用。这种滤波器补偿特性不受电网阻抗的影响, 且可以对频率和幅值都变化的谐波进行补偿, 因而受到广泛的重视。但是由于采样、计算的延时, 以及其它原因, 使得 APF 所发出的电流与所需的补偿电流之间必然有误差。为了消除这个误差, 达到精确补偿, 有必要引入一些策略来进行控制, 本文主要就是针对 APF 中直流电压的控制采用了现在应用比较广泛的模糊控制。

模糊控制理论已经在军工、空间飞行等一系列领域得到了成功的运用。但在电力系统中的运用还不广泛。一个有实际经验的控制工作者, 通过对控制动作的观察以及与操作人员讨论就能把操作人员的控制策略描述出来。所得到的是一组用语言表达出来的定性的不精确的判定规则。这一规则称为模糊算法。它是过程的一个数学模型——模糊模型, 可用计算机计算这些模糊语句来构成模糊控制器, 而这种模糊算法则描述了控制器的行为特性。

目前在 APF 中对直流电压的控制通常采用常规的 PI 控制, 但由于常规 PI 调节器不具有在线整定参数 K_p 、 K_i 的功能, 致使其不能满足在不同 E 下系统对 PI 参数的自整定的要求, 从而影响其控制效果的进一步提高。下面就针对我们在实验中的一些心得来进行探讨。

1 模糊自整定 PI 参数控制器的设计

模糊自整定 PI 参数控制器是一种在常规 PI 调节器 $u = K_p E + K_i \int E$ 基础上, 应用模糊集合理论建立参数 K_p 、 K_i 同误差绝对值 $|E|$ 和误差变化率绝对值 $|C|$ 间的二元连续函数关系 $K_p = f_1(|E|, |C|)$ 与 $K_i = f_2(|E|, |C|)$, 并根据不同的 $|E|$ 、 $|C|$ 在线自整定参数 K_p 与 K_i 的模糊控制器^[2]。

一般情况下, 在不同 $|E|$ 、 $|C|$ 下被控过程对参数 K_p 与 K_i 的自整定要求可归结为:

- 1) 当 $|E|$ 较大时, 为使系统具有较好的跟踪性能, 应取较大的 K_p , 同时为避免系统响应出现较大的超调, 应对积分作用加以限制, 通常取 $K_i = 0$ 。
- 2) 当 $|E|$ 处于中等大小时, 为使系统响应具有较小的超调, K_p 应取得小些。
- 3) 当 $|E|$ 较小时, 为使系统具有较好的稳态性能 K_p 与 K_i 均应取得大些。

2 有源滤波器的模型

有源电力滤波器的原理框图如图 1 所示, 其中 i_L 为系统负载电流, i_c^* 为检测出的需补偿的谐波电流和基波无功电流, i_c 为 APF 向系统提供的补偿电流。

三相电路瞬时谐波电流和无功电流的实时检测我们采用的是有功分离法(理想传输量法)^[3,5], 负载电流是由基波有功电流、基波无功电流和谐波电流组成, 如果是三相电路, 还将可能包括负序电流。通过一定的途径, 我们能从负载电流中分离出基波有功电流, 剩下的部分就是 APF 进行综合补偿所需

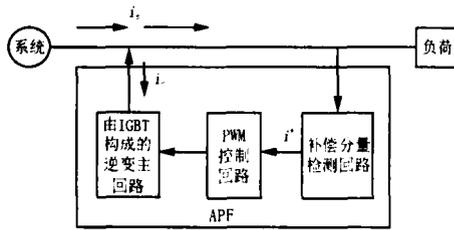


图1 有源滤波器原理框图

Fig.1 Schematic diagram of APF

的补偿电流。

有源滤波器用一个电压源等效,而实际控制中,这个电压源必须用一个电流控制电压源(CCVS)来等效,控制量是所计算出的补偿电流,有: $u_i = ki_{ccom}$ 。式中, u_i 是有源滤波器的等效电压; k 是控制系数; i_{ccom} 为补偿电流,即 APF 和系统间的连接支路的电流。

在 APF 和系统之间存在连接电阻和连接电抗,要使得 APF 向系统发出所需要的补偿电流,必须进行阻抗变换:

$$u_i = u_s + Ri_{ccom} + L \frac{di_{ccom}}{dt} \quad (1)$$

其中: u_s 为连接点系统电压; R 、 L 为连接电阻电感。

如果仅按照上式来控制 APF,即所谓的预测控制,是一个开环控制系统。由于采样、计算的延时,以及连接阻抗参数的不准确,APF 所发出的电流与所需的补偿电流之间必然有误差。为了消除这个误差,达到精确补偿,有必要引入其它的控制策略^[4]。

在此我们采用的是闭环负反馈控制,其基本控制框图如图2所示。其基本原理是,将由阻抗变换所得到的控制电压 u_i^2 作为基本控制量,利用误差量的 PI 控制算法得到的控制电压 u_i^1 作为修正量,将 u_i^1 、 u_i^2 这两个电压结合在一起作为 APF 的控制电压,来控制 APF。

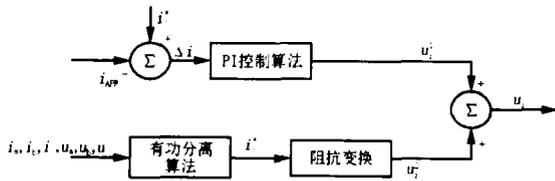


图2 谐波补偿控制框图

Fig.2 Control diagram of harmonic compensation

3 Fuzzy - PI 控制器的应用

本文采用 Fuzzy 控制器来对 PI 调节器参数进行调节。Fuzzy 控制器有更快的响应和更小的超调;对过程参数的变化很不敏感,即具有很强的鲁棒性,能够克服非线性因素的影响。我们把这种 Fuzzy 控

制器和 PI 调节器相结合的方法称为 Fuzzy - PI 调节器。典型的 Fuzzy 控制器结构如图3所示。图中 e 、 \dot{e} 和 u 分别为误差、误差变化率和输出量。 \underline{E} 、 $\underline{\dot{E}}$ 和 \underline{U} 分别表示 e 、 \dot{e} 和 u 的模糊语言变量。因此 K_1 、 K_2 表示由精确量 e 、 \dot{e} 转化为模糊量 \underline{E} 、 $\underline{\dot{E}}$ 的转化因子,称之为量化因子。而 K_1 表示模糊表的输出量 \underline{U} 与受控对象的实际输入量 u 之间的比例关系,称之为比例因子。

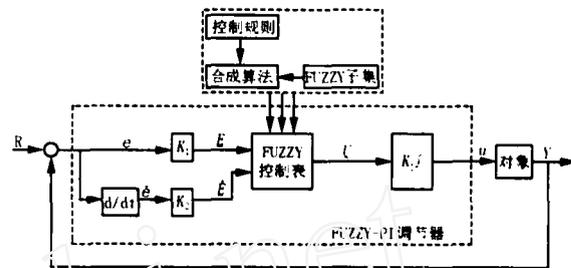


图3 典型 Fuzzy 控制系统框图

Fig.3 Representative Fuzzy controller system

设 \underline{E} 、 $\underline{\dot{E}}$ 和 \underline{U} 的辞集分别为:

$$T(\underline{E}) = NB + NM + NS + NO + PO + PS + PM + PB$$

$$T(\underline{\dot{E}}) = NB + NM + NS + 0 + PS + PM + PB$$

$$T(\underline{U}) = NB + NM + NS + 0 + PS + PM + PB$$

它们的论域分别为 14, 13, 和 15 个等级,即

$$\underline{E} = (-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3, +4, +5, +6)$$

$$\underline{\dot{E}} = (-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6)$$

$$\underline{U} = (-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7)$$

\underline{E} 、 $\underline{\dot{E}}$ 和 \underline{U} 和辞集内各语言值的隶属度(隶属函数)赋值表分别由表1至表3给出^[2]。应用 Fuzzy 推理合成算法计算并经人工修正后得到的模糊控制表如表4所示。控制规则由表5给出。

设 APF 稳态时 $e(t) = 0$ 要求的输入为 u_0 , 因为控制量 U 为离散量,所以在 Fuzzy 控制器中, U 与 e 可以看成一种非线性变换,记为: $U = f(e(t))$ 。则 PI 调节器的输入输出方程式为:

$$u(t) = K_p f(e(t)) + K_i \int_0^t f(e(t)) dt \quad (2)$$

$f(e(t)) = U$ 是经过模糊控制器处理后的输出值,上式实际上是把常规的 PI 调节器模糊化,我们称这种调节器为 Fuzzy - PI 调节器。上式可改写为

$$u(t) = K_p U + K_i \int_0^t U dt \quad (3)$$

表1 Fuzzy 变量 E 的隶属度赋值表Tab.1 Evaluating table of membership grade of Fuzzy variable E

E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0	0
PO	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0.1	0.6	1.0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表2 Fuzzy 变量 \dot{E} 的隶属度赋值表Tab.2 Evaluating table of membership grade of Fuzzy variable \dot{E}

\dot{E}	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0	0
PO	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表3 Fuzzy 变量 U 的隶属度赋值表Tab.3 Evaluating table of membership grade of Fuzzy variable U

U	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0	0
PO	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表4 控制表

Tab.4 Control table

$E U \dot{E}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	7	7	7	7	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-5	7	7	7	7	7	7	6	4	4	2	0	0	0
-4	7	7	7	7	7	6	4	4	3	1	0	0	0
-3	7	7	7	7	6	4	4	3	1	0	-1	-2	-2
-2	6	6	6	6	4	4	3	1	0	-1	-1	-2	-1
-1	4	4	4	4	3	3	1	0	-1	-2	-2	-3	-3
-0	4	4	3	3	3	2	0	-1	-2	-3	-3	-3	-3
+0	3	3	3	3	2	1	0	-2	-3	-3	-3	-4	-4
1	3	3	2	2	1	0	-1	-3	-3	-4	-4	-4	-4
2	2	2	1	1	0	-1	-2	-4	-4	-6	-6	-6	-6
3	2	2	1	0	-1	-3	-4	-4	-6	-7	-7	-7	-7
4	0	0	0	-1	-3	-4	-4	-6	-7	-7	-7	-7	-7
5	0	0	0	-2	-4	-4	-6	-7	-7	-7	-7	-7	-7
6	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7

表5 控制规则状态表

Tab.5 Control rule estate table

$\underline{E} \ \underline{N} \ \underline{\dot{E}}$	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	0	0
NM	PB	PB	PB	PB	PM	0	0
NS	PM	PM	PM	PS	0	NS	NS
NO	PM	PM	PS	0	NS	NM	NM
PO	PM	PM	PS	0	NS	NM	NM
PS	PS	PS	0	NS	NM	NM	NM
PM	0	0	NM	NB	NB	NB	NB
PB	0	0	NM	NB	NB	NB	NB

参数自调整 Fuzzy - PI 调节器系统框图如图 4, 用 Fuzzy 修改表对参数 K_1, K_2 及 K_p, K_i 自调整。当误差 e 或误差变化率 \dot{e} 较大时, 进行“粗调”, 这可降低对 e 或 \dot{e} 的分辨率, 而采用较大的控制改变量, 这可缩小 K_1 和 K_2 , 放大 K_p 和 K_i 。当 e 和 \dot{e} 较小时, 即系统接近稳态, 就实行“细调”。这时要提高对 e 和 \dot{e} 的分辨率, 而采取较小的控制改变量, 要求放大 K_1 和 K_2 , 缩小 K_p 和 K_i 。为简化起见, K_1 和 K_2 放大 (或缩小) 的倍数与 K_p 和 K_i 缩小 (或放大) 的倍数相同。这样我们就可以只考虑 K_1 和 K_2 。

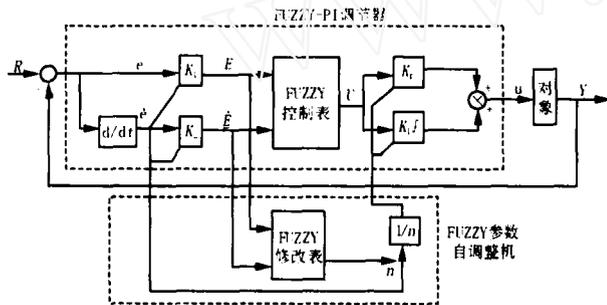


图4 参数自调整 Fuzzy - PI 调节器系统框图
Fig.4 Frame of parameter self-adjusting fuzzy-PI adjuster system

参数自调整的方法也按照模糊控制的方式进行。设放大倍数 N 的语言变量有如下辞集:

$$\underline{N} = AB + AM + AS + OK + CS + CM + CB$$

其中的语言值 AB、AM、AS、OK、CS、CM、CB 分别表示高放、中放、低放、不变、小缩、中缩、大缩的模糊概念。 \underline{N} 的论域规定为 $\underline{N} = (\frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1, 2, 4, 8)$ 。其隶属度赋值如表 6 所示。

表6 Fuzzy 变量 N 的隶属度赋值表

Tab.6 Evaluating table of membership grade of

	Fuzzy variables						
	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8
AB	0	0	0	0	0	0.5	1
AM	0	0	0	0	0.5	1	0.5
AS	0	0	0	0.3	1	0.5	0
OK	0	0	0.5	1	0.3	0	0
CS	0	0.5	1	0.3	0	0	0
CM	0.5	1	0.5	0	0	0	0
CB	1	0.5	0	0	0	0	0

表7 参数修改规则表

Tab.7 Parameter amending regular table

$\underline{E} \ \underline{N} \ \underline{\dot{E}}$	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	CB	CM	CS	OK	CS	CM	CB
NM	CM	CS	OK	OK	OK	CS	CM
NS	CS	OK	OK	AS	OK	OK	CS
NO	OK	OK	AM	AB	AM	OK	OK
PO	OK	OK	AM	AB	AM	OK	OK
PS	CS	OK	OK	AS	OK	OK	CS
PM	CM	CS	OK	OK	OK	CS	CM
PB	CB	CM	CS	OK	CS	CM	CB

表8 参数修改表

Tab.8 Parameter amending table

$\underline{E} \ \underline{N} \ \underline{\dot{E}}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	0.125	0.125	0.25	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.25	0.125	0.125
-5	0.125	0.25	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.25	0.5
-4	0.25	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.25
-3	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5
-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	1	1	1	1	1	2	4	2	1	1	1	1	1
-0	1	1	1	1	2	4	8	4	2	1	1	1	1
+0	1	1	1	1	2	4	8	4	2	1	1	1	1
+1	1	1	1	1	1	2	4	2	1	1	1	1	1
+2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
+3	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5
+4	0.25	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.25
+5	0.125	0.25	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.25	0.125
+6	0.125	0.125	0.25	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.25	0.125	0.125

参数自调整的思想可用一组模糊控制规则表示如表 7 所示。

参数修改表如表 8 所示,根据表 8 进行查表计算,就可进行参数自调整。

在进行参数自调整时,先以原来的 K_1 、 K_2 对 e 和 \dot{e} 进行量化得到 \underline{E} 和 $\underline{\dot{E}}$,然后查表得出参数应放大(或缩小)的倍数 n ,再计算出 $K'_2 = K_2 n$, $K'_1 = K_1 n$, $K'_p = K_p/n$, $K'_i = K_i/n$ 作为 Fuzzy-PI 调节器的新参数进行控制运算。

本文所研究的有源电力滤波器中,采用 Fuzzy-PI 控制器的输出作为直流电容电压控制修正量,再和阻抗变换后得到的控制电压结合在一起作为 APF 的控制电压,来控制 APF。经对比可得到:

在只对误差 e 进行比例调节时,超调量过大,而且过渡过程时间比较长,这对实时控制来说是很不利的,并且在 APF 运行过程中,如果直流电压有大的波动,就可能会造成 IGBT 的开关时间紊乱,从而造成 IGBT 过流烧坏。其电压曲线为图 5,我们可以看到超调量和过渡过程时间都很大。

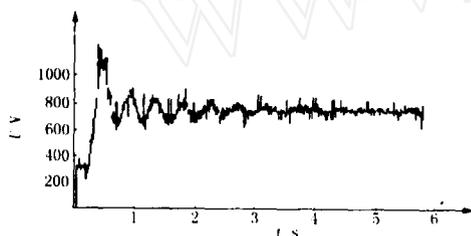


图 5 采用比例调节时的电压波形

Fig. 5 Voltage wave with proportion adjusting

采用普通的定参数 PI 调节时,APF 的直流电容电压曲线为图 6,此时可看到超调量和过渡过程时间都明显减小,已基本能满足要求。

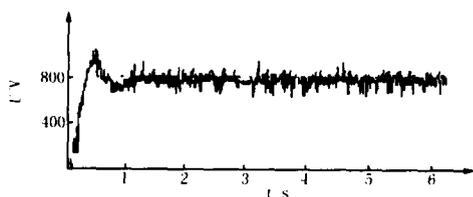


图 6 采用定参数 PI 调节时的电压波形

Fig. 6 Voltage wave with ordered parameter PI adjusting

采用 Fuzzy-PI 控制器后,超调量几乎减为零,APF 运行稳定,过渡过程时间也很小,能够满足我们进行实时控制的要求。其曲线为图 7。

在 APF 挂网运行后,我们要系统侧根据直流电压的误差 e 和误差变化率 \dot{e} 来控制系统侧发出一有功电流来实时地对直流电压进行补偿,使直流电压

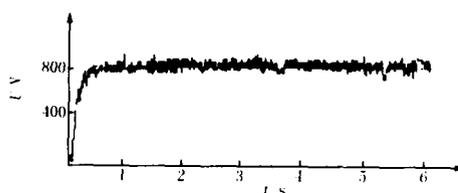


图 7 采用 Fuzzy-PI 调节时的电压波形

Fig. 7 Voltage wave with Fuzzy-PI adjusting

保持稳定,从而保证了 APF 的可靠性。

同时,也采用了 Fuzzy-PI 控制器来补偿谐波电流。我们取系统侧的电流和利用负荷侧电流分离出的有功分量的误差来进行控制,取得了较好的效果,基本上消除了静态误差。如图 8、图 9、图 10 所示。



图 8 补偿前系统电流

Fig. 8 System current before compensation

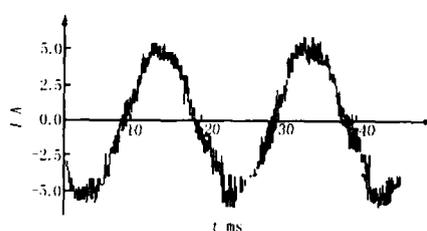


图 9 利用 Fuzzy-PI 控制器控制直流电压补偿后的系统电流

Fig. 9 System current after using Fuzzy-PI adjuster control DC voltage

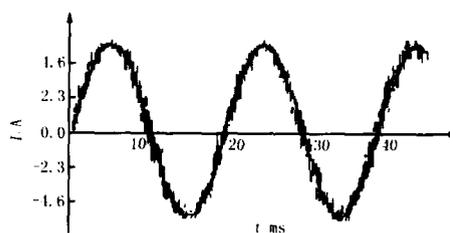


图 10 利用 Fuzzy-PI 控制器控制直流电压和系统电流后的系统电流

Fig. 10 System current after using Fuzzy-PI adjuster control DC voltage and system current

4 结论

设计了一种将 Fuzzy 控制器和 PI 调节器相结

合的 Fuzzy - PI 调节器,利用这种调节器对有源滤波器直流电压进行控制,能够克服非线性因素的影响,具有很强的鲁棒性。实验结果证明该方法比传统的比例积分控制有更好的控制效果。同时在此基础上利用 Fuzzy - PI 调节器补偿谐波电流也能取得良好的效果,实验表明补偿后的系统电流基本上消除了稳态误差。理论分析和实验结果证明该控制方法具有一系列传统控制无法与之比拟的优点,具有一定的实际应用推广价值。

参考文献:

- [1] 孙庚山,兰西柱. 工程模糊控制[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
SUN Geng-shan, LAN Xi-zhu. Engineering Fuzzy Control [M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [2] 章正斌,吴汝善,于健. 模糊控制工程[M]. 重庆:重庆大学出版社,1995.
ZHANG Zheng-bin, WU Ru-shan, YU Jian. Fuzzy Control Engineering[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1995.
- [3] 查晓明,等. 三相交流系统综合补偿的补偿分量检测研究[J]. 电网技术,1999,23(7):23-25.
- ZHA Xiao-ming, et al. Study on Measurement of Compensatory Component for Three Phase AC System Integrative Compensation[J]. Power System Technology, 1999, 23(7):23-25.
- [4] Singh B, Al-Haddad K, Chandra A. A New Control Approach to Three-phase Active Filter for Harmonics and Reactive Power Compensation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1).
- [5] Nastran J, Cajhen R, Seliger M, et al. Active Power Filter for Non-linear AC Loads[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1994, 9(1).

收稿日期: 2004-12-06; 修回日期: 2005-06-24

作者简介:

陈宇(1981-),女,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制;E-mail:chenyu030416@hotmail.com
王碧芳(1979-),女,在职硕士研究生,研究方向为电力电子;
刘会金(1952-),男,教授,博士生导师,研究方向为电能质量分析与控制。

Fuzzy control applied to the active power filter

CHEN Yu¹, WANG Bi-fang^{1,2}, LIU Hui-jin¹

(1. Wuhan University, Wuhan 410072, China; 2. Wuhan Vocational Technical College, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is difficult to calculate the differentiation constant in the classical PI control method. The variation of the constant is combined with characteristics of the controlled element. However, the Fuzzy controller with good dynamic response characteristics is not sensitive to the procedural parameters. The Fuzzy-controller have the advantages of good robust and minimum nonlinear effect. In this paper, the Fuzzy - PI controller worked on the DC voltage source of APF directly. The combined Fuzzy control and PI adapter controlled the parameters of PI controller by using the Fuzzy control method. The experiment showed the control performance is much more reasonable than that of the classical PI control. It confirms the accuracy of the theory. The Fuzzy control on the compensation current was proposed based on the result.

Key words: APF; Fuzzy control; membership grade; control law

(上接第 39 页 continued from page 39)

(College of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Using "when load current is periodic function, the integral value in a period for absolute value of load current subtracting fundamental active current is the least" as detecting principle, a detecting approach of harmonic current in single-phase circuit based on fast iterative algorithm in active power filter was proposed. It is capable of fast tracking load fundamental active current maximum value and especially the maximum value when load current takes a abrupt change. The correctness of the method was verified by theoretical analysis and simulation research.

This project is supported by High-tech Item of Jiangsu Province(No. GB2004024) and Dedicated fund for Higher Intellectuals of Jiangsu University(No. 1283000064).

Key words: active power filter; active current; reactive current; harmonic current