

文章编号:1671-251X(2011)09-0072-04

DOI:CNKI:32-1627/TP.20110828.1432.018

脉冲电源反应器的模糊控制研究

王琢玲^{1,2}, 赵金山³

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 华鲁恒升化工集团有限公司, 山东 德州 251500)

摘要:脉冲电源应用于污水处理时,需要反复调节交、直流耦合电路参数才能使反应器工作于流光放电模式。针对该方式存在的无有效可控量化指标及调节不准确问题,研究了反应器电压幅频特性以及反应器流光放电基本条件,提出了采用流光放电系数作为可控量化参数对脉冲电源反应器进行模糊控制,从而得到满足流光放电条件的交、直流叠加信号的方案。仿真及实验结果验证了该方案的可行性和有效性。

关键词:污水处理; 脉冲电源; 反应器; 流光放电; 模糊控制

中图分类号:TD926.5

文献标识码:A

网络出版时间:2011-08-28 14:32

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20110828.1432.018.html>

Research of Fuzzy Control of Reactor of Pulse Power Supply

WANG Zhuo-ling^{1,2}, ZHAO Jin-shan³

(1. College of Electrical and Information Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China. 2. Key Laboratory of Advanced Control for Industrial Process of Gansu Province, Lanzhou 730000, China. 3. Hualuhengsheng Chemical Industry Group Co., Ltd., Dezhou 251500, China)

Abstract: When a pulse power supply is used for sewage treatment, parameters of AC-DC coupling circuit must be repeatedly regulated to make the reactor work in streamer discharge mode, and there are problems of no effective controllable and quantifiable index and imprecise regulation. So the paper proposed a fuzzy control scheme for the reactor which takes streamer discharge coefficient as a controllable and quantifiable parameter to get required superposition signal of AC and DC on the basis of research of voltage amplitude-frequency characteristics of the reactor and the basic condition of streamer discharge. The simulation and experiment results showed the scheme is feasible and effective.

Key words: sewage treatment, pulse power supply, reactor, streamer discharge, fuzzy control

0 引言

应用于污水处理领域的脉冲电源在正常工作时,其交、直流耦合电路中的反应器应工作于流光放电模式,以产生强氧化性的低温等离子体。低温等离子体将废水中的污物氧化掉,进而达到污水处理的目的。

流光放电是一种放电形式,其形成条件^[1]: (1) 在直流电压上叠加上升率大于 2×10^8 V/s 的交流电压; (2) 交流电压的峰值大于 1 kV。反应器

工作在流光放电模式下时,通常需要反复调节高压直流电源的电压值、高压交流电源的电压幅值和频率,使叠加在反应器上的交、直流电压满足流光放电条件。该方式存在两点不足: (1) 无有效的可控量化指标; (2) 调节不准确^[2]。为解决上述问题,本文分析了反应器的工作特性及其实现流光放电的条件,将流光放电变化率作为可控量化参数,对具有电压幅频特性为高阶、非线性等特点的反应器进行模糊控制,并进行仿真及实验。

1 反应器特性分析

用于污水处理的脉冲电源主电路如图1所示,其中 $R=1 \times 10^6 \Omega$, $C=1 \times 10^{-12} \text{ F}$, $C_1=5 \times 10^{-9} \text{ F}$,

收稿日期:2011-05-13

作者简介:王琢玲(1978-),女,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力拖动。E-mail:411430251@qq.com

$L_1 = 120 \times 10^{-3} \text{ H}, L_2 = 1 \times 10^{-3} \text{ H}.$

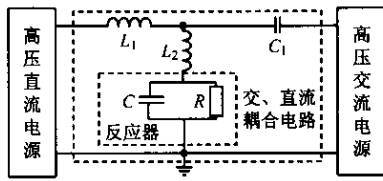


图1 用于污水处理的脉冲电源主电路

将直流电源作短路处理,由交流电源单独作用,这时交、直流耦合电路的等效电路如图2所示。

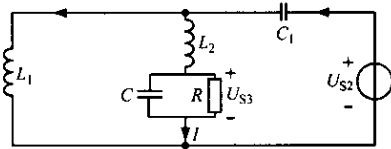


图2 交、直流耦合电路的等效电路

设 $a = sL_1$, $b = 1/(sC_1)$, $x = sL_2$, $y = R/(1/(sC)) = R/(RCs + 1)$, $z = x + y = (RCL_2s^2 + sL_2 + R)/(RCs + 1)$, 则流过反应器的电流为

$$I(s) = \frac{aU_{S2}(s)}{ab + (a+b)z} \quad (1)$$

反应器两端电压为

$$U_{S3}(s) = \frac{ayU_{S2}(s)}{ab + (a+b)z} \quad (2)$$

令 $A_1 = RC_1L_1s^2U_{S2}(s)$, $A_2 = RCC_1L_1L_2s^4 + C_1L_1L_2s^3 + (RCL_1 + RCL_2 + RC_1L_1)s^2 + (L_1 + L_2)s + R$, 则有

$$U_{S3}(s) = A_1/A_2 \quad (3)$$

设 $U_{S2}(t) = 100\sin \omega t$, 则有

$$L[U_{S2}(t)] = 100\omega/(s^2 + \omega^2) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得

$$U_{S3}(s) = B_1/B_2 \quad (5)$$

式中: $B_1 = 100\omega RC_1L_1s^2U_{S2}(s)$, $B_2 = [RCC_1L_1L_2s^4 + C_1L_1L_2s^3 + (RCL_1 + RCL_2 + RC_1L_1)s^2 + (L_1 + L_2)s + R](s^2 + \omega^2)$ 。

将相关参数代入式(5)得反应器电压幅频特性曲线,如图3所示。

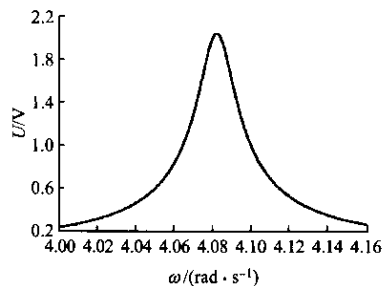


图3 反应器电压幅频特性曲线

由式(5)可知,耦合电路为高阶(四阶);从图3可看出,反应器电压幅频特性为非线性。而反应器电压幅频特性的高阶、非线性特点适合采用模糊控制方式^[4]。

2 流光放电系数的推导

按照流光放电理论,在满足反应器上直流电压数值要求的前提下,一个交流周期 T 内反应器上交流电压上升变化率大于 $2 \times 10^8 \text{ V/s}$ 的时间段与 T 的比值称为流光放电系数。流光放电系数越大,则单位交流周期内流光放电时间越长。流光放电系数的大小可明确表征反应器工作在流光放电模式下的实现程度。

流光放电系数作为可控量化指标,其推导的直接依据是流光放电形成的基本条件,推导过程如图4所示。

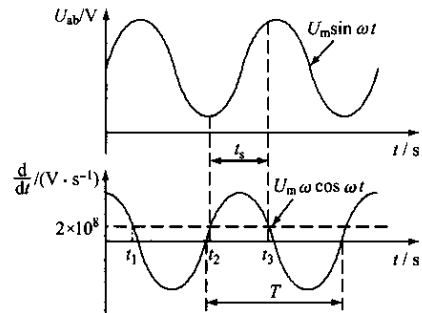


图4 流光放电系数的推导过程

首先计算交流电压上升变化率。设加在反应器两端的交流电压为 $U_m \sin \omega t$, 交流电压上升率为

$$\frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m \omega \cos \omega t \quad (6)$$

按照流光放电的要求,计算交流电压上升变化率大于 $2 \times 10^8 \text{ V/s}$ 的时间段 t_s 。当 $U_m \omega \cos \omega t = 2 \times 10^8$ 时,求得各时间点为

$$t_n = n\pi - \frac{\arccos \frac{2 \times 10^8}{U_m \omega}}{\omega} \quad (7)$$

$$t_{n+1} = n\pi + \frac{\arccos \frac{2 \times 10^8}{U_m \omega}}{\omega} \quad (8)$$

式中: n 为偶数, $n=0, 2, 4, \dots$ 。

上升变化率大于 $2 \times 10^8 \text{ V/s}$ 的时间段为

$$t_s = t_{n+1} - t_n = \frac{2\arccos \frac{2 \times 10^8}{U_m \omega}}{\omega} \quad (9)$$

设交流电源的周期为 T , 且 $T = 2\pi/\omega$, 则流光放电系数 ρ 为

$$\rho = \frac{t_s}{T} = \frac{\arccos \frac{2 \times 10^8}{U_m \omega}}{\pi} \quad (10)$$

从式(10)可看出,流光放电系数 ρ 与反应器交流峰值电压 U_m 及交流电源频率 ω 呈非线性关系。一般来说,流光放电系数小于0.5。

3 反应器模糊控制策略

3.1 模糊控制的硬件设计

以流光放电系数为可控量化指标的脉冲电源反应器模糊控制策略如图5所示,其由模糊控制器^[3]、拟合、数据转换、直流控制电路、交流控制电路、直流电源主电路、交流电源主电路等功能模块组成。

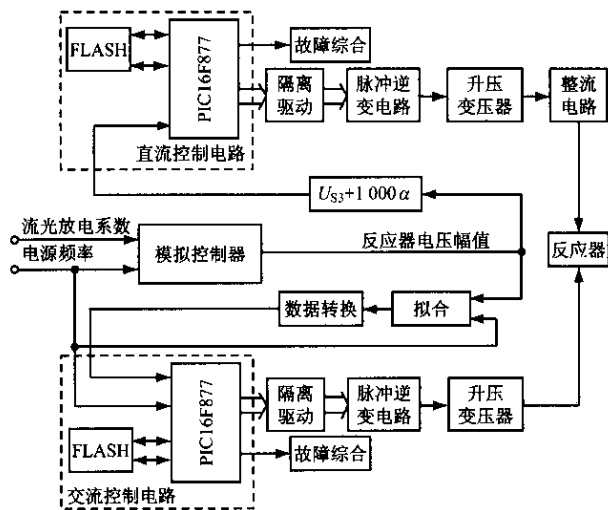


图5 脉冲电源反应器模糊控制策略

该反应器模糊控制设计方案选用二维模糊控制器^[4],其输入量为流光放电系数和电源频率,输出量为反应器电压幅值。交、直流控制电路的作用:反应器电压幅值信号经拟合、数据转换变为交流控制电路的控制信号,使交流电源主电路输出电压上升变化率大于 2×10^8 V/s的交流电压,该交流电压经交、直流耦合电路的交流输入端作用在反应器上;直流控制电路使高压直流电源输出大小为 $U_{S3} + 1000\alpha$ (V) (α 为可靠系数,一般取1~1.2)的直流电压,该直流电压经交、直流耦合电路的直流输入端作用在反应器上。

流光放电系数设置在0~0.5,通过交、直流控制电路的控制,作用在反应器上的交、直流叠加信号满足流光放电条件,反应器上流光放电的实际值为流光放电设定值。

3.2 模糊控制的软件实现

软件设计主要是根据生产中的实际数据制定表格,并进行输入、输出模糊集的设计,使模糊控制器

的输入、输出与表格中数值相符。实际控制过程中交流电源频率和流光放电系数对应的反应器电压幅值如表1所示。

表1 交流电源频率和流光放电系数对应的

流光放 电系数	反应器电压幅值 $\times 10^3$ V						
	电源频率/ $(\times 10^3$ Hz)						
	14	15	16	17	18	19	20
0.15	2.551	2.381	2.232	2.101	1.984	1.880	1.786
0.20	2.810	2.623	2.459	2.314	2.185	2.070	1.967
0.25	3.215	3.001	2.813	2.648	2.500	2.369	2.250
0.30	3.868	3.610	3.384	3.185	3.008	2.850	2.707
0.35	5.008	4.674	4.382	4.124	3.895	3.690	3.505
0.40	7.357	6.867	6.438	6.059	5.722	5.421	5.150
0.45	14.534	13.565	12.717	11.969	11.310	10.709	10.174

表1中的数值很大,且数值密度很不均匀,当流光放电系数为0.15~0.4时,反应器电压幅值较小,当流光放电系数为0.45时,反应器电压幅值很大。这决定了模糊控制器输出隶属函数的非对称、不规则特性。

软件设计分为输入模糊集的确定和输出模糊集的确定两部分。

(1) 输入模糊集的确定

输入量交流电源频率的模糊集论域为 $[14 \times 10^3, 20 \times 10^3]$ 。输入模糊集及其相应的各三角隶属函数:SF(电源频率小), $\text{trimf}(x, [14 \times 10^3, 14 \times 10^3, 17 \times 10^3])$; MF(电源频率中), $\text{trimf}(x, [14 \times 10^3, 17 \times 10^3, 20 \times 10^3])$; LF(交流电源频率大), $\text{trimf}(x, [14 \times 10^3, 20 \times 10^3, 20 \times 10^3])$ 。

输入量流光放电系数的模糊集论域为 $[0.15, 0.45]$ 。输入模糊集及其相应各三角隶属函数:NR(流光放电系数小), $\text{trimf}(y, [0.15, 0.15, 0.3])$; MR(流光放电系数中), $\text{trimf}(y, [0.15, 0.3, 0.45])$; LR(流光放电系数大), $\text{trimf}(y, [0.3, 0.45, 0.45])$ 。

(2) 输出模糊集的确定及反应器电压幅值的模糊规则表

采用重心法和最大隶属度法确定各输出三角隶属函数的“二脚一峰”,并通过Matlab仿真软件对各输出三角隶属函数的“二脚一峰”进行修改、校正。

输出量反应器电压幅值的模糊集论域为 $[1.8 \times 10^3, 14.55 \times 10^3]$ 。输出模糊集及其相应各三角隶属函数:VS(反应器电压幅值较小), $\text{trimf}(z, [1.8 \times 10^3, 1.8 \times 10^3, 2.2 \times 10^3])$; S(反应器电压幅值小),

$\text{trimf}(z, [1.8 \times 10^3, 2.55 \times 10^3, 2.8 \times 10^3])$; M (反应器电压幅值中), $\text{trimf}(z, [2.1 \times 10^3, 3.85 \times 10^3, 10.15 \times 10^3])$; L (反应器电压幅值大), $\text{trimf}(z, [2.8 \times 10^3, 10.15 \times 10^3, 14.55 \times 10^3])$; VL (反应器电压幅值较大), $\text{trimf}(z, [7.5 \times 10^3, 14.55 \times 10^3, 14.55 \times 10^3])$ 。

根据模糊规则的设计标准,建立反应器电压幅值的模糊规则表,如表2所示。

表2 反应器电压幅值模糊规则表

流光放电系数	电源频率/Hz		
	SF	MF	LF
NR	S	M	VL
MR	VS	M	L
LR	VS	S	L

4 仿真、实验结果及分析

4.1 仿真结果及分析

在Matlab仿真软件窗口Input中输入交流电源频率 x 、流光放电系数 y ,输出为反应器电压幅值 z ,得到的仿真结果如图6所示。

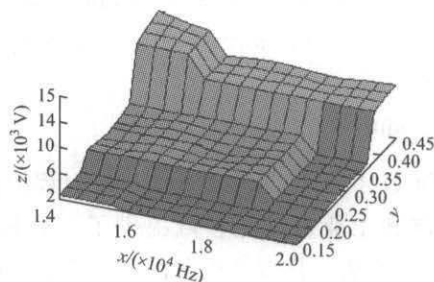


图6 流光放电系数、电源频率值不同时反应器电压幅值

从图6可看出,流光放电系数、交流电源频率值不同时,反应器电压幅值与表1一致。

4.2 实验结果及分析

实验主要器件:单片机为PIC16F877,驱动芯片为IR2113,反应器为 1×10^{-7} F,电容 $C_1 = 1 \times 10^{-6}$ F,电感 $L_1 = 1.1223 \times 10^{-4}$ H。

图7为交流电压单独作用时反应器的电压波形,图8为反应器上交、直流电压叠加波形,其中横坐标为时间,单位为 $1 \mu\text{s}$ /格;纵坐标为电压,单位为5 V/格。

对比图7、图8可看出,通过在模糊控制器的输入端设置流光放电系数,反应器可得到满足流光放电条件的交、直流叠加信号^[1]。因此,将流光放电系数作为可控量化指标的反应器模糊控制策略具有可实现性。

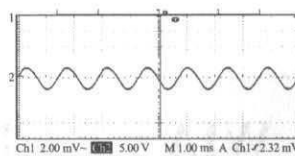


图7 交流电压单独作用时反应器电压波形

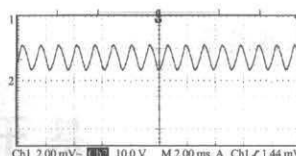
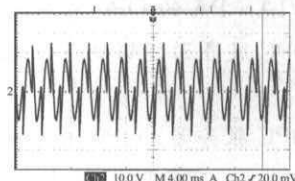
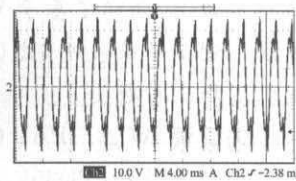


图8 反应器上交、直流电压叠加波形

图9为交流电源频率分别为380 Hz、420 Hz时反应器电压幅值波形,其中横坐标为时间,单位为4 ms/格;纵坐标为电压,单位为1 V/格。



(a) 交流电压频率为380 Hz



(b) 交流电压频率为420 Hz

图9 反应器电压幅值波形

从图9可看出,改变模糊控制器的输入交流电源频率即可改变反应器交流电压幅值的大小。实验结果与反应器电压幅频特性一致^[2]。

5 结语

通过分析反应器所在的交、直流耦合电路及其工作条件,推导出了流光放电系数,并提出一种将流光放电系数作为可控量化指标对反应器进行模糊控制的方案。该方案不仅克服了反应器交、直流电压控制过程中调节的反复性,还为反应器在流光放电模式下工作提供了量化可控指标。仿真及实验结果验证了该方案的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 王爱国,姜学东,胡小吐.低温等离子体污水处理电源的设计[J].电力电子技术,2009(2):44-46.
- [2] 王兴贵,李海波,袁俊.模糊控制高频感应加热电源的设计[J].机电工程技术,2004(4):32-33.
- [3] BLUHM H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 江伟华,张弛,译.北京:清华大学出版社,2008.
- [4] 刘金琨.智能控制[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [5] JOHN V, BUM-SEOK S, LIPO T A. High Performance Active Gate Drive for High-Power IGBTs [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007(5):55-59.
- [6] FUJITA H, AKAGI H. Pulse-density-moulated Power Control of a 4 kW, 450 kHz Voltage-source Inverter for Induction Melting Application [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009(4):47-51.