

بکارگیری روش کنترل تنظیمی پیش‌بین مبتنی بر مدل غیرخطی بمنظور پایدارسازی و کاهش تقاضای توان حداکثر در سیستم گرمایشی

محمد میران بیگی^۱، علی اکبر جلالی^۲، علی میران بیگی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کنترل، دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران m.miranbeigi@gmail.com

^۲دانشیار و عضو هیئت علمی گروه کنترل دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران drjalali@gmail.com

^۳کارشناس مهندسی مکانیک، شرکت گاز استان تهران a.miranbeigi@gmail.com

چکیده

اصول روش ذخیره‌سازی انرژی در ساختمان بر پایه کم کردن دمای زمان-شب^۱ و افزایش یا دوباره گرم کردن آن در زمان صبح استوار است. یک مسئله مهم این روش، نگاه‌داشتن بیشینه^۲ تقاضای انرژی تحت توان حداکثر منبع انرژی مرکزی است. در این مقاله یک روش کنترل تنظیمی پیش‌بین مبتنی بر مدل غیرخطی بمنظور کاهش تقاضای توان حداکثر به صورت مدل مرجع، طراحی و اثرات کاهش تقاضای توان حداکثر با روش کنترل خطی مقایسه شده است و همچنین پایداری مجانبی حلقه بسته کنترل پیش‌بین بررسی خواهد شد.

کلمات کلیدی: ذخیره‌سازی انرژی، کنترل پیش‌بین، پایداری مجانبی

۱- مقدمه

مصرف انرژی برای گرمایش، یک بخش مهم از بودجه مصرف‌کنندگان را شامل می‌شود. کنترل مناسب مصرف انرژی و توزیع، در کنار روش‌هایی چون عایقکاری حرارتی ساختمان‌ها، یکی از ابزارهای مهم بهینه‌سازی مصرف انرژی است. به همین دلیل مسائل مربوط به نمایش جریان‌های انرژی گرمایشی، تحلیل پارامترهای جریان، ممیزی و کمینه‌کردن مصرف انرژی از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشند [۱ و ۲].

پژوهش‌های گذشته برای کنترل گرما روی کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالگیر (PI) متمرکز می‌باشند. اخیراً یک تعداد از روش‌های کنترلی HVAC پیشرفته نیز مطرح شده‌اند. به عنوان مثال از مدل‌های خطی در طراحی کنترل‌کننده‌ها به کمک نظریه بهینه و روش‌های تطبیقی، می‌توان بهره برد [۳]. در شبیه‌سازی‌ها عملکرد کنترل‌کننده‌ها در پاسخ به اغتشاشات، مزایای بکارگیری روش‌های کنترلی پیشرفته را تایید می‌کنند.

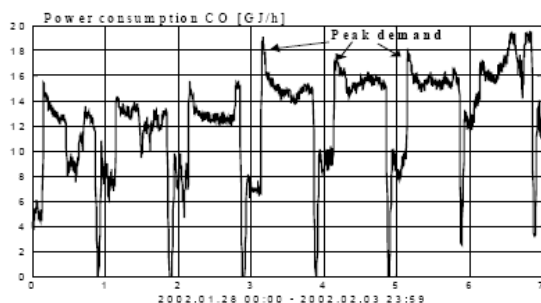
کنترل‌کننده‌های گوسی درجه دوم خطی^۳ و کنترل‌های بهینه دیگر، دمای گرمخانه و میزان رطوبت را هم در شبیه‌سازی‌ها و هم در آزمایش‌های تجربی به خوبی تنظیم می‌کنند. در طول سال‌های اخیر روش‌های کنترلی دیگری همچون روش‌های پیش‌بین خطی [۵ و ۶]

به کارگرفته شده‌اند. شبکه‌های عصبی و کنترل‌های فازی [۷] نیز به عنوان ابزار پیاده‌سازی کنترل‌های تطبیقی برای کنترل سیستم‌های گرمایشی در سال‌های اخیر بکارگرفته شده‌اند. به علت اینکه همه کنترل‌کننده‌ها در چارچوب یک حلقه کنترلی بیان می‌شوند، تضمین پایداری الزامی است. یک روش مبتنی بر تحلیل نظریه کنترل مقاوم بوسیله نویسندگان متعددی نیز ارائه شده‌است [۸]. همچنین یک روش کنترل پیش‌بین مد لغزشی برای یک سیستم از نوع خورشیدی توسط گارسیا گابین و همکارانش انجام شده است [۹].

در این مقاله سیستم موردنظر، یک شبکه توزیع گرماسی که یک تعداد از ساختمان‌های پردیس دانشگاه علم و صنعت AGH لهستان را، از طریق شعبه‌های گرمایش مرکزی سرویس می‌دهد. در طول دوران گرمایش، ساختمان‌ها تا 20 GJ/h انرژی مصرف می‌کنند. تقاضا، اولاً به دمای بیرونی و مدت روز (یا فصل) و همچنین به انباشتگی ظرفیت سیستم گرمایشی بستگی دارد. کنترل یک سیستم گرمایشی در جهت کمینه کردن اختلاف بین تقاضای جاری برای انرژی گرمایی و منبع می‌باشد.

اصل اساسی روش ذخیره‌سازی انرژی بر مبنای کاهش دمای زمان-شب و افزایش آن در صبح است. افزایش دما باعث از دست رفتن انرژی می‌شود، اما آسایش حرارتی در تاسیسات گرم شده، دوباره برقرار می‌شود [۱۰].

یک مسئله مهم این روش، نگاه‌داشتن تقاضای بیشینه مصرف انرژی تحت توان حداکثر منبع انرژی مرکزی در جهت دوری از تقاضاهای حداکثر بالاست که در شکل ۱ دیده می‌شوند.



شکل ۱: مصرف توان، همه ساختمان‌ها

این مهم می‌تواند با بکارگیری یک روش کنترل محلی مناسب و هماهنگی مناسبی میان عملگرهای کنترل محلی و نظارتی حاصل

^۱ Night - time

^۲ Peak

^۳ LQG

قسمت خطی مدل ساختمان بوسیله یک مدل گسسته ARMA استاندارد توصیف می‌شود:

$$T_{pco}(i) = \frac{B_1}{A} Z^{-K_1} F_{co}(i) + \frac{B_2}{A} Z^{-K_2} T_{zco}(i) + \frac{B_3}{A} Z^{-K_3} T_{pom}(i) \quad (1)$$

که در آن،

$$A = 1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_n Z^{-nA}$$

$$B_1 = b_0^1 + b_1^1 Z^{-1} + \dots + b_{nB_1}^1 Z^{-nB_1}$$

$$B_2 = b_0^2 + b_1^2 Z^{-1} + \dots + b_{nB_2}^2 Z^{-nB_2}$$

$$B_3 = b_0^3 + b_1^3 Z^{-1} + \dots + b_{nB_3}^3 Z^{-nB_3}$$

و ساختار مدل فرض شده برای این سیستم:

$$nA = nB_i \quad |i=1,2,3 = -2,$$

$$K_1 = 2, K_2 = 1, K_3 = 6,$$

$$T_s = 10 \text{ min},$$

می‌باشد که برای بدست آوردن آن‌ها پارامترهای چندجمله‌ای بوسیله روش خطای پیش‌بین توصیف شده در [۱۱] تخمین زده شده‌اند و به شرح زیر می‌باشند:

$$A = 1 - 1.731Z^{-1} + 0.753Z^{-2}$$

$$B_1 = 0.2111 - 0.3024Z^{-1} + 0.1Z^{-2}$$

$$B_2 = 0.1171 - 0.1265Z^{-1} + 0.0217Z^{-2}$$

$$B_3 = 0.0564 - 0.0880Z^{-1} + 0.0392Z^{-2}$$

این چندجمله‌ای‌ها به صورت مجانبی پایدار هستند، یعنی ریشه‌هایشان داخل دایره واحد می‌باشد. مشخصه غیرخطی شیر بوسیله تابع زیر مدل می‌شود:

$$F_{co}(u) = \frac{A_1 - A_2}{1 + (u/u_0)^p} + A_2 \quad (2)$$

که u ، درصد جریان بیشینه شیر ورودی اصلی و $A_2 = 10.22443$ و $u_0 = 74.0276$ و $p = 92.594$ هستند. بنابراین مصرف توان ساختمان در طول مرحله آم بوسیله (۳) مدل می‌شود.

$$P(i) = F_{co}(i) \cdot C_w (T_{zco}(i) - T_{pco}(i)). \quad (3)$$

نتایج وارسی مدل با استفاده از پیش‌بینی تک مرحله‌ای مصرف انرژی، عملکرد خوب مدل را نشان می‌دهد.

۲-۱- مشخصه حالت ماندگار ساختمان

مطابق جدول ۱، تحلیل داده‌های فرآیند حالت ماندگار، اطلاعاتی در مورد مصرف انرژی ساختمان بصورت تابعی از دمای بیرونی می‌دهد.

داده‌های جدول ۱، به عنوان نقطه تنظیم برای عمل کنترل‌کننده استفاده خواهند شد.

شود. ما در این پژوهش به دنبال بسط روش پیش‌بین مبتنی بر مدل پایدار که مصرف توان را برای ساختمان‌های مجزا در طول دوره گرمایش دوباره در زمان صبح، کنترل می‌کند، هستیم.

در ادامه، مدل ساده‌شده‌ای از ساختمان در بخش ۲ توصیف می‌شود. بخش ۳ نتایج کنترل ساختمان با کنترل‌کننده خطی را ارائه می‌دهد. در بخش ۴، توسعه‌ای از کنترل‌کننده پیش‌بین و در بخش ۵ تحلیل پایداری مطرح می‌شود. در نهایت شبیه‌سازی‌های مربوطه نیز در بخش ۶ نشان داده می‌شوند.

۲- مدل ساختمان

ساختمان مورد نظر شامل ۱۸۰ اتاق اداری و ۵ آزمایشگاه بزرگ و اتاق کنفرانس است. ورودی آبگرم بوسیله شیر ورودی u_{zco} کنترل می‌شود. دماهای آب ورودی و خروجی نیز به خوبی جریان آب، اندازه‌گیری و به کنترل‌کننده منتقل می‌شوند. مدل ساختمان شامل تجهیزات خطی و غیرخطی (شکل ۲) است. نکات زیر در شکل ۲ و روابط ریاضی بعدی، مورد استفاده هستند:

T_{zco} [°C] دمای آب منبع -

T_{pco} [°C] دمای آب منبع -

T_{pom} [°C] میانگین دمای اتاق -

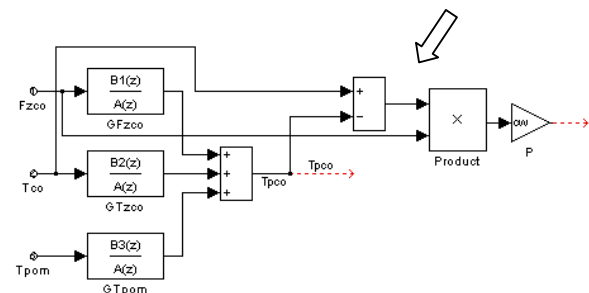
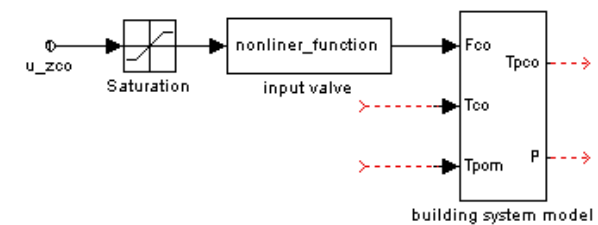
F_{co} [t/h] جریان آبگرم -

u_{zco} [0-100] وضعیت وابسته شیر ورودی اصلی -

C_w [°C] گرمای ویژه آب = 0.00418

P [GJ/h] توان موقتی مصرف شده بوسیله سیستم ساختمان -

T_s [min] زمان نمونه‌برداری -

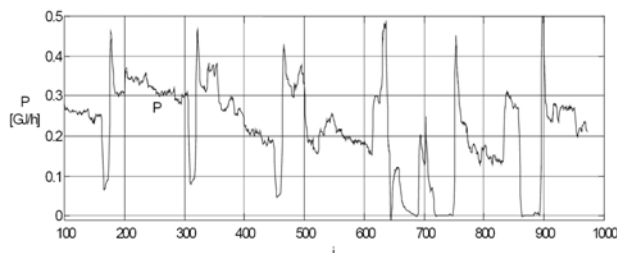


شکل ۲: مدل‌های سیستم گرمایشی ساختمان

جدول ۱: توان مصرفی حالت ماندگار ساختمان B_1

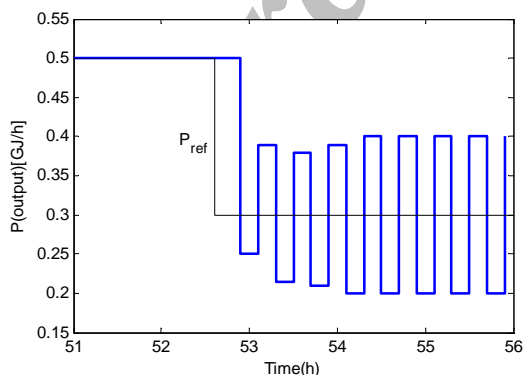
توان مصرفی حالت ماندگار برای دمای داخلی ۱۹ درجه سانتیگراد بر حسب گیکازول در ساعت	میانگین دمای بیرونی بر حسب درجه سانتیگراد
۰.۲	۵ الی ۱۰
۰.۵	۵
۰.۷	(-۵) الی ۰
توان حداکثر	کوچکتر از ۵-

شکل ۳، نمونه‌ای از نتایج پیاده‌سازی کنترل کننده خطی مشابهی را روی این سیستم نشان می‌دهد [۱۰]. دنبال کردن مسیر مرجع حلقه کنترلی برآورده می‌شود. هرچند که تقاضاهای حداکثر در طول دوباره گرم کردن صبحگاهی خیلی بالاست، وقتی که یک تغییر در ورودی بوجود می‌آید، متغیر خروجی کنترل شده P به نقطه تنظیم می‌رسد. کاهش دادن تقاضاهای حداکثر بوسیله تنظیم پارامترهای کنترل کننده امکان‌پذیر نیست. تقاضای حداکثر کلی ساختمان‌ها، نتایجی را به دست می‌دهند که در شکل ۲ آمده است.



شکل ۳: مصرف توان یک ساختمان، پس از پیاده‌سازی همراه با یک کنترل کننده خطی

بنابراین یک راه کاهش منبع انرژی مرکزی تقاضای حداکثر صبح، یک کاهش در تقاضای حداکثر ساختمان‌های مجزا با استفاده از روش کنترل محلی بسیار پیچیده است. در طول پیاده‌سازی مشاهده می‌شود که کنترل کننده خطی در تغییر دادن دمای آب منبع، اشباع سیگنال کنترلی و تغییرات سیگنال مرجع ناتوان است [۱۰]. اما از شبیه‌سازی ایده‌آل این سیستم کنترلی، شکل ۴ به دست می‌آید که دیده می‌شود یک نوسان دائمی در سیگنال تنظیم شده خروجی بوجود می‌آید. در نتیجه پایداری سیستم حلقه بسته ممکن است از دست برود.



شکل ۴: نوسان مشاهده پس از تغییر در سیگنال مرجع

انتظار می‌رود نتایج پیاده‌سازی عملی این روش نیز نتیجه‌ای مشابه با شکل ۳ بدهد.

۳- کنترل کننده دیجیتال تعمیم‌یافته برای مدل خطی سازی شده

نوع ساده شده و خطی‌سازی شده مدل (۱) و (۲) بصورت مدل زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۲]:

$$P(i) = \frac{B^+}{A} u(i) + \frac{d}{A_g} \delta(i),$$

$$A = 1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2},$$

$$B^+ = b_0 + b_1 Z^{-1},$$

$$A_g = 1 - Z^{-1},$$

$$\delta(i) = \begin{cases} 1 & i = 1 \\ 0 & i > 1 \end{cases}$$

که بخش $\frac{d}{A_g} \delta(i)$ برای مدل کردن اغتشاشات تصادفی با

چند جمله‌ای تولید A_g استفاده می‌شود و u ، درصد بیشینه شیر ورودی اصلی می‌باشد. در اینجا روش شناسایی، $A = [1.00, -0.86]$ و $B_1^+ = 10^{-4} [0.4981, 0.4463]$ را می‌دهد در این قسمت روش کنترل دیجیتال تعمیم یافته زیر بکار گرفته شده است [۱۳]:

$$u(i) = -\frac{S}{R} P(i) + \frac{T}{R} P_{ref}(i), \quad (4)$$

$$R = A_g B_1^+, S = A_0 A_m - A A_g, T = A_0 B_m.$$

یک توان مرجع محاسبه شده از جدول ۱ است. اگر پارامترهای طراحی سیستم حلقه بسته را به صورت $A_0 = 1 - \alpha Z^{-1}, \alpha = 0.1$ و $A_m = 1 - q Z^{-1}, q = 0.5$ و $B_m = 1 - q$ در نظر بگیریم، پارامترهای محاسبه شده کنترل کننده

$$R = 1.0000 - 1.8960 Z^{-1} + 0.0896 Z^{-2},$$

$$S = 25297.78 Z^{-1} - 16264.18 Z^{-2},$$

$$T = 10037.34 - 1003.73 Z^{-1}$$

خواهند شد.

۴- کنترل کننده پیش‌بین

فرض می‌شود که مصرف توان نقطه تنظیم در حالت ماندگار در این کاربرد، شناخته شده‌است. بنابراین به نظر می‌رسد، کنترل پیش‌بین غیرخطی یک روش بسیار عالی و کارآمد در این مورد باشد. مرحله اول برای تشکیل مدل‌هایی برای اغتشاشات است، که یک ساختار مناسب و حل کارآمد از مسئله کنترل پیش‌بین را برقرار می‌کند. اغتشاشات موردنظر: دمای اتاق و دمای آب منبع هستند. فرض می‌شود که برای مدل گسسته (۱)، میانگین دمای اتاق دارای تغییرات کند است.

پایه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که تغییر 20 ± 3 درجه سانتیگراد در اتاق‌ها به عنوان یک نتیجه عمل کنترل توان، می‌تواند در زمانی بالغ بر چندین ساعت مشاهده شود. در نتیجه، این دینامیک‌ها می‌توانند در نظر گرفته نشده و بجای بخش $\frac{B_3(z)}{A(z)} Z^{-K_3} T_{pom}(i)$ رابطه ساده شده‌ی

$$\frac{B_3(1)}{A(1)} Z^{-K_3} T_{pom}(i) \approx K_p T_{pom}(i)$$

استفاده شود.

در ادامه

$$T_b(i) = [T_{zco}(i - N_b), T_{zco}(i - N_b + 1), \dots, T_{zco}(i)]$$

را به عنوان یک بردار از مقادیر اندازه‌گیری شده دمای آب منبع در نظر می‌گیریم. بر مبنای اطلاعات موجود در زمان i ، پیش‌بینی چندجمله‌ای $W_b(k)$ از دمای آب منبع برای $k = i - N_b, i - N_b + 1, \dots, i$ بدین شکل ساخته می‌شود:

$$\hat{T}_{zco}(i+1) = W_b(i+1), \dots, \hat{T}_{zco}(i+N_w) = W_b(i+N_w)$$

برای افق زمانی N_w چندجمله‌ای $W_b(k)$ دارای مرتبه سه و بوسیله روش تقریب حداقل مربعات^۴ محاسبه می‌شود. همین رویه برای تقریب چندجمله‌ای برای توان مرجع $P_{ref}(i)$ بکار گرفته می‌شود. نقاط تنظیم تعریف شده جدول ۱ در نظر گرفته می‌شوند. برای حل مسئله کنترل پیش‌بین افق‌های زمانی زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$N_b = 30, N_w = 4,$$

$$\text{for } k > i + N_w : \hat{T}_{zco}(i+k) = \hat{T}_{zco}(i+N_w).$$

بردار خروجی و حالت زیر برای سیستم (۱) و (۲) و (۳) بصورت

زیر تعریف می‌شوند:

$$x_1(i) = T_{pco}(i), x_2(i) = T_{pco}(i-1),$$

$$x_3(i) = F_{co}(i-1), x_4(i) = F_{co}(i-2), x_5(i) = F_{co}(i-3),$$

$$x_6(i) = T_{zco}(i-1), x_7(i) = T_{zco}(i-2),$$

$$x_8(i) = u(i-1), y(i) = P(i),$$

$$w(i) = [T_{zco}(i), T_{pom}(i), P_{ref}(i)]^T,$$

$$F_{co} = \varphi(u(i-1)),$$

که $\varphi(u)$ مدل غیرخطی شیر (۲) می‌باشد. فرآیند تحت کنترل (۱)

و (۲) و (۳) می‌تواند بوسیله مدل غیرخطی زمان گسسته با توجه به محدودیت‌های ورودی $u(i) \in [0, 100]$ توصیف شود:

$$x_1(i+1) = [-a_1, -a_2, b_0^1, b_1^1, b_2^1, b_1^2, b_2^2, 0]x(i)$$

$$+ b_0^2 w_1(i) + k_p w_2(i),$$

$$x_2(i+1) = x_1(i),$$

$$x_3(i+1) = \varphi(x_8(i)),$$

$$x_4(i+1) = x_3(i), \quad (5)$$

$$x_5(i+1) = x_4(i),$$

$$x_6(i+1) = w_1(i),$$

$$x_7(i+1) = x_6(i),$$

$$x_8(i+1) = \varphi(x_8(i)) \cdot c_w (w_1(i) - x_1(i)).$$

تاخیر تک مرحله‌ای مدل‌های معادله حالت اخیر برای ریاضیات کنترل پیش‌بین الزامی است. مدل (۵) در یک شکل فشرده بار دیگر نوشته می‌شود:

$$x(i+1) = f(x(i), u(i), w(i)),$$

$$y(i) = g(x(i), u(i), w(i)),$$

که $f(x(i), u(i), w(i))$ و $g(x(i), u(i), w(i))$ توابع مقتضی

تعریف شده بوسیله معادلات (۵) هستند. خطای کنترلی بصورت

$$e(i) = h(x(i), u(i), w(i)) = w_3(i) - y(i)$$

تعریف می‌شود، تا در انتها ساختار کنترلی تنظیم خطای صفر را به صورت مجانبی تضمین کند. انتگرالگیر بصورت زیر داخل مدل وارد می‌شود:

$$z(i+1) = z(i) + \delta u(i),$$

که $\delta u(i)$ نمو کنترلی است. اکنون کنترلی، $u(i) = z(i)$ است و مدل (۵) از نو بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$x^1(i+1) = f^1(x^1(i), \delta u(i), w(i)), \quad (6)$$

$$y(i) = g^1(x^1(i), u(i), w(i)), \quad (7)$$

$$e(i) = h^1(x^1(i), u(i), w(i)) = w_3(i) - y(i) \quad (8)$$

که $x^1(i)^T$ بردار حالت توسعه یافته بصورت $x^1(i)^T = [x(i)^T, z(i)^T]^T$ و f^1 و g^1 و h^1 ، توابع مقتضی

دوباره تعریف شده برای بردار حالت توسعه یافته هستند.

بردار $\hat{w}(i) = [w(i), \hat{w}(i+1), \hat{w}(i+2), \dots, \hat{w}(i+N_p)]$ ، اشاره

به پیش‌بینی اغتشاش بدست آمده بوسیله روش توصیف شده در

ابتدای این بخش دارد. محدودیت‌های ورودی مفروض،

همچون $0 \leq z(i+1) \leq 100$ برای $k = 1, 2, \dots, N_c$ ، می‌تواند برای

نوع افزایشی دوباره بازنویسی شده و بصورت

$$\begin{bmatrix} +J \\ -J \end{bmatrix} \delta u_{i, N_c-1} \leq \begin{bmatrix} (100 - z(i)) I_{N_c} \\ z(i) I_{N_c} \end{bmatrix} \quad (9)$$

که

فرضیه ۳:

سیستم (۶) و (۷) و (۸) را با $\delta u(k) = 0$ به ازای هر $k \geq i$ در نظر می‌گیریم. اگر $y(k) = \bar{w}_3$ به ازای $k \geq i$ ، آنگاه $x^1(i) = x^1(\bar{w})$ می‌باشد.

قضیه ۱:

تحت فرضیات ۱ و ۲ و ۳، $x^1(\bar{w})$ یک نقطه تعادل به صورت نمایی پایدار برای سیستم (۶) و (۷) و (۸) می‌باشد.

اثبات:

خطی سازی مدل‌های (۶) و (۸) به شکل زیر در می‌آید:

$$A = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & b_0^1 & b_1^1 & b_2^1 & b_1^2 & b_2^2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi'(\bar{u}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T,$$

$$C = c_w [\varphi(\bar{u}) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \varphi'(\bar{u})(\bar{x}_1^1 - \bar{w}_1)]$$

تحلیل ماتریس مدل نشان می‌دهد که جفت (A, B) پایدارپذیر بوده، اما کنترل‌پذیر نیست. جفت (A, C) آشکارپذیر بوده، اما رویت‌پذیر نیست و فرضیه ۲ برای سیستم‌های (۶) و (۸) برآورده می‌شود.

از معادلات (۵)، برای $y(k) = \bar{w}_3$ داریم:

$$\varphi(\bar{x}_8).c_w(\bar{w}_1 - \bar{x}_1) = \bar{w}_3,$$

$$\bar{x}_1 = k_1\varphi(\bar{u}) + k_2\bar{w}_1 + k_3\bar{w}_2, \bar{x}_2 = \bar{x}_1,$$

$$\bar{x}_3 = \varphi(\bar{u}), \bar{x}_4 = \varphi(\bar{u}), \bar{x}_5 = \varphi(\bar{u}),$$

$$\bar{x}_6 = \bar{w}_1, \bar{x}_7 = \bar{w}_1, \bar{x}_8 = \bar{u},$$

$$\varphi(\bar{u})c_w((1-k_2)\bar{w}_1 - k_3\bar{w}_2 - k_1\varphi(\bar{u})) = \bar{w}_3.$$

از این معادلات می‌توان \bar{u} منحصر بفرد \bar{x} را محاسبه کرد. از اینرو فرضیه ۳ نیز برآورده می‌شود و پایداری حلقه بسته هم با توجه به قضیه ۱ اثبات می‌شود.

۶- نتایج شبیه‌سازی

عملکرد کنترل‌کننده پیش‌بین در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌است. با مقایسه مرجع و پاسخ واقعی، دیده می‌شود که عملکرد مسیریابی خیلی خوب بوده و خطای حالت ماندگار به صفر کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۵، در زمان ۶ ساعت و ۴۰ دقیقه، ضریب a_2 مدل شیر مختل می‌شود (۱۰ درصد افزایش می‌یابد)، تا عمل انتگرالگیری کنترل‌کننده به خوبی نشان داده شود.

شکل ۵ و ۶ نشان می‌دهند که چگونه تقاضاهای حداکثر کاهش پیدا می‌کنند. به هر حال سیستم برعکس رفتار کنترل خطی پایدار

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{(N_c, N_c)}, I_{N_c} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\delta u_{i, N_c-1} = [\delta u(i), \delta u(i+1), \delta u(i+2), \dots, \delta u(i+N_c-1)]^T.$$

برای سیستم (۶) - (۸)، مسئله کنترل پیش‌بین به عنوان مسئله کمینه‌سازی

$$Q(\delta u_{i, N_c-1}, x^1(i), \hat{w}(i)) = \sum_{k=1}^{N_p} (e(i+k) + d(i))_2$$

$$+ \sum_{k=0}^{N_c-1} \rho(k) \delta u^2(i+k) + V(x^1(i+N_p)),$$

$$V(x^1(i+N_p)) = \|x^1(i+N_p) - \bar{x}^1(\bar{w})\|_p^2,$$

$$x^1(i+N_p) \in \Omega,$$

تحت محدودیت (۹)، با کنترل محاسبه شده به صورت

$$u(i) = u(i-1) + \delta u(i),$$

که $N_p = 6$ و $N_c = 4$ و $\rho(k) = 0.001$ نیز می‌باشند. در اینجا از روش هزینه نهایی و محدوده نهایی برای پایداری سیستم حلقه بسته استفاده می‌کنیم.

۵- تحلیل پایداری سیستم حلقه بسته

پایداری سیستم حلقه بسته بعد از اضافه کردن بخش هزینه نهایی به تابعی معیار و یا بر مبنای محدودیت‌های نهایی اثبات می‌شود [۱۴ و ۱۵ و ۱۶].

فرضیه ۱:

برای $k \geq i + N_p$ سیگنال $w(i+k)$ شناخته شده و معین $w(i+k) = \bar{w}$ است.

فرضیه ۲:

مقادیر $\bar{u}(\bar{w})$ و $\bar{x}^1(\bar{w})$ به برقراری یک تعادل از (۶) و (۷) و (۸)، اشاره دارند و

$$A = \frac{\partial f^1}{\partial x^1}_{\bar{x}^1(\bar{w}), \bar{u}(\bar{w})},$$

$$B = \frac{\partial f^1}{\partial u^1}_{\bar{x}^1(\bar{w}), \bar{u}(\bar{w})},$$

$$C = \frac{\partial h^1}{\partial x^1}_{\bar{x}^1(\bar{w}), \bar{u}(\bar{w})}.$$

سیستم خطی (A, B, C) ، پایدارپذیر و آشکارپذیر بوده و صف‌های انتقال فرآیند برابر با یک نیست.

System for Optimizing the Energy Consumption and User Comfort in Buildings”, in *Proc. of IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*, Glasgow 2007, pp. 127-132.

[3] Zaheer-Uddin M., “Optimal, Sub-optimal and Adaptive Control Methods for the Design of Temperature Controllers for intelligent Buildings”, *Building and Environment*, 28(3), July 2003, pp. 311-322.

[4] Tap F., Willigenburg L.G., Straten G., “Receding Horizon Optimal Control of Greenhouse Climate Based on the Lazy Man Weather prediction”, *13th IFAC World Congress, San Francisco*, 1996, pp. 387 – 392.

[5] Lute P., van Paassen D., “Optimal Indoor Temperature Control Using a Predictor”, *IEEE Control Systems*, 12, 1995, pp. 4-9.

[6] Riadi, R., Tawegoum, R., Rachid, A., Chassériaux, G., “Centralized & Decentralized Temperature Generalized Predictive Control of a Passive-HVAC Process”, *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.

[7] Morel N. A., Bauer M. B., El-Khoury M., Krauss J., “Neurobat, A Predictive And Adaptive Heating Control System Using Artificial Neural Networks”, *International Journal of Solar Energy*, 21, April 2001, pp. 161-201.

[8] Kasahara M., Matsuba T., Kuzuu Y., Yamazaki T., Hashimoto Y., Kamimura K., Kurosu S., “Design and Tuning of Robust PID Controller for HVAC Systems”, *ASHRAE Transactions*, 105(2): 1999, pp.154-166.

[9] Freire, R. Z., “Energy Savings Using Predictive Controller Applied to HVAC Systems”, *Annex 41 Working Meeting Florianópolis*, April 15-18 Florianópolis, SC, , 2007.

[10] Bania, p., “NMPC For Heating System”, *Department of Automatics, AGH University of Science and Technology*, 2005.

[11] www.mathworks.com, Identification Toolbox.

[12] Goodwin G.C., Sin K.S., *Adaptive Filtering, Prediction and Control*, Prentice-Hall, New York, 1984.

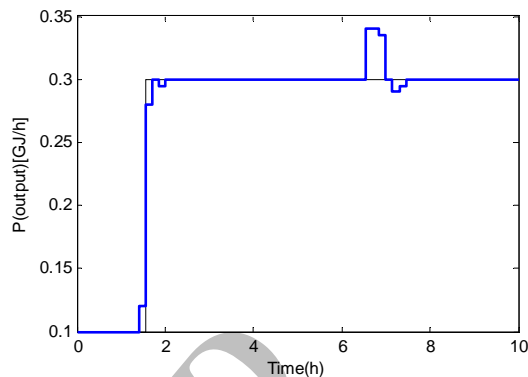
[13] Åström K.J., Wittenmark B., *Computer Controlled Systems*, Prentice Hall, London 1997.

[14] Scattolini R., Magni L., De Nicolao G., “Output Feedback and Tracking in Nonlinear Model Predictive Control”, *Proc. of Sixth International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, pp.1601-1607, 2001.

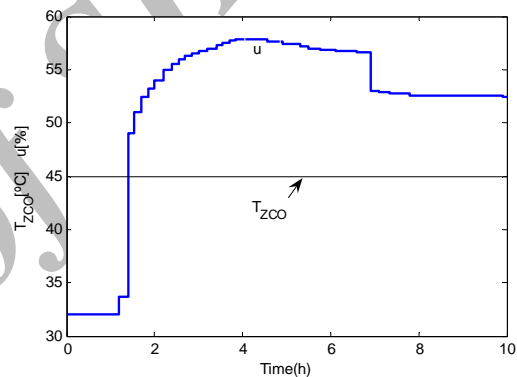
[15] Maciejowski J. M., *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall, 2002.

[16] Chen H., Algöwer F., “A Quasi-infinite Horizon Nonlinear Model Predictive Control Scheme With Guaranteed Stability”, *Automatica*, 34, 1998, pp. 1205-1217.

است، هرچند ممکن است در پیاده‌سازی عملی، دچار خطای مسیریابی شویم.



شکل ۵: مسیریابی توان ثابت مطلوب P_{ref}



شکل ۶: سیگنال ورودی

نتیجه گیری

مسئله مهم در سیستم‌های گرمایشی، نگاه‌داشتن بیشینه تقاضای انرژی تحت توان حداکثر منبع انرژی مرکزی است. در این پژوهش یک کنترل کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل غیرخطی برای سیستم‌های گرمایشی ساختمان‌های تجاری، امتحان شد. مدل غیرخطی فرآیند از مدل حالت ماندگار غیرخطی و مدل دینامیکی خطی تشکیل شده‌است.

نشان داده می‌شود که کنترل کننده پیشنهاد شده تحت فرضیات داده شده در بخش ۵، پایدار است. بر خلاف کنترل‌های خطی، روش پیشنهاد شده، تقاضای توان حداکثر ساختمان‌ها را کاهش می‌دهد. این نتیجه، بکارگیری یک روش کنترل تنظیمی را تحت محدودیت‌های تحمیل شده روی منبع انرژی مرکزی، ممکن می‌سازد.

مراجع

- [1] Grega W., Kołek K., “Monitoring and Control of Heat Distribution”, in *Proc. of International Carpathian Control Conference ICC'2008*, Malenovice, Czech Republic, May 27-30 2008, pp. 439-444.
- [2] Pargfrieder J., Jorgl H.P., “An Integrated Control