

کنترل pH با استفاده از طراحی رویتگر مد لغزشی و مقایسه آن با PI و GSPI

علیرضا رضائی*

استادیار، بخش مکترونیک، گروه فناوری بین رشته ای، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

علیرضا عابدینی مزرعه

دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مکترونیک گروه فناوری بین رشته ای، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله کنترل pH محلول کشت در یک راکتور آزمایشگاهی مد نظر گرفته شده است. روند کنترل pH در این مقاله، به این صورت می باشد که یک نمونه اولیه از ترکیب جریان اسید و باز به طور مداوم در مخزن راکتور به نسبت های مناسب هم زده می شود و سپس با توجه به جدول بهره PEM معادله حالت pH به دست آورده شده و در ادامه با بهینه کردن ضرایب PI، کنترل گر PI طراحی میشود. کنترل گر PI کلاسیک قادر به کنترل کردن این فرایند نبوده، برای همین منظور از رویتگر حالت استفاده شده که با دقت بالا توانسته کنترل لازم را انجام دهد. رویتگر پیشنهادی، به دلیل طراحی بدون خطی سازی، متغیرهای حالت را با دقت بسیار بالایی تخمین می زند. در طراحی رویتگر غیر خطی، از مد لغزشی استفاده شده است. این روش برای تخمین متغیرهای حالت سیستم های غیر خطی نامعین مناسب است؛ اما به دلیل رخ دادن چترینگ، کارایی آن به شدت کاهش می یابد. برای جلوگیری از چترینگ و همچنین برای افزایش دقت از نظریه مد لغزشی مرتبه دوم فرایچش برای طراحی رویتگر غیر خطی استفاده شده است؛ در نهایت رویتگر غیر خطی با استفاده از نظریه مد لغزشی طراحی و شبیه سازی گردیده است.

واژه های کلیدی: رویتگر، سیستم غیر خطی، پدیده چترینگ، مد لغزشی مرتبه دوم، الگوریتم فرایچش.

PH control using sliding mode Observer design and Comparison with the PI and GSPI

A. Rezaee

Mechatronic engineering group, Faculty of new sciences and technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

A. Abedini

Master of student, Faculty of new sciences and technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

In this paper, the pH control solution is considered in a laboratory reactor. A prototype of an acid and an open stream is continuously coupled to the reactor tank in an appropriate proportions is used for PH process control then, according to the PEM table, the equation of the pH state is obtained after that with Optimizing the PI coefficients, the PI controller is designed. The classic PI controller was not able to control this process, so the state-of-the-art observer was used, which was able to control with high precision. The proposed observer estimates state variables with extreme precision due to linear design. In the design of non-linear observation, sliding mode control is used. This method is suitable for estimating the state variables of the non-linear nonlinear systems, but due to the occurrence of chattering, its efficiency is greatly reduced. In order to prevent chattering and also to increase the accuracy, the second-order slip-off theory of the flicker is used to design non-linear observation. Finally, a nonlinear viewer is designed and simulated by using of modeling theory.

Keywords: Observer, Nonlinear system, Charting phenomenon, Second order slip mode, Polynomial algorithm.

دسترسی پیدا کرد. در این موارد برای پیاده سازی کنترل پسخور حالت، تخمین متغیرهای حالت الزامی است. سیستم دینامیکی که متغیرهای حالت آن تخمینی از متغیرهای حالت سیستم اصلی باشند را رویتگر می نامند. درواقع رویتگر سیستم دینامیکی است که ورودی های آن ورودی سیستم اصلی و خروجی آن، خروجی متغیرهای حالت را تخمین می زند [۱] [۲]. به طور کلی در [۱] از یک PID جهت کنترل سیستم استفاده شده که نتایج نه چندان مطلوبی را به همراه داشته است. همچنین در این مقاله جهت بهبود کار از میکسر دوگانه استفاده شده است.

در [۳] کنترلی ترکیبی از PID و شبکه عصبی برای بهبود دقت و قدرت سیستم کنترل pH طراحی شده است. همچنین در [۴] یک

۱- مقدمه

در بسیاری از روش های کنترل خطی به تمامی متغیرهای حالت برای تولید سیگنال کنترلی نیاز است؛ اما در بسیاری از کاربردهای واقعی، اندازه گیری تمامی متغیرهای حالت امکان پذیر نبوده و یا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. برای مثال ممکن است که متغیرهای حالت غیر فیزیکی باشند و یا اینکه به علت تعداد زیاد متغیرهای حالت، اندازه گیری تمامی آن ها بسیار دشوار باشد. در برخی شرایط ممکن است که به علت نویز فراوان محیط، اندازه گیری های انجام شده برای استفاده در پسخور مناسب نباشد. در تمامی این موارد و مواردی از این قبیل نمی توان به تمام متغیرهای حالت برای استفاده در پسخور

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: arzeae@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۵

حسگر pH مبتنی بر گواشی هوشمند که قادر به اندازه گیری سطح آبی رنگی است، پیشنهاد شده است. معیارهای عملکردی مورد بررسی برای حسگر طراحی شده نشان دهنده دقت، صحت وضوح و رزولوشن بالا تا 0.12 pH و یا بیشتر است. در این مقاله توانایی حسگر pH گواشی هوشمند را برای اندازه گیری تغییرات کوچک pH نمونه های مختلف محلول با دقت و وضوح خوبی نشان داده شده است. به دلیل اندازه کوچک، حسگر طراحی شده را می توان برای انتقال اطلاعات pH از جسم آب در هر محیطی استفاده کرد. فرآیند pH در یک مخزن ترکیب را می توان به دو قسمت دینامیکی و استاتیکی تقسیم کرد.

۲- مروری بر کنترل pH

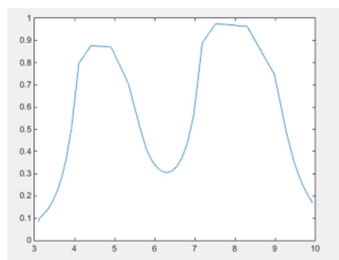
مرور نسبتاً جامعی بر چگونگی روش های کنترل حلقه-باز، کنترل پیشخور کنترل پسخور، کنترل غیرخطی، کنترل تطبیقی، کنترل مبتنی بر مدل و کنترل غیر مبتنی بر مدل برای فرآیند pH در [۷-۹] آمده است. در آنها ذکر شده که کنترل کننده های کلاسیک PID دارای پارامترهای ثابت کنترل کننده های معمولی برای کنترل pH هستند و این مساله بدیهی است، چرا که فرآیندهای صنعتی اکثراً دارای تغییرات کم pH هستند و تقریباً خطی هستند، اما بخش قابل توجهی از فرآیندهای pH سخت هستند که نظریه های کنترل پیشرفته برای آنها سودمند است. از آنجایی که نامتغیرهای واکنش به طوری روی خط قابل اندازه گیری نمی باشند و سیستم خطی شده رؤیت ناپذیر است، یک رؤیت گر حلقه باز در کنار کنترل کننده خطی ساز ورودی-خروجی قرار می گیرد. کنترل کننده های غیرخطی "backstepping" به صورت کنترل کننده های تطبیقی غیرمستقیم برای مدل های غیرخطی مبتنی بر نامتغیرهای واکنش در [۱۰-۱۲] طراحی شده اند. مرجع [۱۳] روش شناسایی پسخور رله ای را برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PI به صورت آزمایشگاهی تست کرده است. با روشی مشابه، [۱۴، ۱۵] با شناسایی منحنی تراسیون فرآیند پارامترهای کنترل کننده PI را برای دستگاه آزمایشگاهی تعیین می کند. مرجع [۱۶] ضمن معرفی کامل فرآیندهای pH چند-تانه که بیان می کند که برای سیستم های اسیدقوی-بازقوی با محدوده گسترده pH استفاده از چند تانک با حجم و دبی مناسب کنترل کننده های PI یا PID محلی را کنترل کننده های مناسب می سازد [۱۷، ۱۸] البته کنترل کننده PID کلاسیک را یک کنترل کننده پایه و البته ضعیف برای کنترل pH به عنوان یک "سیستم تست نمونه" معرفی می کند.

۳- بیان مساله

در این مقاله مسئله طراحی روی تگر غیر خطی با استفاده از ایده ی مد لغزشی مرتبه دوم در کنترل فرآیند شیمیایی مدنظر قرار می گیرد. [5,6]. روش ارائه شده در این پروژه در یک مثال شبیه سازی برای تخمین متغیرهای حالت و نامعینی مورد ارزیابی قرار می گیرد و در نهایت فرآیند pH با تکنیک های حلقه بسته مختلف کنترل شده است. در جدول ۱ اطلاعات موجود در بانک اطلاعات pH می باشد که

مدل سازی فرآیند آن در PEM آمده است. با استفاده از این جدول معادله حالت به دست آمده است. باید به این مسئله توجه کرد در ناحیه هایی که بهره سیستم بالا است تغییر ارتفاع کمتر می باشد و لذا تغییر قطب مدل نیز کمتر خواهد بود که با توجه به روابط نظریه داده شده به راحتی قابل توجیه است. با مقایسه بهره استاتیک مدل ها در حالت نامی و حالت اغتشاشی ۴ (در نمودار شکل ۱ که دبی قطع می شود) می توان به یافته قبلی صحت گذاشت که بهره استاتیک یا رفتار غیرخطی سیستم با تغییر دبی جریان بافر به شدت تغییر می کند؛ اما در حالت اغتشاشی ۶ که مقدار دبی جریان اسید ورودی تغییر کرده است، معادله دینامیکی pH به صورت معادله (۱) می باشد که در آن برای تخمین مقدار K از جدول ۱ استفاده شده است. در شکل ۱ مقادیر مختلف بهره در pH های مختلف با استفاده از جدول ۱ به دست آمده است.

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ts}}{\tau s + 1} \quad (1)$$



شکل ۱- نمودار حاصل از مدل سازی جدول ارائه شده در PEM

تأخیر موجود در مدل کلی pH باعث شده تا نتوان مقدار pH را به صورت دقیق در هر لحظه داشت، برای کاهش تأثیر تأخیر، از روی تگر غیرخطی مدل لغزشی استفاده شده است. برای مدل سازی فضای حالت سیستم از تقریب مرتبه اول پاده ۲ تأخیر استفاده شده است.

بنابراین معادله حالت سیستم را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Df(x, w) \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

که در آن $f(\cdot)$ تابعی مربوط به عدم قطعیت های مدل و تأثیرات اغتشاش در خروجی است که باندی برای آن وجود دارد ($\|f\| < f_0$) با این توضیحات ماتریس های حالت به صورت زیر است.

$$A = \begin{bmatrix} 1/T & -1/T \\ 0 & -1/\tau \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ K/\tau \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

۴- طراحی روی تگر مد لغزشی

در این بخش طراحی روی تگر با استفاده از نظریه های مد لغزشی ارائه می گردد. برای سیستم ۱ ساختار معادله ۴ به عنوان روی تگر غیرخطی مد لغزشی در نظر گرفته می شود:

² Pade

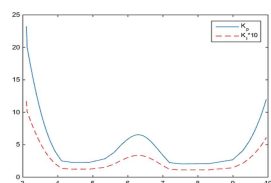
¹ Benchmark

استفاده از این توابع می‌تواند خطا ایجاد کند که با انتخاب شیب مناسب می‌توان تا حد زیادی مشکل را حل کرد.

۵- طراحی کنترل کننده

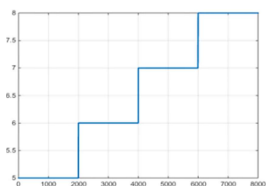
در این مقاله از کنترل کننده PI با زمان بندی بهره ۱ برای کنترل مؤثر در تمام دامنه کنترل استفاده شده است. برای هر نقطه کار ضرایب مناسب برای PI به دست آمده و از برازش بین این نقاط بهره‌های P و I به دست آمده است. برای مقایسه کارایی سیستم نتایج با کنترل کننده متداول PI و نیز PI با جدول بندی بهره (که پسخور از خروجی سیستم دارد نه روینگر) مقایسه شده است.

سیگنال مرجع اعمالی به سیستم برای دنبال کردن سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است. سیگنال طوری انتخاب شده است که محدوده وسیعی از ناحیه کاری پوشش داده شود تا عملکرد کنترل کننده غیرخطی در نقاط کاری مختلف محک زده شود. برای اینکه بتوان نشان داد که روینگر طراحی شده قادر به کنترل دبی جریان ورودی می‌باشد، مقدار جریان به ورودی سیستم (دبی جریان ورودی) به صورت سیگنال شکل ۳ اعمال شد.



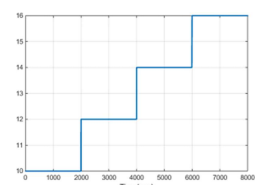
شکل ۲- منحنی مقادیر ضرایب کنترل کننده PI برای نقاط مختلف کاری. K_p (منحنی آبی) و K_p*10 (منحنی قرمز) برابر ۱۰ برابر (منحنی

rank(CD) = 1
خط چین قرمز)



شکل ۳- سیگنال مرجع اعمالی pH به سیستم برای دنبال کردن

سیستم



شکل ۴- سیگنال وارد شده به جریان ورودی

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - G_L(y - \hat{y}) + G_n v \\ \hat{y} = \hat{x}_1 \end{cases} \quad (4)$$

جدول ۱- اطلاعات موجود در بانک اطلاعات pH که مدل سازی محلی فرآیند pH در PEM بر اساس آن به دست آمده

Input	Output pH	Gain
5	3.10388 2322	0.05450 5555
6.125	3.20148 2928	0.1126
6.5	3.24370 7918	0.12066 7
6.875	3.28895 7879	0.13028 8
8.75	3.59071 9263	0.23398
9.125	3.67846 173	0.28333 2
9.5	3.78471 1309	0.36119 6
9.875	3.92015 9754	0.50037 3
10.25	4.10779 9789	0.79719 8
10.625	4.40674 8987	1.33524 9
11	4.90746 7386	1.15086 2
13.625	6.31670 8115	0.30523 7

که در آن G_L و G_n به طور مناسبی انتخاب می‌شوند. شرایط زیر باید برقرار باشد تا روینگر فوق همگرا شود:

صفه‌های تغییرناپذیر (A, C, D) سمت چپ محور موهومی قرار گیرند.

برای سیستم کنترل PH شرایط فوق برقرار است.

با توجه به پیشنهاد [۱۳-۱۹] با انتخاب

$$G_L = \begin{bmatrix} \frac{1}{T} - a_{ss} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad G_n = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

که $a_{ss} > 0$ بنابراین دینامیک خطا به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{e} = (A - G_L C)e + D(f - v) \\ e = x - \hat{x} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن v عبارت است از:

$$v = \begin{cases} \rho \frac{e_y}{\|e_y\|}, & e_y \neq 0 \\ 0, & e_y = 0 \end{cases} \quad (7)$$

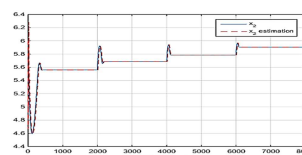
باید شرط زیر را برآورده سازد.

$$\rho > f_0 \quad (8)$$

که در اینجا f_0 پهنای باند می‌باشد. در این حالت با وجود عدم قطعیت‌های احتمالی سیستم روینگر پایدار بوده و حالت‌های روینگر در زمان محدود به حالت‌های سیستم (۲) خواهد رسید. برای کم کردن چترینگ در تخمین می‌توان از فرمت‌های نرم‌تری به جای تابع علامت رابطه (۷) استفاده کرد، مانند تابع اشباع و یا تانژانت معکوس. ولی

¹ Gain Scheduled PI

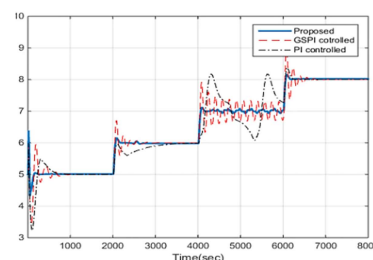
تخمین حالت x_2 (pH بدون تأخیر) در شکل (۴) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است روینگر غیرخطی توانسته در نقاط مختلف کاری به خوبی حالت را دنبال بکند.



شکل ۵- تخمین حالت x_2 به وسیله روینگر خطی

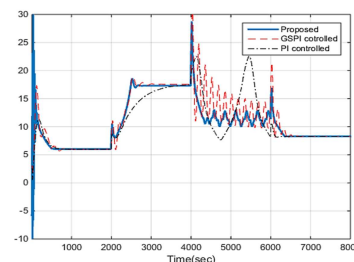
۶- نتایج شبیه سازی روینگر پیشنهادی

در این بخش نمودارهای کنترلی هر سه کنترل گر نمایش داده می شود. سیگنال شکل (۲) به عنوان سیگنال خروجی مرجع می باشد که در این بخش نشان داده می شود که کنترل گر طراحی شده به خوبی قادر به کنترل می باشد.



شکل ۶- خروجی سیستم pH اندازه گیری شده

با توجه به شکل ۶ مشاهده می شود که GSPI توانسته نسبت به PI با دقت بالاتری کنترل کند ولی در pH برابر ۷ دچار نوسان شده و به پایداری نرسیده است در حالی که روینگر مد لغزشی طراحی شده توانسته علاوه بر اینکه نسبت به GSPI در قسمت های مختلف کنترل کند در pH برابر ۷ به حالت پایداری رسیده و به خوبی کنترل کرده است. سیگنال کنترلی اعمالی به سیستم برای هر سه کنترل کننده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- سیگنال کنترلی اعمالی به سیستم برای هر سه کنترل کننده

در نمودار شکل ۷ مشاهده می شود که سیگنال کنترل گر PI و GSPI علاوه بر اینکه نتوانسته کنترل کند دارای نوسانات شدید بوده و نسبت به نویز حساسیت بالایی داشته است؛ همچنین سیگنال کنترلی کنترل گر طراحی شده دارای نوسانات کم بوده و نسبت به کنترل گرهای

دیگر دارای نوسانات کمتر می باشد.

۷- نتیجه گیری

به دلیل وجود فاز تأخیر در کنترل pH کنترل گرهای کلاسیک از جمله PI قادر به کنترل pH نمی باشند به همین دلیل برای رفع قسمت تأخیر معادله دینامیکی pH از روینگر مناسب استفاده شده است. در این مقاله روینگر غیرخطی با استفاده از نظریه مد لغزشی طراحی و شبیه سازی گردید. روینگر مد لغزشی پیشنهادی به دلیل اینکه بدون خطی سازی طراحی شده، متغیرهای حالت را با دقت بسیار بالایی تخمین می زند. با توجه به جدول بهره و معادله دینامیکی pH کنترل گر PI و GSPI نشان داده شده است که GSPI توانسته نسبت به کنترل گر PI کنترل کند ولی در pH برابر ۷ دچار نوسان می باشد و این دو کنترل گر قادر به کنترل pH نبوده که با کنترل گر طراحی شده به خوبی کنترل کرده و سیگنال کنترلی آن نسبت به PI و GSPI دچار نوسان کمتری می باشد.

۸- مراجع

- [۱] خاکی صدیق ع.، سیستم های کنترل غیر خطی، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۳۸۶.
- [۲] خاکی صدیق ع.، اصول کنترل مدرن، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.
- [3] Lu A. E., Paulson J. A., and Braatz R. D., pH and conductivity control in an integrated biomanufacturing plant, in *American Control Conference (ACC)*, 2016, pp. 1741-1746, 2016.
- [4] Shinsky F. G., pH and pION control in process and waste streams: *John Wiley & Sons Inc.*, 1973.
- [5] Yang Y. and Wu Q., A neural network PID control for PH neutralization process, in *Control Conference (CCC)*, 35th Chinese, pp. 3480-3483, 2016.
- [6] Harl N. and Balakrishnan S., Impact time and angle guidance with sliding mode control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 20, No.1, pp. 1436-1449, 2013.
- [7] Li X. R. and Bar-Shalom Y., Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking, *Control Systems Technology*, Vol. 1, No.2, pp. 186-194, 1993.
- [8] Rezaee A. and Pajohesh M., Suspension System Control with Fuzzy Logic, *Journal of Communications Technology, Electronics and Computer Science*, Vol. 6, No.3, pp. 1-5, 2016.
- [9] Rezaee A. and Shekealgourabi F. J., Improving the performance of PID controllers by using evolutionary algorithm, *Asian Journal of Mathematics and Computer Research*, Vol. 8, No.3, pp. 82-91, 2016.
- [10] Kang T.-S., Yoon T.-W., Yang D. R., and Yoon S.-S., Adaptive output feedback nonlinear control of a pH process with an input constraint, , 2000. *Proceedings of 39th IEEE Conference on in Decision and Control*, pp. 4538-4543, 2000.
- [11] Yoon S.-S., Yoon T.-W., Yang D. R. and Kang T.-S., Indirect adaptive nonlinear control of a pH process, *Computers & chemical engineering*, Vol. 26, No.2, pp. 1223-1230, 2002.
- [12] Lee T. C., Yang D. R., Lee K. S. and Yoon T.-W., Indirect adaptive backstepping control of a pH neutralization process based on recursive prediction

- error method for combined state and parameter estimation, *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 40, pp. 4102-4110, 2001.
- [13] Sung S. W. and Lee I.-B., pH control using a simple set point change, *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 34, No.6, pp. 1730-1734, 1995.
- [14] Chan H.-C. and Yu C.-C., Autotuning of gain-scheduled pH control: an experimental study, *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 34, No.4, pp. 1718-1729, 1995.
- [15] Sung S. W., Lee I.-B., and Yang D. R., pH Control Using an Identification Reactor, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 34, No.3, pp. 2418-2426, 1995.
- [16] Faanes A. and Skogestad S., pH-neutralization: Integrated process and control design, *Computers & chemical engineering*, Vol. 28, No.4, pp. 1475-1487, 2004.
- [17] Saadat A., Alvanagh A., and Rezaei H., pH control in biological process using MMPC based on neuro-fuzzy model by LOLIMOT algorithm, in *Control Conference (ASCC), 2013 9th Asian*, pp. 1-6, 2013.
- [18] Alvarez H., Londoño C., Sciascio F. di, and Carelli R., pH neutralization process as a benchmark for testing nonlinear controllers, *Industrial & engineering chemistry research*, Vol.40, No.3, pp. 2467-2473, 2001.
- [19] Edwards C., Spurgeon S. K., and Patton R. J., Sliding mode observers for fault detection and isolation, *Automatica*, Vol. 36, No.4, pp. 541-553, 2000.