



طراحی کنترل کننده بهینه غیرخطی برای یک واحد هواساز در سیستم تهویه مطبوع

فریبا بوذری لیاولی^{۱*}، حسن کریمی^۲

۱. دکترای مهندسی برق کنترل و سیستم، رئیس بخش تحقیق و توسعه مهندسی برق و کنترل، شرکت رادین کنترل البرز، قزوین، ایران
۲. مهندسی مکانیک سیستم‌های حرارتی و برودتی، رئیس بخش مهندسی برق و مکانیک، شرکت رادین کنترل البرز، قزوین، ایران

*نویسنده مسئول: fbouzari@ymail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

چکیده

طراحی یک سیستم کنترل غیرخطی برای واحد هواساز به دلیل پیچیدگی و ویژگی‌های غیرخطی و همچنین تعامل میان متغیرهای حالت سیستم، به عنوان یک فرآیند چالش برانگیز و دشوار شناخته می‌شود. از این رو، استفاده از رویکرد کنترلی که بتواند تمام پیچیدگی‌های مدل دینامیک سیستم هواساز را از نظر فرآیند کنترل در نظر بگیرد، غیرممکن می‌باشد. این پژوهش از روش معادله ریکاتی وابسته به حالت برای بهینه‌سازی کنترل غیرخطی سیستم هواساز با در نظر گرفتن محدودیت‌های ورودی بهره گرفته است. بدین منظور با به‌کارگیری روش شبه خطی‌سازی و حفظ تمامی خصوصیات غیرخطی سیستم، قانون کنترل بهینه برای ردیابی خروجی در شرایط وجود ورودی‌های محدود طراحی می‌شود. علاوه بر این، قادر است با کنترل سیگنال مرجع، به ردیابی مسیر مرجع پردازد و در عین حال مصرف انرژی را به حداقل برساند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از کارایی بالا و اثربخشی این روش در ردیابی مسیرهای مرجع است، به‌ویژه در مواقعی که نقطه تعادل تغییر کند و ورودی‌های مقید به سیستم اعمال می‌شود. روش معادله ریکاتی وابسته به حالت می‌تواند با دقت و سرعت بالا با چالش‌های دینامیکی مختلف مقابله کرده و پایداری سیستم را حفظ نماید.

کلمات کلیدی: سیستم تهویه مطبوع، واحد هواساز، شبه خطی‌سازی، معادله ریکاتی وابسته به حالت، ورودی مقید.

مقدمه

برای حفظ شرایط ایده‌آل دما و رطوبت در فضاهای مسکونی، مراکز پزشکی و درمانی، مراکز هسته‌ای، مراکز آموزشی، فروشگاه‌های مواد غذایی، مراکز صنعتی، خطوط رنگ در صنایع خودروسازی، پالایشگاه‌ها، نیاز به سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع آمری حیاتی است. این سیستم‌ها نه تنها به کیفیت هوای داخلی کمک می‌کنند، بلکه سلامت و آسایش ساکنان و کارکنان این فضاها را نیز تضمین می‌نمایند. طبق بیانیه انجمن مهندسين گرمایش، تبريد و تهويه مطبوع آمريکا، سیستم‌های تهویه مطبوع به منظور تنظیم دما و رطوبت در محیط‌های داخلی بناها طراحی و پیاده‌سازی می‌شوند. این سیستم‌ها به حفظ دما مطلوب و بهداشت کاربران کمک می‌کنند. از سیستم‌های تهویه مطبوع می‌توان به موارد مینی چیلر، چیلرهای آب خنک و هوا خنک، کندانسینگ یونیت،^۳ داکت اسپلیت، فن کوئل، و هواساز^۱ اشاره نمود [۱]. این سیستم‌ها به منظور تامین شرایط مناسب دما و رطوبت در ساختمان‌ها و فضاهای مختلف به کار می‌روند و هر کدام ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند. پیچیدگی و غیرخطی بودن ارتباطات میان متغیرهای حالت در سیستم هواساز، مشکلات متعددی را برای طراحی کنترل‌کننده به وجود می‌آورد. ویژگی‌های پیچیده و غیرخطی موجود در ارتباطات متغیرهای حالت سیستم هواساز، طراحی کنترل‌کننده را با چالش‌های قابل توجهی همراه می‌سازد. از این رو، توسعه یک روش کنترلی موثر که ضمن رعایت تمامی محدودیت‌های عملی، بتواند عملکرد مطلوبی را ارائه دهد، یکی از زمینه‌های کلیدی در کنترل سیستم‌های هواساز به شمار می‌رود [۲]. مرادی و همکاران [۳] به بررسی و مقایسه روش‌های کنترل غیرخطی چند متغیره پرداخته شده، که در آن تکنیک‌های خطی‌سازی فیدبک

¹ State-Dependent Riccati Equation (SDRE)

² Heating, Ventilation, and Air-Conditioning (HVAC)

³ Condensing Unit

⁴ Air Handling Unit (AHU)



حالت و جایابی قطب برای واحد هواساز با در نظر گرفتن وجود آشفتگی‌های هارمونیک تحلیل شدند. علاوه بر این، مطالعه‌ای دیگر، مرادی و همکاران [۴] به مقایسه دو رویکرد خطی‌سازی فیدبک و جدول بهره برای کنترل دینامیک‌های غیرخطی سیستم هواساز اختصاص داده شده است. لیاوولی و همکاران [۵] یک تکنیک مبتنی بر معادله ریکاتی وابسته به حالت برای کنترل دما و رطوبت یک واحد هواساز با معادلات غیرخطی را بررسی نمودند. در این تحقیق، به جای استفاده از روش‌های خطی‌سازی، رویکردی مستقیم به کار گرفته شده و عملکرد این روش از طریق ارزیابی نتایج حاصل از یک تنظیم‌کننده درجه دوم خطی^۱ ارایه شده است. مطالعه ایشان به معرفی بینش‌های جدیدی در کنترل سیستم‌های هواساز غیرخطی کمک کرده و کارایی روش‌های پیشنهادی را در شرایط واقعی به نمایش گذاشته است. در تحقیق لیاوولی و همکاران [۶] یک رویکرد ترکیبی شامل کنترل‌کننده و ریت‌گر مبتنی بر معادله ریکاتی وابسته به حالت برای سیستم هواساز طراحی و شبیه‌سازی شده است. در این مطالعه، عملکرد این روش با ریت‌گر فیلتر کالمن توسعه یافته مقایسه گردیده است. هدف این مقایسه، تحلیل تفاوت‌های کارایی و قابلیت‌های هر یک از این روش‌ها در بهینه‌سازی عملکرد سیستم هواساز می‌باشد. تحقیق آنها به تامین استراتژی عمیق‌تر در زمینه کنترل و تخمین حالت‌های واحد هواساز کمک می‌کند. لیاوولی و همکاران [۷] طراحی کنترل‌کننده مدل پیش‌بینی غیرخطی چندمتغیره برای واحد هواساز در یک سیستم حجم هوای متغیر را طراحی نمودند. این کنترل‌کننده از الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی با قیود^۲ استفاده می‌کند و بر بهینه‌سازی پیوسته و آنلاین یک تابع هزینه با افق محدود تمرکز دارد. یکی از ویژگی‌های کلیدی این روش، پیش‌بینی رفتار آینده سیستم هواساز برای تولید سیگنال کنترل است، به طوری که نیازی به بررسی خطاهای گذشته ندارد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها حاکی از عملکرد قابل قبول روش کنترل‌کننده از الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی با قیود در تخمین و ردیابی نقطه تنظیم مطلوب است و این روش نسبت به تنظیم‌کننده درجه دوم خطی نتایج بهتری را نشان می‌دهد. نتایج مطالعه بیان می‌کند که ورودی‌های کنترلی تولید شده توسط کنترل‌کننده ممکن است توسط اکچویاتورهای شیر دو راهه موتوری یا موتور دمپر در هواساز قابلیت اجرا شدن را نداشته باشد. این مسئله در تحقیقات اخیر بررسی نشده است و به عنوان چالش در این تحقیق مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در پژوهش حاضر ابتدا به معرفی سیستم هواساز، اجزای مکانیکی و الکتریکی، معادلات دینامیکی و نقطه تعادل آن پرداخته می‌شود. معادله ریکاتی وابسته به حالت و نحوه طراحی کنترل‌کننده برای یک واحد هواساز در حالت سرمایه‌گذاری در سیستم تهویه مطبوع نیز بیان می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی به همراه جدول و نمودارهای پارامترهای هواساز ارایه می‌گردد.

معرفی سیستم هواساز

هواسازها به عنوان اجزای اساسی در سیکل‌های تبرید شناخته می‌شوند و قادرند در انواع چیلرها با کویل‌های انبساط مستقیم مورد استفاده قرار گیرند. در پروژه‌های صنعتی، به ویژه در خطوط رنگ آمیزی، این دستگاه‌ها به عنوان ایرواشر عمل کرده و دما و رطوبت هوا را در فرآیند نقاشی تنظیم می‌کنند. این تنظیمات برای حفظ کیفیت رنگ و جلوگیری از مشکلات ناشی از نوسانات رطوبتی اهمیت زیادی دارد. هواساز به واسطه عبور هوا و آب و مجهز بودن به سیستم کنترل مناسب، توانایی تغییر شرایط محیطی را دارد و می‌تواند دما و رطوبت مطلوب را به وجود آورد. بخشی از تجهیزات مکانیکی شامل انواع فیلترهای مختلف (فلزی، هپا، پلی‌تد و کیسه‌ای)، الکتروفن، جعبه‌های اختلاط، کویل‌های آب گرم و سرد، دمپرها و محفظه رطوبت‌زن می‌باشد. در بخش تجهیزات الکتریکی، می‌توان به لامپ گندزدایی، انواع ترنس‌میتورهای اختلاف فشار، سنسورهای دما و رطوبت کانالی، سیستم کنترل مرکزی قابل برنامه‌ریزی، ترموستات‌ها، اکچویاتور موتور دمپر و اکچویاتور شیر دو راهه موتوری مختلف اشاره کرد [۸].

¹ Linear Quadratic Regulator (LQR)

² Extended Kalman Filter (EKF)

³ Nonlinear Model Predictive Controller (NMPC)

⁴ Variable Air Volume (VAV)

⁵ Function of Minimum of Constrained Nonlinear (FMINCON)



معادلات دینامیکی سیستم هواساز

برای به دست آوردن معادلات ترمودینامیکی واحد هواساز به مفروضات زیر نیاز می‌باشد [۹]:

- هواساز مجهز به کویل آب سرد است.
- هیچ نشتی هوا در فضای داخلی وجود ندارد.
- محدوده تغییرات پارامترهای هواساز حول مقادیر می‌باشند.

با در نظر گرفتن این فرضیات، معادله ترمودینامیکی هواساز به صورت رابطه (۱) ارائه می‌شود [۱۰]:

$$\begin{cases} \dot{T}_t = \frac{1}{\rho_a C_{pa} V_t} (\dot{Q}_o - h_{fg} \dot{M}_o) + \frac{\dot{f}_a h_{fg}}{C_{pa} V_t} (w_t - w_s) - \frac{\dot{f}_a}{C_{pa} V_t} (T_t - T_s) \\ \dot{w}_t = \frac{\dot{M}_o}{\rho_a V_t} - \frac{\dot{f}_a}{V_t} (w_t - w_s) \\ \dot{T}_s = \frac{\dot{f}_a}{V_c} (T_t - T_s) - \frac{\dot{f}_a h_w}{C_{pa} V_c} (0.25w_o + 0.75w_t - w_s) + \frac{0.25\dot{f}_a}{V_c} (T_o - T_t) - \dot{f}_w \left(\frac{\rho_w C_{pw} \Delta T_c}{\rho_a C_{pa} V_c} \right), \end{cases} \quad (1)$$

که در آن T_t ، T_s و w_t به ترتیب دمای فضای داخلی، دمای هوای کانال رفت و نسبت رطوبت داخلی است. در رابطه (۱) \dot{f}_a آهنگ جریان هوا و \dot{f}_w آهنگ جریان آب سرد هستند.

$$x_1 = T_t, \quad x_2 = w_t, \quad x_3 = T_s, \quad u_1 = \dot{f}_a, \quad u_2 = \dot{f}_w, \quad \alpha_1 = \frac{1}{V_t}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{\rho_a V_t}, \quad \alpha_3 = \frac{1}{V_c}, \quad (2)$$

$$\beta_1 = \frac{h_{fg}}{C_{pa} V_t}, \quad \beta_2 = \frac{\rho_w C_{pw} \Delta T_c}{\rho_a C_{pa} V_c}, \quad \gamma_1 = \frac{1}{\rho_a C_{pa} V_t}, \quad \gamma_2 = \frac{h_w}{C_{pa} V_c}.$$

با توجه به تعاریف ارائه شده، رابطه (۱) به شکل رابطه (۳) بازنویسی می‌گردد.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\alpha_1 u_1 (x_1 - x_3) + \beta_1 u_1 (x_2 - w_s) + \gamma_1 (\dot{Q}_o - h_{fg} \dot{M}_o) \\ \dot{x}_2 = \alpha_2 \dot{M}_o - \alpha_1 u_1 (x_2 - w_s) \\ \dot{x}_3 = \alpha_3 u_1 (x_1 - x_3) + 0.25 \alpha_3 u_1 (T_o - x_1) - \gamma_2 u_1 (0.25x_2 + 0.75x_2 - w_s) - \beta_2 u_2 \end{cases} \quad (3)$$

نقطه تعادل سیستم هواساز

از نظر دینامیکی، نقطه‌ای که در آن مجموع نیروها و گشتاورها برابر با صفر است، به عنوان نقطه تعادل شناخته می‌شود. از این‌رو، برای دستیابی به نقطه تعادل سیستم هواساز، لازم است معادلات مربوطه $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = 0$ حل شوند. نقطه تعادل سیستم به صورت $\bar{x} = [24 \quad 0/008126 \quad 14/5]^T$ و $\bar{u} = [2/5983 \quad 0/001362]^T$ با استفاده از الگوریتم FMINCON به دست می‌آید. با تغییر متغیر به صورت $\tilde{x} = x - \bar{x}$ و $\tilde{u} = u - \bar{u}$ به رابطه (۳) تبدیل می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \xi_1 - \alpha_1 \bar{u}_1 (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3) + \beta_1 \bar{u}_1 \tilde{x}_2 + (\beta_1 (\tilde{x}_2 + \bar{x}_2 - w_s) - \alpha_1 (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3 + \bar{x}_1 - \bar{x}_3)) \tilde{u}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \xi_2 - \alpha_1 \bar{u}_1 \tilde{x}_2 - \alpha_1 (\tilde{x}_2 + \bar{x}_2 - w_s) \tilde{u}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \xi_3 + \alpha_3 \bar{u}_1 (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3) - 0.25 \alpha_3 \bar{u}_1 \tilde{x}_1 - 0.75 \gamma_2 \bar{u}_1 \tilde{x}_2 - \beta_2 \tilde{u}_2 \\ \quad + \left(\alpha_3 (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3 + \bar{x}_1 - \bar{x}_3) + 0.25 \alpha_3 (T_o - \bar{x}_1) - 0.25 \tilde{x}_1 \right) \tilde{u}_1 \\ \quad + \left(-0.75 \gamma_2 \tilde{x}_2 - \gamma_2 (0.25 \bar{x}_2 + 0.75 \bar{x}_2 - w_s) \right) \tilde{u}_1 \end{cases}, \quad (4)$$

که در آن



$$\begin{cases} \xi_1 = \gamma_1 (\dot{Q}_o - h_{fg} \dot{M}_o) + \beta_1 \bar{u}_1 (\bar{x}_2 - w_s) - \alpha_1 \bar{u}_1 (\bar{x}_1 - \bar{x}_3) \\ \xi_2 = \alpha_2 \dot{M}_o - \alpha_1 \bar{u}_1 (\bar{x}_2 - w_s) \\ \xi_3 = (\alpha_3 (\bar{x}_1 - \bar{x}_3) + 0.25\alpha_3 (T_o - \bar{x}_1) - \gamma_2 (0.25w_o + 0.75\bar{x}_2 - w_s)) \bar{u}_1 - \beta_2 \bar{u}_2. \end{cases} \quad (5)$$

با جایگذاری پارامترها و نقطه تعادل به دست می‌آید $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = 0$. در نهایت فرم کلی فضای حالت جدید به صورت رابطه (۶) بازنویسی می‌گردد:

$$f = \begin{bmatrix} (\beta_1 \bar{x}_2 - \alpha_1 (\bar{x}_1 - \bar{x}_3) - \alpha_1 \bar{x}_2) \bar{u}_1 + \begin{pmatrix} \beta_1 (\bar{x}_2 + \bar{x}_2 - w_s) \\ -\alpha_1 (\bar{x}_1 - \bar{x}_3 + \bar{x}_1 - \bar{x}_3) \end{pmatrix} \tilde{u}_1 \\ -\alpha_1 \bar{x}_2 \bar{u}_1 - \alpha_1 (\bar{x}_2 + \bar{x}_2 - w_s) \tilde{u}_1 \\ (\alpha_3 (\bar{x}_1 - \bar{x}_3) - 0.25\alpha_3 \bar{x}_1 - 0.75\gamma_2 \bar{x}_2) \bar{u}_1 - \beta_2 \tilde{u}_2 \\ + \begin{pmatrix} \alpha_3 (\bar{x}_1 - \bar{x}_3 + \bar{x}_1 - \bar{x}_3) + 0.25\alpha_3 (T_o - \bar{x}_1) - 0.25\bar{x}_1 \\ -0.75\gamma_2 \bar{x}_2 - \gamma_2 (0.25w_o + 0.75\bar{x}_2 - w_s) \end{pmatrix} \tilde{u}_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

که در آن $\tilde{x} = [\tilde{x}_1 \quad \tilde{x}_2 \quad \tilde{x}_3]^T$ بردار متغیرهای حالت و $\tilde{u} = [\tilde{u}_1 \quad \tilde{u}_2]^T$ بردار ورودی می‌باشد.

معادله ریگاتی وابسته به حالت

طراحی کنترل کننده برای سیستم‌هایی با ذات غیرخطی بسیار دشوارتر از سیستم‌های خطی است. استفاده از روش‌های خطی سازی مانند روش ژاکوبین بخش‌های غیرخطی گری سیستم را از بین می‌برد. از این رو، ماتریس‌های وابسته به حالت و روش شبه خطی سازی جایگزین روش‌های خطی سازی می‌شود. همچنین، با توجه به کاربرد کنترل کننده‌های تنظیم کننده درجه دوم خطی، روش شبه خطی سازی و کنترل کننده بهینه وابسته به حالت اعمال می‌شود [۱۱]. از این روش برای طراحی انواع کنترل کننده و رویت گر استفاده می‌گردد [۱۲]. از روش شبه خطی سازی این معادله به صورت رابطه (۷) قابل بیان است:

$$\dot{\tilde{x}} = A(\tilde{x})\tilde{x} + B(\tilde{x})\tilde{u}, \quad (7)$$

که در آن $A(\tilde{x})$ ماتریس سیستم و $B(\tilde{x})$ ماتریس ورودی وابسته به حالت هستند. فرم شبه خطی به صورت رابطه (۸) معرفی می‌شود [۱۳]:

$$A(\tilde{x}) = \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial \tilde{x}} \Big|_{\tilde{x}=\lambda\tilde{x}} d\lambda. \quad (8)$$

فرم شبه خطی سازی رابطه (۸) بی نهایت فرم نمایش دارد و این زمانی حاصل می‌شود که بیش از یک متغیر حالت در سیستم وجود داشته باشد [۱۴]. برای سیستم هواساز نمایش شبه خطی (۹) پیشنهاد می‌گردد که کنترل پذیر می‌باشد:

$$A(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & \beta_1 & \alpha_1 \\ 0 & -\alpha_1 & 0 \\ 0.75\alpha_3 & -0.75\gamma_2 & -\alpha_3 \end{bmatrix} \bar{u}_1, \quad B(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} \beta_1 (\bar{x}_2 + \bar{x}_2 - w_s) - \alpha_1 (\bar{x}_1 - \bar{x}_3 + \bar{x}_1 - \bar{x}_3) & 0 \\ -\alpha_1 (\bar{x}_2 + \bar{x}_2 - w_s) & 0 \\ \alpha_3 (\bar{x}_1 - \bar{x}_3 + \bar{x}_1 - \bar{x}_3) + 0.25\alpha_3 (T_o - \bar{x}_1 - \bar{x}_1) & -\beta_2 \\ -\gamma_2 (0.75(\bar{x}_2 + \bar{x}_2) + 0.25w_o - w_s) & \end{bmatrix}. \quad (9)$$



با تغییر متغیر نقطه تعادل هواساز صفر شده است. سپس با این فرض تابع هزینه با افق زمانی نامحدود به صورت رابطه (۱۰) پیشنهاد می‌گردد:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \{x^T Q(x)x + u^T R(x)u\} dt, \quad (10)$$

که در آن $R(x)$ ماتریس مثبت معین جهت وزن دهی سیگنال ورودی و $Q(x)$ ماتریس مثبت نیمه معین جهت وزن دهی متغیرهای حالت است. ورودی کنترل بهینه با نوشتن معادلات تابع همیلتونین و شروط لازم به دست می‌آید. در رابطه (۱۱) $P(x)$ حل معادله ریکاتی وابسته به حالت می‌باشد.

$$u = -R^{-1}(x)B^T(x)P(x)x \quad (11)$$

$$A^T(x)P(x) + P(x)A(x) - P(x)B(x)R^{-1}(x)B^T(x)P(x) + Q(x) = 0. \quad (12)$$

با در نظر گرفتن ورودی مقید و با توجه به رابطه (۱۱) خواهد شد:

$$u_1 = -\frac{1}{r_1(x)} B^T(x)P(x)x, \quad u_2 = -\frac{1}{r_2(x)} B^T(x)P(x)x, \quad (13)$$

که در آن

$$u_{1\min} \leq u_1 \leq u_{1\max} \rightarrow u_{1\min} \leq -\frac{1}{r_1(x)} B^T(x)P(x)x \leq u_{1\max}, \quad (14)$$

$$u_{2\min} \leq u_2 \leq u_{2\max} \rightarrow u_{2\min} \leq -\frac{1}{r_2(x)} B^T(x)P(x)x \leq u_{2\max},$$

بنابراین:

$$u = -R^{-1}(x)B^T(x)P(x)x + R^{-1}B^T(x) \left(-(A(x) - B(x)K(x))^T (C^T Qr(t)) \right), \quad (15)$$

که در آن ورودی‌های u_1 و u_2 به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$u_1 = -\frac{1}{r_1(x)} B^T(x)P(x)x + \frac{1}{r_1(x)} B^T(x) \left(-(A(x) - B(x)K(x))^T Q_1(x)r_1(t) \right), \quad (16)$$

$$u_2 = -\frac{1}{r_2(x)} B^T(x)P(x)x + \frac{1}{r_2(x)} B^T(x) \left(-(A(x) - B(x)K(x))^T Q_2(x)r_2(t) \right),$$

در نتیجه ورودی‌های مقید u_1 و u_2 به صورت رابطه (۱۷) به دست می‌آیند:

$$u_{1\min} \leq -\frac{1}{r_1(x)} B^T(x)P(x)x + \frac{1}{r_1(x)} B^T(x) \left(-(A(x) - B(x)K(x))^T Q_1(x)r_1(t) \right) \leq u_{1\max}, \quad (17)$$

$$u_{2\min} \leq -\frac{1}{r_2(x)} B^T(x)P(x)x + \frac{1}{r_2(x)} B^T(x) \left(-(A(x) - B(x)K(x))^T Q_2(x)r_2(t) \right) \leq u_{2\max}.$$

نتایج شبیه‌سازی

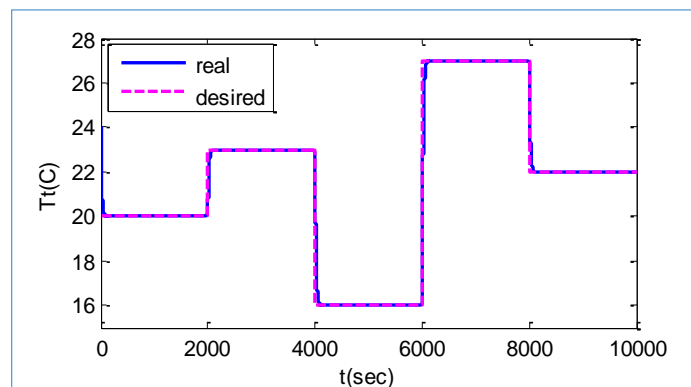
پارامترهای طراحی کنترل کننده مبتنی بر معادله ریکاتی وابسته به حالت به صورت $Q = \text{diag}(1, 10^4 + 10^3 x_2^2)$ و $R = \text{diag}(10^3, 10^3)$ در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (۱) و (۲) دما و رطوبت ناحیه داخل اتاق با کنترل کننده روش



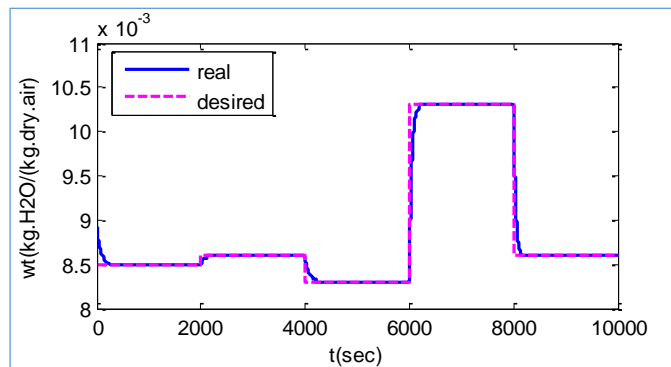
معادله ریکاتی وابسته به حالت نشان داده شده است. بدیهی است که حتی با وجود تغییرات، سیگنال‌های مرجع دما و رطوبت با سرعت و دقت مناسب توسط کنترل کننده روش معادله ریکاتی وابسته به حالت ردیابی می‌شوند. خطای ردیابی دما و رطوبت به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) به تصویر کشیده شده است. ورودی کنترلی اکچویاتور دمپر موتوری در شکل (۵) رسم گردیده است. بدیهی است که سیگنال‌های کنترلی با اعمال ورودی مقید قابل تولید توسط اکچویاتورها می‌باشد و در محدوده مجاز خود قرار دارند. پارامترها و مقادیر در جدول (۱) تعریف شده است.

جدول ۱: پارامترهای ترمودینامیکی واحد هواساز در سیستم تهویه مطبوع [۱۵]

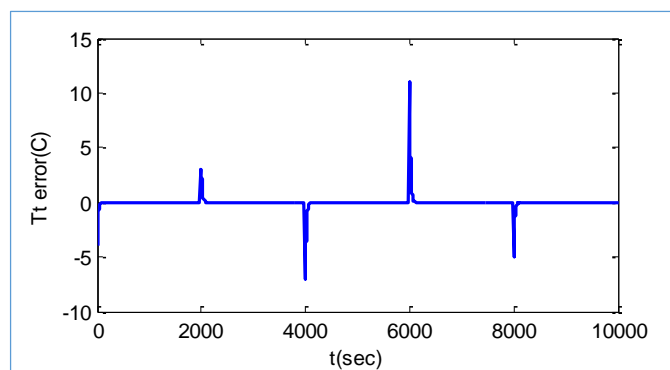
نام پارامتر	توضیحات	مقدار	واحد
W_o	نسبت رطوبت محیط	۰/۰۰۸۲	$kg H_2O / kg dry air$
W_s	نسبت رطوبت هوای رفت	۰/۰۰۸۰	$kg H_2O / kg dry air$
W_t	نسبت رطوبت فضای داخل (ناحیه)	۰/۰۰۸۰۴	$kg H_2O / kg dry air$
T_o	دمای محیط	۳۲	$^{\circ}C$
T_s	دمای هوای رفت	۱۸	$^{\circ}C$
T_t	دمای فضای داخل (ناحیه)	۲۰	$^{\circ}C$
ΔT_c	تغییرات دما در واحد سرمایش	۶	$^{\circ}C$
\dot{M}_o	توان منبع رطوبت (بار رطوبتی)	۰/۰۰۰۱۲۲	kg / s
\dot{Q}_o	بار حرارتی	۲۱۵۰۰	KW
\dot{f}_a	آهنگ نرخ جریان هوا	۲/۶	m^3 / s
\dot{f}_w	آهنگ نرخ جریان آب سرد	۰/۹۲۰۳	lit / s
C_{pa}	گرمای ویژه هوا	۱۰۰۰	$J / kg ^{\circ}C$
C_{pw}	گرمای ویژه آب	۴۱۸۰	$J / kg ^{\circ}C$
h_w	آنتالپی اشباع آب	۸۰	kJ / kg
h_{fg}	آنتالپی تبخیر	۲۵۰۰	kJ / kg
ρ_a	چگالی جرمی هوا	۱/۱۸	kg / m^3



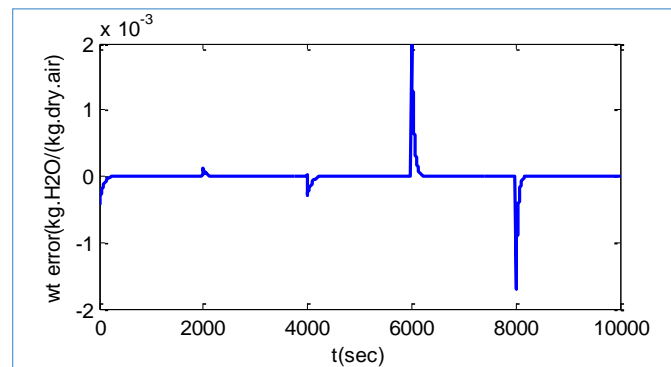
شکل ۱: دمای ناحیه داخل اتاق با کنترل کننده روش معادله ریکاتی وابسته به حالت



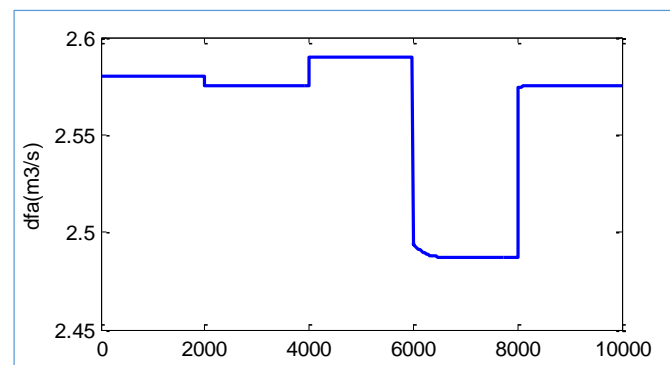
شکل ۲: رطوبت ناحیه داخل اتاق با کنترل کننده روش معادله ریگانی وابسته به حالت



شکل ۳: خطای ردیابی دما در ناحیه داخل اتاق با کنترل کننده روش معادله ریگانی وابسته به حالت



شکل ۴: خطای ردیابی رطوبت در ناحیه داخل اتاق با کنترل کننده روش معادله ریگانی وابسته به حالت



شکل ۵: ورودی اکچویاتور موتور دمبر با کنترل کننده روش معادله ریگانی وابسته به حالت



بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، کنترل کننده غیرخطی چند متغیره معادله ریکاتی وابسته به حالت برای یک هواساز جهت تنظیم دما و رطوبت طراحی شده که عملکرد مناسب کنترل کننده مبتنی بر معادله ریکاتی وابسته به حالت با ورودی مقید در نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد. بدیهی است که خروجی‌های سیستم هواساز در حول نقطه تعادل ردیابی مناسبی داشتند. علاوه بر وجود خطای حالت ماندگار در ردیابی سیگنال‌های مرجع، سرعت همگرایی مناسب کنترل کننده مبتنی بر معادله ریکاتی وابسته به حالت با وجود مقادیر $Q(x)$ و $R(x)$ را نشان می‌دهد. نتیجه می‌شود با توجه به اینکه سیستم هواساز ذات غیرخطی گری پیچیده دارد اما توسط کنترل کننده مبتنی بر معادله ریکاتی وابسته به حالت با اعمال ورودی مقید قابل کنترل می‌باشد. این خاصیت به دلیل ماتریس شبه خطی سازی است که در آن به ازای هر حالتی که در دسترس باشد معادله ریکاتی وابسته به حالت برای تمام نمونه‌ها مجدد حل می‌شود.

مراجع

- [1] Wang, S., Ma, Z., (2008). Supervisory and optimal control of building HVAC systems: A review. *Hvac&R Research*, 14(1), pp 3-32.
- [2] Yu, Y., Woradechjumroen, D., Yu, D., (2014). A review of fault detection and diagnosis methodologies on air-handling units. *Energy and Buildings*, 82, pp 550-562.
- [3] Moradi, H., Vossoughi, G., (2016). Multivariable control of the bifurcation and harmonic perturbations to improve the performance of air-handling units. *ISA transactions*, 60, pp 119-127.
- [4] Moradi, H., Saffar-Avval, M., Bakhtiari-Nejad, F., (2011). Nonlinear multivariable control and performance analysis of an air-handling unit. *Energy and Buildings*, 43(4), pp 805-813.
- [5] Liavoli, F. B., Fakharian, A., (2017). Nonlinear optimal control of air handling unit via state dependent riccati equation approach. 2017 5th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA),
- [6] Liavoli, F. B., Fakharian, A., (2019). Sub-optimal observer-based controller design using the state dependent riccati equation approach for air-handling unit. 2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE),
- [7] Liavoli, F. B., Shadi, R., Fakharian, A., (2021). Multivariable nonlinear model predictive controller design for air-handling unit with single zone in variable air volume. 2021 7th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA),
- [8] Liavoli, F. B., Shadi, R., Fakharian, A., (2022). Multivariable Nonlinear Control of Air-Handling Unit in HVAC System: Robust Sliding Mode Control. 2022 8th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA),
- [9] Moradi, H., Setayesh, H., Alasty, A., (2016). PID-Fuzzy control of air handling units in the presence of uncertainty. *International Journal of Thermal Sciences*, 109, pp 123-135.
- [10] Setayesh, H., Moradi, H., Alasty, A., (2015). A comparison between the minimum-order & full-order observers in robust control of the air handling units in the presence of uncertainty. *Energy and Buildings*, 91, pp 115-130.
- [11] Cloutier, J. R., (1997). State-dependent Riccati equation techniques: an overview. *Proceedings of the 1997 American control conference (Cat. No. 97CH36041)*,
- [12] Kalamian, N., Soltani, M., Bouzari Liavoli, F., Faraji Niri, M., (2024). Observer-Based Suboptimal Controller Design for Permanent Magnet Synchronous Motors: State-Dependent Riccati Equation Controller and Impulsive Observer Approaches. *Computers*, 13(6), 142.
- [13] Cimen, T., (2012). Survey of state-dependent Riccati equation in nonlinear optimal feedback control synthesis. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 35(4), pp 1025-1047.
- [14] Çimen, T., (2010). Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the state-dependent Riccati equation (SDRE) method. *Annual Reviews in control*, 34(1), pp 32-51.
- [15] Moradi, H., Saffar-Avval, M., Alasty, A., (2013). Nonlinear dynamics, bifurcation and performance analysis of an air-handling unit: Disturbance rejection via feedback linearization. *Energy and Buildings*, 56, pp 150-159.