مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
مقاله پژوهشی
جلد۱۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، صفحه ۱۱-۱

طراحی یک ساختار جدید در کنترل‌کننده مدل پیش‌بین صریح با کاربرد در سیستم مبدل باک

محمدرضا زمانی بهبهانی[۱]، زهرا رحمانی[۲]، بهروز رضایی[۳]

[۱] فارغ‌التحصیل دکتری مهندسی برق و کامپیوتر، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی توشیروانی بابل،ایران، zamanib.mohammadreza@gmail.com
[۲]دانشیار،گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی توشیروانی بابل، ایران zrahmani@nit.ac.ir
[۳]دانشیار، گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی توشیروانی بابل، ایران brezaie@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۰ ویرایش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۳۰

چکیده: در این مقاله، ساختار جدیدی از کنترل پیش‌بین برای سیستم‌های تکه‌ای افاین به عنوان کلاس خاصی از سیستم‌های هیبریدی مطرح شده است. به دلیل زمانبر بودن محاسبات آنلاین در مسأله بهینه‌سازی پیش‌بین و پیچیدگی محاسبات آن، ساختار صریح الگوریتم پیش‌بین به منظور کنترل مبدل باک در این مقاله استفاده شده است. چون کنترل پیش‌بین صریح به جای حل مکرر آنلاین مسأله بهینه‌سازی، فقط یکبار و بصورت آفلاین محاسبات بهینه‌سازی را انجام می‌دهد، برای سیستم‌های هیبریدی با دینامیک‌های سریع مناسب است. در واقع در این الگوریتم به جای استفاده از درایه اول بردار ورودی کنترلی ، از تمامی درایه‌های آن به صورت وزندار برای به روزرسانی قانون کنترل استفاده می‌شود. برخلاف الگوریتم پیش‌بین صریح متداول که فقط از یک درایه از بردار ورودی کنترلی بهینه استفاده می‌کند، کنترل پیش‌بین صریح پیشنهادی از تمام درایه‌های بردار ورودی کنترلی بهینه به همراه ضرایب وزنی بهینه استفاده می‌کند. الگوریتم پیش‌بین صریح پیشنهادی در هر مرحله، دو مسأله بهینه‌سازی به صورت مجزا حل می‌کند. مسأله اول، مربوط به حل مسأله بهینه‌سازی پیش‌بین صریح است و مسأله بهینه‌سازی دوم مربوط به یافتن ضرایب وزنی بهینه در جهت کاهش مقدار سیگنال خطا در هر مرحله از الگوریتم می‌باشد. همگرایی روش پیش‌بین صریح پیشنهادی به سمت مقادیر موردنظر در این مقاله اثبات شده و نتایج شبیه‌سازی، برتری روش پیش‌بین صریح پیشنهادی را نسبت به پیش‌بین صریح متداول به شرط تنظیم مناسب ضرایب وزنی الگوریتم و انتخاب مناسب افق‌های کنترلی را نشان داده است.

کلمات کلیدی: الگوریتم پیش‌بین، بهینه‌سازی آفلاین، مبدل باک، همگرایی

Designing a novel structure of explicit model predictive control with application in a buck converter system

M. R. Zamani, Z. Rahmani, B. Rezaie

Abstract: This paper proposes a novel structure of model predictive control algorithm for piecewise affine systems as a particular class of hybrid systems. Due to the time consuming and computational complexity of online optimization problem in MPC algorithm, the explicit form of MPC which is called Explicit MPC (EMPC) is applied in order to control of buck converter. Since the EMPC solves the optimization problem only once and in offline manner, this strategy is suitable for hybrid systems with fast dynamics. As opposed to typical EMPC that is uses only the first element of optimal input vector, the proposed strategy uses all entries of the control

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]

sequence with optimal weighting factors. In proposed EMPC, two separate optimization problems are solved at each algorithm step. The first one is related to EMPC optimization problem and the second optimization problem is concerned to finding optimal weighting factors so as to minimize the error signal at each step. The convergence property of the proposed EMPC towards to the desired value has been proved and the simulation results shows the better performance of the proposed EMPC strategy than the typical one, if the weighting factors and control horizons are adjusted properly.

Keywords: Model predictive control, Offline optimization, Buck converter, Convergence.

۱- مقدمه

سیستم‌های هیبریدی در زمینه‌های مختلف صنعتی از جمله کنترل ترافیک، کنترل فرآیند، طراحی ربات و ... نمایان هستند[۳-۱]. تعاریف مختلفی برای سیستم‌های هیبریدی مطرح شده‌اند. اما مهمترین تعریف آن، تعامل بین سیستم‌های پیوسته در زمان و گسسته در زمان است. دینامیکهای سیستم‌های هیبریدی اغلب پیوسته در زمان، گسسته در زمان یا تلفیقی از هر دو می‌باشند اما معمولاً به صورت معادلات دیفرانسیلی بیان می‌شوند. یک سیستم هیبریدی دارای N مد کاری است. در هر مد، رفتار سیستم هیبریدی توسط معادلات دیفرانسیل (یا تفاضلی) بیان می‌شود. سیستم با توجه به شرایط سوئیچینگ، از یک مد به مد دیگر تغییر وضعیت می‌دهد. اتوماتا، یک ساختار کلی برای مدلسازی سیستم‌های هیبریدی در جهت آنالیز این گونه سیستم‌ها است [۴]. اتوماتای هیبریدی از عوامل پیوسته و گسسته سیستم در جهت مدلسازی دینامیکی سیستم استفاده می‌کند. روش‌های مدلسازی زیادی برای سیستم‌های هیبریدی وجود دارد، همانند مدل تکه‌ای خطی (PWA) ، مدل متمم خطی (LC) و مدل دینامیکی منطقی ترکیبی (MLD) . این کلاس‌های هیبریدی تحت شرایطی که مربوط به خوش رفتاری و محدود بودن متغیرهای ورودی، حالت، خروجی و متغیرهای اضافی هست، معادلند [۵]. در این مقاله از روش مدلسازی PWA برای مدلسازی سیستم هیبریدی استفاده شده است. در مدل PWA ، قوانین سوئیچینگ و معادلات دینامیکی سیستم هیبریدی تابعی از متغیرهای حالت هستند و این مدل می تواند فرایندهای فیزیکی بسیاری را مدلسازی کند. از مدل PWA برای تقریب سیستم‌های غیرخطی با دقت دلخواه نیز می‌توان استفاده کرد.

یکی از روش‌های موفق برای کنترل سیستم‌های هیبریدی، الگوریتم پیش‌بین است. چون الگوریتم پیش‌بین قابلیت کنترل سیستم‌های دارای محدودیت فیزیکی را دارد، در صنعت بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد[۸-۶]. کنترل پیش‌بین یک روش کنترلی مبتنی بر بهینه‌سازی است که رفتار سیستم را بر اساس اطلاعات مدل فرآیند بهینه کرده و عملکرد مطلوب سیستم را با درنظر گرفتن قیود فرآیند فراهم می‌کند. در واقع الگوریتم پیش‌بین یک الگوریتم مبتنی بر پیش‌بینی است که براساس اصل افق پیشرو (RHP) عمل می‌کند. نحوه عملکرد الگوریتم پیش‌بین به این صورت است که در هر گام از الگوریتم، یک مسأله بهینه‌سازی آنلاین با افق محدود در جهت یافتن ورودی کنترلی بهینه انجام می‌شود و سپس از بردار ورودی حاصل شده فقط درایه اول آن به فرآیند اعمال می‌شود و بقیه درایه‌ها نادیده گرفته می‌شوند. در گام بعد بر اساس مشاهدات جدید این روال مجدداً تکرار می‌شود تا در نهایت پاسخ مطلوب حاصل می‌شود و سیگنال خطا به سمت صفر میل می‌کند[۹]. علی‌رغم مزایای زیاد کنترل پیش‌بین آنلاین، این الگوریتم دارای محاسبات(EMPC) طولانی و پیچیده‌ای است که باعث محدودیت در کاربرد عملی این الگوریتم شده است. برای این منظور از الگوریتم پیش‌بین صریح که مبتنی بر بهینه‌سازی آفلاین می‌باشد، استفاده می‌شود. در این روش به جای حل مکرر مسأله بهینه‌سازی به صورت آنلاین، فقط یکبار و به صورت آفلاین مسأله بهینه‌سازی حل می‌شود و پاسخ به صورت یک نقشه کامل ایجاد می‌شود[۱۱-۱۰]. الگوریتم EMPC در صنعت و برای فرآیندهای با دینامیک سریع مناسب می‌باشد[۷و ۱۲و ۱۳]. در [۱۴] از منطق فازی برای تقریب رفتار الگوریتم پیش‌بین برای فرآیندهای صنعتی استفاده شده است. در [۱۵] از ساختار الگوریتم پیش‌بین صریح با محاسبات آفلاین و آنلاین برای یافتن ساختار کنترلی بهینه و اطمینان از ایجاد پاسخی بهینه برای سیستم‌های غیرخطی به همراه قیود استفاده شده است. در [۱۶] از الگوریتم پیش‌بین برای کنترل یک سیستم سوئیچ شونده غیرخطی با استفاده از دو اصل افق پیشرو و کاهشی در جهت کاهش محاسبات آنلاین استفاده شده است.

مبدل باک یک سیستم هیبریدی با دینامیک‌های سریع است که برای تبدیل ولتاژ DC-DC مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم پیش‌بین صریح برای کنترل مبدل باک در [۷] ارایه شده است. در [۱۷] از طرح کنترلی سوئیچی بر مبنای ذخیره انرژی در مبدل باک استفاده شده است. در [۱۸] الگوریتم پیش‌بین صریح برای کنترل سیستم‌های هیبریدی با بررسی بحث پایداری بیان شده و در نهایت بر روی سیستم دستگاه تهویه هوای خورشیدی اعمال شده است. طراحی کنترل پیش‌بین برای سیستم‌های تکه‌ای افاین در [۱۹] ارایه شده است. در این مقاله از روش برنامه‌ریزی خطی برای طراحی مسأله کنترل بهینه برای سیستم‌های با ابعاد وسیع استفاده شده است. در [۲۰] آنالیز پایداری ورودی- خروجی برای سیستم‌های تکه‌ای افاین با نامعینی‌های ساختار نیافته ارائه و توسط روش پیش‌بین خطی چند-مدل با حضور قیود بر روی متغیر ورودی کنترل شده است.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]

در این مقاله بر خلاف مقالات ذکر شده، ساختار متفاوتی از کنترل پیش‌بین صریح برای کنترل مبدل باک به عنوان یک سیستم هیبریدی با دینامیک‌های سریع استفاده شده است. در این الگوریتم در هر مرحله بهینه‌سازی از مسأله کنترل پیش‌بین، دو مسأله بهینه‌سازی مجزا حل می‌شوند که یکی برای یافتن ورودی کنترلی بهینه و دیگری برای یافتن ضرایب وزنی بهینه است. در این ساختار به جای استفاده از اولین درایه از بردار ورودی کنترلی، از تمامی عناصر ورودی کنترلی به صورت وزندار استفاده می‌شود. در [۲۱] ساختار ریاضی این الگوریتم برای یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی در حضور اغتشاش ارائه شده است. بنابراین نوآوری‌های مقاله به شرح زیر هستند:

- طراحی ساختار متفاوتی از کنترل پیش‌بین برای سیستم هیبریدی با دینامیک‌های سریع که از دو مسأله بهینه‌سازی مجزا استفاده می‌کند.
- مسأله بهینه‌سازی اول مربوط به یافتن ورودی کنترلی بهینه پیش‌بین به صورت آفلاین است.
- مسأله بهینه‌سازی دوم برای یافتن ضرایب بهینه‌سازی بهینه در جهت کاهش سیگنال خطا در هر گام از الگوریتم است.
- اثبات همگرایی دنبال‌یابی روش پیش‌بین صریح پیشنهادی.

ساختار کلی مقاله به این صورت است: در بخش ۲ ساختار پیش‌بین پیشنهادی برای سیستم هیبریدی مطرح شده است. در بخش ۳ اثبات همگرایی الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. در بخش۴ نتایج شبیه‌سازی برای مبدل باک نمایش داده شده و نتیجه‌گیری‌های این مقاله در بخش آخر بیان شده‌اند.

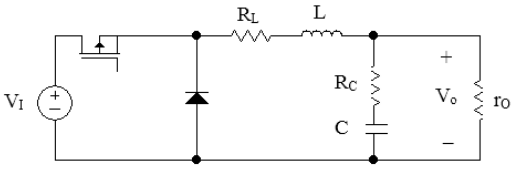
۲- ساختار پیش‌بین پیشنهادی

در این مقاله از ساختار تکه‌ای افاین برای مدلسازی سیستم هیبریدی استفاده شده است. مدل ریاضی یک سیستم هیبریدی تکه‌ای افاین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} x(n+1) = A_i\, x(n) + B_i\, u(n) + f_i \\ y(n) = C_i\, x(n) + D_i\, u(n) + g_i \end{cases} \qquad for \begin{bmatrix} x(n) \\ u(n) \end{bmatrix} \in R_i \;,\; i = 1,\ldots,m \qquad (۱)$$

که $x(n)$ و $u(n)$ و $y(n)$ به ترتیب متغیرهای حالت و ورودی و خروجی هستند. A_i, B_i, C_i, D_i ماتریس‌های سیستمی با ابعاد مناسب و g_i ، f_i بردارهای ثابت هستند. R_i نواحی چندوجهی حاصل شده از فضای متغیر ورودی/ حالت است و i تعداد دینامیک‌های سیستم هیبریدی را نشان می‌دهد. در ادامه، مدلسازی مبدل باک به صورت تکه‌ای افاین نشان داده شده است.

مبدل باک یک سیستم هیبریدی دارای سه مد کاری و دو متغیر حالت جریان سلف و ولتاژ خازن $x = [x_1 \;\; x_2]^T = [i_L \;\; v_c]^T$ است [۲۲]. باک یک مبدل DC-DC کاهنده است که جریان DC یک منبع را از یک سطح ولتاژ به سطح ولتاژ دیگر تبدیل می‌کند. ساختار مبدل باک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مبدل باک [۲۲]

بر اساس نحوه عملکرد سوئیچ و دیود، مدهای کاری مبدل توصیف می‌شوند. در مد اول، سوئیچ فعال و دیود غیر فعال است که در این هنگام سلف از سمت منبع تغذیه ورودی، انرژی دریافت می‌کند. در مد دوم، سوئیچ غیرفعال و دیود فعال است و انرژی ذخیره شده سلف در خازن و بار تخلیه می‌شود. در مد سوم که سوئیچ و دیود هر دو غیرفعال هستند، بار از طریق انرژی ذخیره شده در خازن تغذیه می‌شود. معادلات فضای حالت مبدل باک به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شوند:

$$\dot{x}(t) = A_i\, x(t) + B_i \quad i = 1,2,3 \qquad (۲)$$

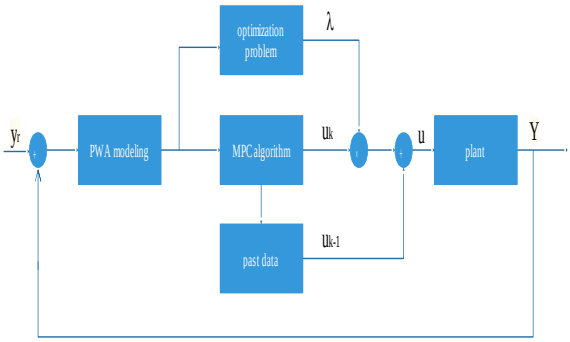
که ماتریس‌های A_i , B_i برای هر مد کاری به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C}\frac{r_o}{r_o+R_C}(1-C R_C \frac{R_L}{L}) & -\frac{1}{C}\frac{1}{r_o+R_C}(1-C R_C \frac{r_o}{L}) \end{bmatrix} \\ B_1 = \begin{bmatrix} \frac{V_L}{L} \\ V_I \frac{r_o}{r_o+R_C}\frac{R_C}{L} \end{bmatrix}, \quad A_2 = A_1 \;,\; B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{(r_o+R_C)C} \end{bmatrix}, \quad B_3 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \qquad (۳)$$

تغییر دینامیک‌های مختلف در سیستم مبدل باک بر اساس تغییر متغیرهای حالت صورت می‌پذیرد. بر این اساس مطابق با دینامیک فعال مبدل باک، کنترل‌کننده پیش‌بین خروجی، مبدل را به سمت مقدار موردنظر با خطای حالت ماندگار نزدیک به صفر سوق می‌دهد. با تغییر شرایط و در نتیجه تغییر متغیرهای حالت، دینامیک مبدل باک تغییر می‌کند. کنترل‌کننده پیش‌بین بر اساس دینامیک فعال مبدل باک، خروجی مبدل باک را به سمت مقدار موردنظر با حداقل خطای حالت ماندگار هدایت می‌کند. در واقع در هر لحظه نمونه‌برداری، کنترل‌کننده پیش‌بین یک مسأله بهینه‌سازی را با توجه به قیود فیزیکی حاکم بر سیستم و با توجه به دینامیک فعال حل می‌کند و پس از محاسبه بردار ورودی کنترلی و ضرایب وزنی بهینه، مقدار بهینه را به مبدل اعمال می‌کند. ممکن است به دلیل شرایط آزمایشگاهی یا برخی مقادیر عددی متغیرهای شبیه‌سازی، بعضی از دینامیک‌های مبدل فعال نشوند.

بلوک دیاگرام روش کنترلی در شکل ۲ نشان داده شده است.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]



شکل ۲. بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی.

در شکل ۲، λ بردار ضرایب وزنی است که از حل مسأله بهینه‌سازی حاصل می‌شود. y_r مسیر مرجع و u ورودی کنترلی اعمالی به سیستم است.

یکی از روش‌های کنترلی مناسب در جهت کنترل سیستم‌های هیبریدی، کنترل پیش‌بین است. الگوریتم پیش‌بین از حل مکرر مسأله بهینه‌سازی به صورت آنلاین برای یافتن ورودی کنترلی بهینه استفاده می‌کند. به همین دلیل این الگوریتم زمانبر است و محاسبات بهینه‌سازی طولانی دارد. علی‌رغم مزایای الگوریتم پیش‌بین آنلاین، این الگوریتم برای سیستم‌های با دینامیک کُند مناسب است. برای کنترل سیستم‌های با دینامیک سریع، کنترل پیش بین صریح ارائه شده است. در این الگوریتم به جای حل مکرر مسأله بهینه‌سازی، فقط یکبار بهینه‌سازی صورت می‌گیرد و به همین دلیل زمان زیادی صرف محاسبات نمی‌شود. در این الگوریتم از برنامه‌ریزی چند پارامتری در حل مسأله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در این تکنیک، با حل مسأله بهینه‌سازی یک نقشه کامل از مجموعه پاسخ‌های بهینه بدست می‌آید. این مجموعه پاسخ، توسط چندوجهی‌های متشکل از متغیر ورودی و حالت قابل نمایش هستند.

۳-روش پیش‌بین پیشنهادی

برای طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، ابتدا مدل تکه‌ای افاین (۱) به ساختار MLD تبدیل می‌شود.

$$\begin{cases} x(n+1) = \bar{A}\,x(n) + \bar{B}_1 u(n) + \bar{B}_2\,\delta(n) + \bar{B}_3\,z(n) \\ y(n) \;\; = \bar{C}\,x(n) + \bar{D}_1 u(n) + \bar{D}_2\,\delta(n) + \bar{D}_3\,z(n) \\ E_1\,x(n) + E_2\,u(n) + E_3\,\delta(n) + E_4\,z(n) \le E_5 \end{cases} \qquad (۴)$$

که در معادله (۴) شامل $x(n) = \left[x_R^T(n) \quad x_B^T(n)\right]^T$ است. $x_R(n) \in R$ و $x_B(n) \in \{0,1\}$ به ترتیب $z(n)$ و $\delta(n)$ متغیرهای اضافی و باینری می‌باشند. $\bar{A}, \bar{B}_i, \bar{C}, \bar{D}_i, E_j$ که $(i = 1,..,3), (j = 2,...,4)$ ماتریسهای ثابت از اعداد حقیقی و E_5 یک بردار حقیقی است.

برای سیستم‌های هیبریدی به دلیل تعامل بین دینامیک‌های گسسته و پیوسته، مدل‌های ریاضی زیادی در نظر گرفته می‌شوند که البته تحت شرایطی این مدل‌ها معادل یکدیگر هستند. هر مدل هیبریدی دارای ویژگی‌های مخصوص به خود می‌باشد. مثلاً بحث پایداری برای سیستم‌های PWA [۲۳]، تکنیک‌های کنترلی برای مدل MLD [۲۴] و شرایط وجود و یکتایی جواب (خوش رفتاری) برای سیستم‌های LC [۲۵] مطرح شده‌اند. بسته به شرایط کنترلی، یکی از مدل‌های هیبریدی انتخاب می‌شود. مدل MLD تعامل بین دینامیک‌های گسسته و پیوسته و متغیرهای باینری (جهت سوئیچ زنی بین دینامیک‌های یک سیستم هیبریدی) را به‌صورت معادلاتی خطی متشکل از متغیرهای گسسته و پیوسته نمایش می‌دهد و با در نظر گرفتن قیود به عنوان محدودیت‌های فیزیکی، آنرا به ساختار مناسب برای حل مسأله بهینه‌سازی برای یافتن ورودی کنترلی بهینه تبدیل می‌کند.

برای محاسبه ورودی کنترلی مدل هیبریدی MLD از مسأله بهینه‌سازی پیش‌بین به فرم معادله (۵) استفاده می‌شود. در این بهینه‌سازی، قیدهایی بر روی متغیرهای ورودی و حالت در نظر گرفته می‌شوند. با حداقل کردن تابع هدف با توجه به ورودی کنترلی، بردار ورودی بهینه با استفاده از اصل افق پیشرو بدست می‌آید. این مسأله بهینه‌سازی با عنوان مسأله کنترل بهینه زمان محدود مقید نیز شناخته می‌شود.

$$J(u_{n_y}, x(0)) = \min_{u_{n_y}} \sum_{w=0}^{n_y-1} \left\{ \left\| Q(y_{n+w|n} - y_d) \right\|_\rho + \left\| R u_w \right\|_\rho \right\}$$
$$Subj.\text{to} \quad \begin{cases} x(n|n) = x(n) \\ x(n+n_y|n) = x_d \\ MLD \quad form\ (2) \end{cases} \qquad (۵)$$

(در معادله (۵)، x_d متغیر حالت مطلوب و n_y افق پیش‌بین و R , Q ضرایب وزنی هستند. بهینه‌سازی بر اساس مقادیر نرم ورودی کنترلی و مقدار خطا تعریف شده است. $\rho = 1, 2, \infty$ به ترتیب نرم یک، دو و بینهایت تعریف می‌شوند. اگر $\rho = 2$ انتخاب شود، مسأله بهینه‌سازی (۵) تبدیل به مسأله بهینهسازی خطی محدب خواهد شد و اگر $\rho = 1, \infty$ انتخاب شود، به مسأله بهینه‌سازی خطی عدد صحیح تبدیل می‌شود. در الگوریتم EMPC، مسأله (۵) فقط یکبار حل می‌شود و پاسخی کامل از مجموعه جواب‌های بهینه ایجاد می‌شود. به همین دلیل سرعت اجرای این الگوریتم به مراتب سریعتر از الگوریتم پیش‌بین آنلاین است. در [۲۶] نشان داده شده است که پاسخ کلی مسأله (۵) به صورت تابع تکه‌ای افاین به فرم (۶) است.

$$u_n^*(x(n)) = L_n^i(x(n)) + M_n^i \qquad (۶)$$

که L_n^i, M_n^i ماتریس‌های تشکیل دهنده پاسخ بهینه در لحظه n و برای زیر سیستم i ام است.

برخلاف روش پیش‌بین متداول، در این الگوریتم تمام درایه‌های ورودی کنترلی به صورت وزندار برای به روز رسانی قانون کنترل استفاده می‌شوند. ورودی کنترلی در این روش در لحظه n به صورت رابطه (۷) به روز رسانی می‌شود.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]

$$u_n = u_{n-1} + \lambda_n^* \Delta\hat{u}_n \quad (۷)$$

که $\Delta\hat{u}_n$ برداری است که درایه‌های آن از اختلاف داده‌های پیش‌بینی شده از ورودی کنترلی فعلی بدست می‌آید و λ_n^* بردار ضرایب وزنی بهینه است که طبق مسأله بهینه‌سازی (۸) در هر مرحله از الگوریتم محاسبه می‌شود.

$$\lambda_n^* = \arg\min_{\lambda_n^*} \left\{ \|e_{n+1}\|_\rho^2 + \alpha \left\|\lambda_n^* - \vec{\gamma}\right\|^2 \right\} \quad (۸)$$

که $\vec{\gamma} = [0 \;\; 1 \;\; \dots \;\; 0 \;\; 1 \;\; 1]_{1\times n_u}$ و n_u افق کنترلی و α یک ضریب مثبت قابل تنظیم است. بردار ضرایب بهینه λ_n^* در بردار ورودی کنترلی حاصل شده از مسأله بهینه‌سازی (۵) در هر گام از الگوریتم ضرب و با ورودی کنترلی مرحله قبل جمع می‌شود تا ورودی کنترلی جدید برای کاهش سیگنال خطا در هر گام الگوریتم محاسبه شود. سیگنال خطا e_n در رابطه (۸) به صورت معادله (۹) محاسبه می‌شود:

$$e_n = y_d - y_n \quad (۹)$$

رابطه y_n برای سیستم هیبریدی با m زیرسیستم به صورت رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$y_n = \sum_{i=1}^{m} (\mathrm{C}_i\, x_n + g_i)\, \delta_n \quad (۱۰)$$

که $\delta(n) \in \{0,1\}$ بیانگر این واقعیت است که در هر لحظه فقط یک دینامیک سیستم هیبریدی فعال و بقیه دینامیک‌ها غیر فعال هستند. معادله (۱۱) که رابطه بدست آوردن ضرایب وزنی بهینه است، از بازسازی معادله (۸) بر اساس معادلات (۹) و (۱۰) ایجاد شده است.

$$\lambda_n^* = \arg\min_{\lambda_n^*} \left\{ \left\| y_d - \left(\sum_{n=1}^{m} (\mathrm{C}_n\, x_{n+1} + g_n)\, \delta_n \right) \right\|_\rho^2 + \alpha \left\|\lambda_n^* - \vec{\gamma}\right\|^2 \right\} \quad (۱۱)$$

ورودی کنترلی در هر مرحله از الگوریتم پیش‌بین به صورت رابطه (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\Delta u_j = u_{n+j|n} - u_{n|n} \quad , \quad j = 1, \dots, \mathrm{n}_u \quad (۱۲)$$

$$\Delta\hat{u}_n = [\, u_{n+1|n} - u_n \quad \cdots \quad u_{n+n_u|n} - u_n \,]^T \quad (۱۳)$$

با جایگذاری معادله (۷) در معادله (۱۱)، رابطه (۱۴) ایجاد می‌شود.

$$\lambda_n^* = \arg\min_{\lambda_n^*} \left\{ \left\| y_d - \left(\begin{matrix} (\mathrm{C}_n\,(A_n x_n \\ \sum_{n=1}^{m} + B_n(u_{n-1} + \lambda_n^* \Delta\hat{u}_n) \\ + f_n) + g_n)\, \delta_n \end{matrix} \right) \right\|_\rho^2 + \alpha \left\|\lambda_n^* - \vec{\gamma}\right\|^2 \right\} \quad (۱۴)$$

ورودی کنترلی بهینه از حل مسأله بهینه‌سازی فوق با استفاده از تعریف نرم و مشتق‌گیری به صورت رابطه (۱۵) حاصل می‌شود.

$$\lambda_n^* = \left[\sum_{n=1}^{q} \left(T_n + 2\lambda_n^* W_n \right) \delta_n \right] + 2\,\lambda_n^* - 2\vec{\gamma} \quad (۱۵)$$

که T_n , W_n به شکل رابطه‌های (۱۶) و (۱۷)تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} T_n = & -C_n\, B_n\, \Delta\hat{u}_n y_d^T - \Delta\hat{u}_n B_n^T C_n^T y_d \\ & + x_n^T A_n^T C_n^T C_n B_n \Delta\hat{u}_n \\ & + u_{n-1}^T B_n^T C_n^T C_n B_n \Delta\hat{u}_n \\ & + f_n^T C_n^T C_n B_n \Delta\hat{u}_n \\ & + g_n^T C_n B_n \Delta\hat{u}_n \end{aligned} \quad (۱۶)$$

$$W_n = B_n B_n^T C_n C_n^T \Delta\hat{u}_n \Delta\hat{u}_n^T \quad (۱۷)$$

با توجه به اینکه در سیستم‌های هیبریدی در هر لحظه فقط یک زیر سیستم فعال است لذا رابطه (۱۵) به رابطه (۱۸) برای یک زیر سیستم فعال تبدیل می‌شود.

$$\left(T_n + 2\lambda_n^* W_n \right) + 2\,\lambda_n^* - 2\vec{\gamma} = 0 \quad (۱۸)$$

پس ضرایب بهینه برای هر زیر سیستم فعال به صورت رابطه (۱۹) محاسبه می‌شوند:

$$\lambda_n^* = \left(2W_n + 2I \right)^{-1} (2\vec{\gamma} - T_n)\, \delta_n \quad (۱۹)$$

I در رابطه (۱۹) ماتریس همانی با ابعاد مناسب است.

قضیه ۱ همگرایی خروجی و متغیرهای ورودی و حالت الگوریتم پیش‌بین پیشنهادی را بیان می‌کند.

قضیه ۱: سیستم هیبریدی تکه‌ای افاین (۲۰) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} x(n+1) = A_i\, x(n) + B_i\, u(n) + f_i \\ y(n) = C_i\, x(n) + D_i\, u(n) + g_i \end{cases} \quad (۲۰)$$
$$for \begin{bmatrix} x(n) \\ u(n) \end{bmatrix} \in R_i \;,\; i = 1, \dots, m$$

با فرض وجود پاسخی بهینه برای مسأله بهینه سازی (۲۱)، خروجی و متغیرهای حالت سیستم با استفاده از روش برنامه‌ریزی چند پارامتری به سمت مقادیر مطلوب همگرا می‌شوند.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]

$$J_0^*(x(0)) = \min_{u_{n_y}} J(u_{n_y}, x(0))$$
$$Subj.to \begin{cases} x(n+1) = A_i\, x(n) + B_i\, u(n) + f_i \\ if \begin{bmatrix} x(n) \\ u(n) \end{bmatrix} \in X_i,\ i = 1,\ldots,q \\ x_{n_y} \in X_f \end{cases} \quad (۲۱)$$

که X_f مجموعه متغیرهای شدنی $x(n)$ است.

$$If\ n \to \infty \qquad then \qquad u(n) \to u^*(n)$$
$$x(n) \to x_d\ ,\quad y(n) \to y_d\ \ and\ \ e_n \to 0\ .$$

اثبات:

با حل مسأله بهینه‌سازی (۲۲)، سیگنال ورودی کنترلی بدست می‌آید.

$$\min_{u_{n_y}} \sum_{i=0}^{n_y-1} \left\{ \left\| Q(y_{n+i|n} - y_d) \right\|_2 + \left\| R u_i \right\|_2 \right\} \quad (۲۲)$$

که در رابطه (۲۲) $u_{n_y} = \left\{u'_0,\ldots,u'_{n_y-1}\right\}$ می‌باشد. پاسخ مسأله بهینه‌سازی (۲۲) ساختار تکه‌ای افاین دارد [۲۸-۲۷].

$$u_n^*(x(n)) = L_n^i(x(n)) + M_n^i \quad (۲۳)$$

سیگنال ورودی کنترلی بهینه (۲۳)، باعث همگرایی متغیرهای خروجی و حالت سیستم به سمت مقادیر موردنظر می‌شود[۲۷]. در نتیجه رابطه (۲۴) حاصل می‌شود.

$$\begin{cases} x(n) = x(n-1) \\ u^*(n) = u^*(n-1) \ \Rightarrow \\ L_n^i\, x(n) + M_n^i = L_{n-1}^i\, x(n-1) + M_{n-1}^i \end{cases} \quad (۲۴)$$

اگر بردار λ_n^* دارای مقادیری محدود و بهینه از حل مسأله بهینه‌سازی (۸) باشد، می‌توان نشان داد که همگرایی الگوریتم فوق با استفاده از روش پیش‌بین پیشنهادی تغییری نمی‌کند. با جایگذاری رابطه (۲۳) در رابطه (۷)، معادله (۲۵) ایجاد می‌شود.

$$\begin{aligned} u_n^*(x(n)) &= \lambda_n^*\,(L_n^i\, x(n) + M_n^i) \\ &\quad + u_{n-1}^*(x(n-1)) \\ &= \lambda_n^*\, L_n^i\, x(n) \\ &\quad + \lambda_n^*\, M_n^i + u_{n-1}^*(x(n-1)) \end{aligned} \quad (۲۵)$$

$$\begin{aligned} u_n^*(x(n)) &= u_{n-1}^*(x(n-1)) \\ &\quad + \lambda_n^*\, L_n^i\, x(n) + \lambda_n^*\, M_n^i \end{aligned} \quad (۲۶)$$

رابطه (۲۵) برای $x(n-1)$ به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned} u^*(x(n-1)) &= u^*(x(n-2)) \\ &\quad + \lambda_{n-1}^*\, L_{n-1}^i\, x(n-1) + \lambda_{n-1}^*\, M_{n-1}^i \end{aligned} \quad (۲۷)$$

از تفاضل رابطه (۲۶) و (۲۷):

$$\begin{aligned} &u^*(x(n)) - u^*(x(n-1)) = \\ &\quad u^*(x(n-1)) - u^*(x(n-2)) \\ &\quad + \lambda_n^* L_n^i\, x(n) - \lambda_{n-1}^*\, L_{n-1}^i\, x(n-1) \\ &\quad + \lambda_n^*\, M_n^i - \lambda_{n-1}^*\, M_{n-1}^i \end{aligned} \quad (۲۸)$$

به منظور برقراری ویژگی همگرایی برای الگوریتم پیش‌بین پیشنهادی، باید معادله (۲۹) برقرار باشد.

$$\Delta u^*(n) \underset{n\to\infty}{=} \Delta u^*(n-1) \quad (۲۹)$$

با بررسی رفتار λ_n^* در بینهایت:

$$\begin{aligned} \lambda_n^* = \arg\min_{\lambda^*_n} \ \{ &\left\| e_{n+1} \right\|_\rho^2 + \alpha\,(\lambda_{n,1}^{*\,2} + \\ &(\lambda_{n,2}^* - 1)^2 + \sum_{i=3}^{n_u-2} \lambda_{n,i}^{*\,2} + \\ &(\lambda_{n,n_u-1}^* - 1)^2 + (\lambda_{n,n_u}^* - 1)^2)\} \end{aligned} \quad (۳۰)$$

$$\lambda_n^* \le \left\| e_{n+1} \right\|_\rho^2 + \alpha \begin{pmatrix} \lambda_{n,1}^{*\,2} + (\lambda_{n,2}^* - 1)^2 \\ + \sum_{i=3}^{n_u-2} \lambda_{n,i}^{*\,2} + (\lambda_{n,n_u-1}^* - 1)^2 \\ + (\lambda_{n,n_u}^* - 1)^2 \end{pmatrix} \quad (۳۱)$$

$$\lambda_\infty^* \le \left\| e_\infty \right\|_\rho^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha \begin{pmatrix} \lambda_{n,1}^{*\,2} + \\ (\lambda_{n,2}^* - 1)^2 + \sum_{i=3}^{n_u-2} \lambda_{n,i}^{*\,2} + \\ (\lambda_{n,n_u-1}^* - 1)^2 + (\lambda_{n,n_u}^* - 1)^2 \end{pmatrix} \quad (۳۲)$$

به دلیل محدود بودن λ_n^* و مثبت بودن مقدار α، در معادله (۳۲) شرایط زیر برقرار می‌باشند:

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]

$$\sum_{n=1}^{\infty}\alpha\begin{pmatrix}\lambda_{n,1}^{*\,2}+(\lambda_{n,2}^{*}-1)^2\\+\sum_{i=3}^{n_u-2}\lambda_{n,i}^{*\,2}+(\lambda_{n,n_u-1}^{*}-1)^2\\+(\lambda_{n,n_u}^{*}-1)^2\end{pmatrix}<\infty \qquad (۳۳)$$

$$\lim_{z\to\infty}\left[\sum_{n=1}^{z}\begin{pmatrix}\lambda_{n,1}^{*\,2}+(\lambda_{n,2}^{*}-1)^2\\+\sum_{i=3}^{n_u-2}\lambda_{n,i}^{*\,2}+\\(\lambda_{n,n_u-1}^{*}-1)^2+\\(\lambda_{n,n_u}^{*}-1)^2\end{pmatrix}\right]=0 \qquad (۳۴)$$

با توجه به روابط (۳۳) و (۳۴)، نتایج زیر حاصل می‌شوند:

$$\begin{cases}\lim_{n\to\infty}\lambda_{n,1}^{*}\to 0\ ,\ \lim_{n\to\infty}\lambda_{n,2}^{*}\to 1,\\ \lim_{n\to\infty}\lambda_{n,n_u-1}^{*}\to 1\ ,\ \lim_{n\to\infty}\lambda_{n,n_u}^{*}\to 1\\ \lim_{n\to\infty}\lambda_{n,i}^{*}\to 0\quad for\quad i=3,\ldots,n_{u-2}\end{cases} \qquad (۳۵)$$

و در نتیجه:

$$\lambda_n^{*}\underset{n\to\infty}{\to}\vec{\gamma}\quad\Rightarrow\lambda_n^{*}\underset{n\to\infty}{=}\lambda_{n-1}^{*} \qquad (۳۶)$$

با توجه به روابط (۲۴) و(۳۶):

$$\lambda_n^{*}L_n^{i}x(n)+\lambda_n^{*}M_n^{i}=\\ \lambda_{n-1}^{*}L_{n-1}^{i}x(n-1)+\lambda_{n-1}^{*}M_{n-1}^{i} \qquad (۳۷)$$

در نتیجه رابطه (۳۸) با توجه به رابطه (۳۷) بدست می‌آید:

$$\Delta u^{*}(x(n))\underset{n\to\infty}{=}\Delta u^{*}(x(n-1))\Rightarrow u_n\underset{n\to\infty}{\to}u_n^{*} \qquad (۳۸)$$

با توجه به روابط (۹) و (۲۰) و (۲۳):

$$x(n)\underset{n\to\infty}{=}x(n-1)=x_d\ ,\\ y(n)\underset{n\to\infty}{=}y(n-1)=y_d\ \Rightarrow\ e_n\to 0 \qquad (۳۹)$$

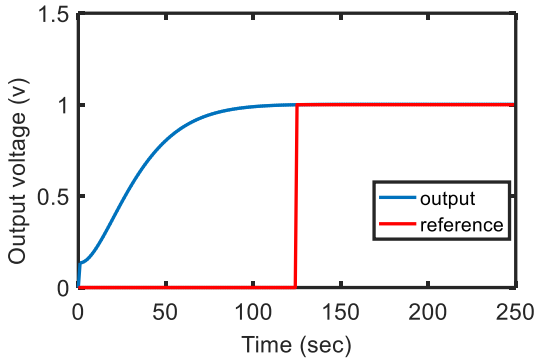
توجه۱: با تنظیم مناسب ضرایب وزنی و انتخاب مناسب افق‌های کنترلی الگوریتم پیش‌بین صریح پیشنهادی می‌توان متغیرهای خروجی و حالت را با سرعت همگرایی بیشتری نسبت به الگوریتم پیش‌بین متداول به سمت مقادیر موردنظر سوق داد. ذکر این نکته الزامی است که بین سرعت همگرایی پاسخ خروجی و عملکرد مطلوب پاسخ خروجی تعامل وجود دارد و به همین دلیل است که تنظیم مناسب ضرایب وزنی و انتخاب افق پیش‌بین دارای اهمیت می‌باشند.

توجه۲: ضرایب وزنی درحل مسأله بهینه‌سازی کنترل پیش‌بین معمولی در جهت کاهش مقدار خطا در هر لحظه نمونه برداری استفاده می‌شود. در روش پیش‌بین آنلاین برای به دست آوردن ورودی کنترلی بهینه در هر لحظه یکبار مسأله بهینه‌سازی حل می‌شود و در لحظه نمونه‌برداری بعدی این روند دوباره تکرار می‌شود، لذا برای سیستم‌های با دینامیک کُند مناسب است و برای سیستم‌های با دینامیک سریع مناسب نیست. به همین دلیل از روش کنترل پیش‌بین صریح استفاده شده است. در این الگوریتم به جای حل مکرر مسأله بهینه‌سازی، فقط یکبار مسأله بهینه‌سازی حل شده و سپس نقشه کامل از مجموعه جواب‌های بهینه ایجاد شده و در هر لحظه پاسخ بهینه انتخاب می‌شود. این مجموعه جواب به صورت نواحی چند وجهی قابل نمایش هستند. ترکیب وزندار درایه‌های کنترلی برای کاهش مقدار خطا در لحظات نمونه برداری بعدی است.کنترل پیش‌بین آنلاین برای فرآیندهای آرام و کنترل پیش‌بین صریح برای فرآیندهای با دینامیک های سریع مناسب است و باعث کاهش سرعت الگوریتم نخواهدشد.

روش پیش‌بین صریح پیشنهادی قابلیت حذف اثر اغتشاشات تکرارشونده را نیز داراست که جزئیات بیشتر درباره قابلیت حذف اثر اغتشاش تکرارشونده در [۲۹] ارایه شده است.

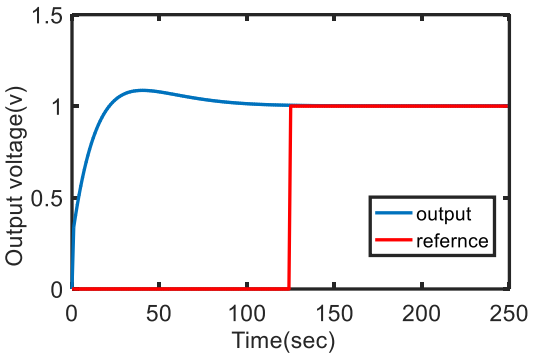
٤- نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی برای مبدل باک در افق‌های پیش‌بین $n_y=4\ ,\ 6$ در این بخش ارائه شده‌اند. در تمام نتایج شبیه‌سازی، $T_s=0.1\mu s.$ و $\alpha=0.6$ و $Q=1$ و $R=0.00002$ در نظر گرفته شده‌اند. شکل‌های ۳ و ۴ پاسخهای خروجی مبدل باک برای افق پیش‌بین $n_y=4,6$ را با در نظر گرفتن پاسخ پله به عنوان سیگنال مرجع را نشان می‌دهند. شکلهای ۵ و ۶ نواحی کنترل‌کننده را برای افق‌های $n_y=4,6$ نمایش می‌دهند.

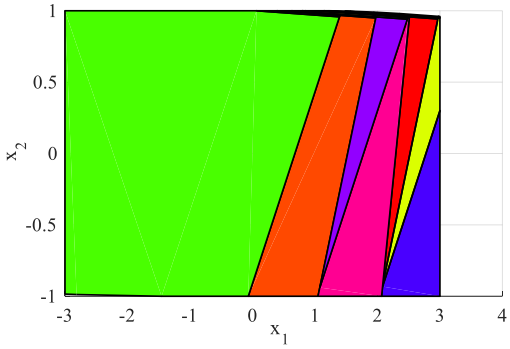


شکل ۳. پاسخ خروجی مبدل باک در افق $n_y=4$.

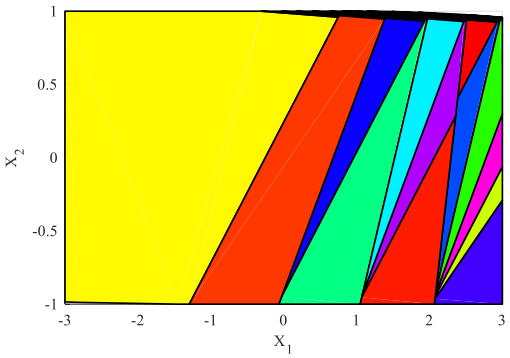
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]



شکل ۴. پاسخ خروجی مبدل باک در افق $n_y = 6$.

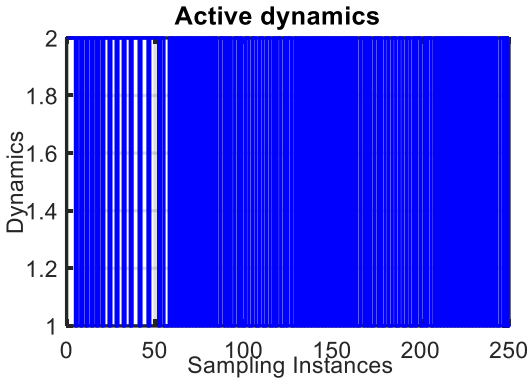


شکل ۵. نواحی کنترل‌کننده در افق $n_y = 4$.

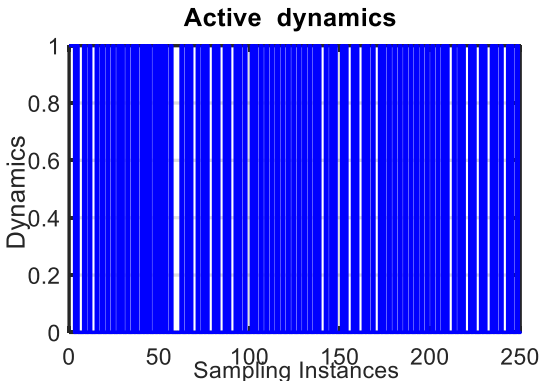


شکل ۶. نواحی کنترل‌کننده در افق $n_y = 6$.

مبدل باک دارای ۳ دینامیک با معادلات فضای حالت (۳) برای هر مد کاری می‌باشد که این دینامیک‌ها با تغییر مقادیر متغیرهای فضای حالت و با توجه به شرایط مبدل منجر به تغییر وضعیت سوئیچ و دیود در طول کارکرد سیستم و درنتیجه فعال شدن دینامیک‌های مختلف مبدل باک می‌شوند . در مد اول، سوئیچ فعال و دیود غیر فعال است که در این هنگام سلف از سمت منبع تغذیه ورودی انرژی دریافت می‌کند. در مد دوم، سوئیچ غیرفعال و دیود فعال است و انرژی ذخیره شده در سلف در خازن و بار تخلیه می‌شود. در مد سوم که سوئیچ و دیود هر دو غیرفعال هستند، بار از طریق انرژی ذخیره شده در خازن تغذیه می‌شود. نحوه تغییر دینامیک‌های مبدل باک به صورت عملکرد منطقی صفر و یک است که در نتیجه تغییر وضعیت سریع دیود و سوئیچ ایجاد می‌شوند. شکل‌های ۷ و ۸ دینامیک‌های فعال مبدل باک را در افق‌های پیش‌بین $n_y = 4,6$ نشان می‌دهند.

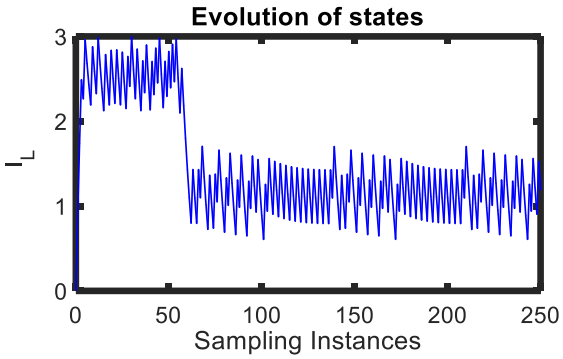


شکل ۷. دینامیک‌های فعال مبدل باک در افق $n_y = 4$.



شکل ۸ دینامیک‌های فعال مبدل باک در افق $n_y = 6$.

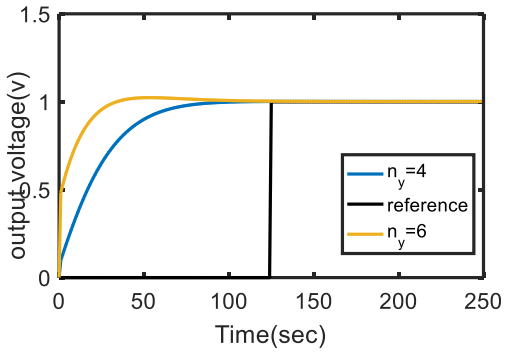
شکل ۹، ارزیابی سیگنال جریان سلف در افق پیش‌بین $n_y = 4$ را به صورت مقید $0 \le i_L \le 3$ نمایش می‌دهد.



شکل ۹. سیگنال جریان سلف در افق پیش‌بین $n_y = 4$.

شکل ۱۰، مقایسه بین خروجی مبدل باک را در دو افق پیش‌بین $n_y = 4,\ 6$ نشان می‌دهد.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]



شکل ۱۰. مقایسه خروجی مبدل باک در دو افق پیش‌بین $n_y = 4, 6$.

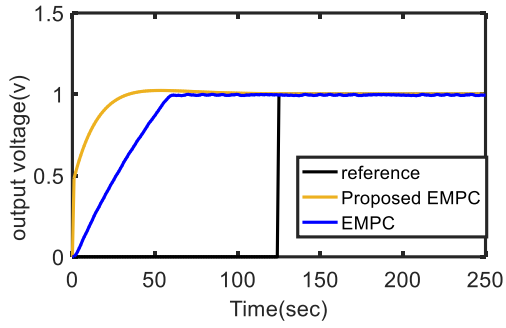
نتایج حاصل از مقایسه دو افق پیش‌بین $n_y = 4, 6$ در جدول ۱ قابل مشاهده هستند. همانطور که در جدول ۱ نیز نمایان است با افزایش افق پیش‌بین به شرط تنظیم مناسب ضرایب وزنی، سرعت همگرایی افزایش ولی فراجهش نیز به مقدار خیلی کمی افزایش داشته است. در نتیجه، افزایش نامناسب افق پیش‌بین به منظور افزایش سرعت همگرایی منجر به افزایش فراجهش و عملکرد نامناسب پاسخ خروجی می‌شود.

جدول ۱. مقایسه نتایج کنترل‌کننده پیش‌بین پیشنهادی در دو افق پیش‌بین ۴ و ۶.

	زمان صعود (ثانیه)	زمان نشست (ثانیه)	درصد فراجهش(٪)
افق پیش‌بین ۴	۵۰	۶۳	۰
افق پیش‌بین ۶	۲۰	۵۵	۲/۳

توجه۲: همانطور که قبلاً هم ذکر شد برای دستیابی به پاسخ خروجی مناسب سیستم، نیاز به تنظیم مناسب ضرایب وزنی و افق‌های پیش‌بین است. همانطور که در شکل ۱۰ نمایان است با افزایش افق پیش‌بین، سرعت همگرایی افزایش یافته ولی پاسخ دارای کمی فراجهش شده است. بنابراین بین افزایش سرعت و عملکرد مطلوب سیستم تعامل وجود دارد. برای دستیابی به دو این هدف، باید تنظیم ضرایب وزنی و انتخاب افق پیش‌بین به درستی انجام گیرند.

شکل ۱۱، مقایسه بین کنترل پیش‌بین صریح پیشنهادی و کنترل پیش‌بین صریح متداول در افق پیش‌بین $n_y = 6$ را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۱. مقایسه بین کنترل پیش‌بین صریح متداول و پیشنهادی در افق $n_y = 6$.

جدول ۲، نتایج مقایسه‌ای بین سیگنال‌های خروجی در هر دو الگوریتم پیش‌بین صریح متداول و پیش‌بین صریح پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه نتایج کنترل‌کننده پیش‌بین صریح پیشنهادی و پیش‌بین صریح متداول.

	زمان صعود (ثانیه)	زمان نشست (ثانیه)	درصد فراجهش(٪)
پیش‌بین صریح پیشنهادی	۲۰	۵۵	۲/۳
پیش‌بین صریح متداول	۵۳	۵۶	۰

همانطور که در جدول نیز نمایان است در یک افق پیش‌بین یکسان، روش پیش‌بین صریح پیشنهادی با تنظیم مناسب ضرایب وزنی پاسخی مناسبتر نسبت به پیش‌بین متداول ارایه داده است. لازم به ذکر است که روش پیش‌بین پیشنهادی یک ضریب وزنی بیشتر نسبت به روش پیش‌بین متداول داراست و بقیه ضرایب وزنی مربوط به تابع هزینه به طور یکسان برای هر دو نوع کنترل‌کننده تنظیم شده‌اند. روش پیش‌بین پیشنهادی به دلیل دارا بودن یک ضریب وزنی بیشتر به شرط تنظیم درست ضرایب وزنی و انتخاب مناسب افق پیش‌بین، پاسخ خروجی مناسبتری (افزایش سرعت همگرایی و عملکرد مطلوب پاسخ خروجی) را برای سیستم مهیا کرده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتم جدیدی از کنترل پیش‌بین صریح معرفی شده است. در این استراتژی به جای استفاده از اولین عنصر بردار ورودی کنترل، از تمام درایه‌های ورودی کنترلی بهینه به صورت وزندار استفاده شده است. با تنظیم مناسب ضرایب وزنی و انتخاب درست افق‌های پیش‌بین، می‌توان به پاسخ خروجی با عملکردی مطلوب و سرعت همگرایی مناسب دست یافت. به عبارت دیگر، با توجه به نتایج شبیه‌سازی، پاسخ خروجی مناسب از تعامل بین ضرایب وزنی و انتخاب مناسب افق‌های کنترلی ایجاد می‌شود.

مراجع

[1] T.A. Johansen, J. Kalkkuhl, J. L¨udemann, and I. Petersen, “Hybrid control strategies in ABS,” In American Control Conference, Arlington, Virginia, pp. 1704-1705, 2001.

[2] A. Bemporad, P. Borodani, and M. Mannelli. “Hybrid control of an automotive robotized gearbox for reduction of consumptions and emissions,” in Lecture Notes in Computer Science, pp. 81–96. Springer-Verlag, 2003.

[3] M. Sarailoo, Z. Rahmani and B. Rezaie, “Modeling of three-tank system with nonlinear valves based on hybrid system approach”, Journal of control

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]

Engineering Chemistry Research, vol. 53, no. 6, pp. 2362-2381, 2014.

[16] Y. Chen and M. Lazar, "An Efficient MPC Algorithm for Switched Nonlinear Systems with Minimum Dwell Time Constraints," arXiv preprint arXiv:2002.09658, 2020. URL https://arxiv.org/abs/2002.09658.

[17] L. Wang, Q. H. Wu, YK. Tao, et al., "Switching Control of Buck Converter Based on Energy Conservation Principle," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 24, pp. 1779-1787, 2016.

[18] EF. Camacho, DR. Ramirez, D. Limon, et al., "Model predictive control techniques for hybrid systems," Annual Reviews in Control, vol. 34, pp. 21-31,2010.

[19] T. Marcucci and R. Tedrake, "Mixed-integer formulations for optimal control of piecewise-affine systems," Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control. Montreal, Quebec, Canada: Association for Computing Machinery, pp. 230–239, 2019.

[20] P. Petsagkourakis, WP. Heath and C. Theodoropoulos, "Stability analysis of piecewise affine systems with multi-model predictive control," Automatica 111: 108539, 2020. URL http://arxiv.org/abs/1808.00307.

[21] M. R. Zamani, Z. Rahmani and B. Rezaie, "A novel model predictive control strategy for constrained and unconstrained systems in presence of disturbance," IMA Journal of Mathematical Control and Information, vol. 37, pp. 208-225, 2020.

[22] M. Hejri and A. Giua. "Hybrid modeling and control of switching DC-DC converters via MLD systems," Automation Science and Engineering (CASE), Trieste, Italy, pp. 714-19, 2011.

[23] R. Alur, C. Courcoubetis, N. Halbwachs, T. Henzinger, P.-H. Ho, X. Nicollin, A. Oliveiro, J. Sifakis, and S. Yovine. "The algorithmic analysis of hybrid systems". Theoretical and Computer Science, vol. 138, 3–34, 1995.

[24] A. Bemporad and M. Morari. "Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints". Automatica, vol. 35, 407–427, 1999.

[25] W. P. M. H. Heemels, J. M. Schumacher, and S. Weiland. "Linear complementarity systems". SIAM J. Appl. Math., vol. 60, 1234–1269, 2000.

[26] J. Hätönen. "Issues of algebra and optimality in iterative learning control," Ph.D. dissertation, Dept. Process Environ. Eng., Univ. Oulu, Oulu, Finland 2004.

[27] P. TøNdel, T. A. Johansen, A. Bemporad, "An algorithm for multi-parametric quadratic engineering and technology, vol. 3, no. 1, pp. 20-23, 2013.

[4] R. Alur, et al., "The algorithmic analysis of hybrid systems". Theoretical and Computer Science, vol. 138, pp. 3–34, 1995.

[5] P. M. H. Heemels, B. De Schutter, and A. Bemporad, "Equivalence of hybrid dynamical models," Automatica, vol. 37, pp. 1085–1091, 2001.

[6] M .Sarailoo, B. Rezaie and Z. Rahmani, Fuzzy predictive control of three-tank system based on a modeling framework of hybrid systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, vol. 228, no. 6, pp. 369-384, 2014.

[7] M. Zamani Behbahani, R. Mahboobi Esfanjani and M. Hejri, "Design of switching rule for Buck converters using explicit predictive control," The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015), Tehran, pp. 486-491, 2015.

[8] M. R. Zamani, Z. Rahmani and B. Rezaie, "A Controller Design based on Iterative Learning method and Model Predictive Control for a nonlinear process system," 2019 6th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), Sanandaj, Iran, pp. 1-7, 2019.

[9] J. A Rossiter. "Model-Based Predictive Control: A Practical Approach," CRC Press, 2003.

[10] EN. Pistikopoulos, V. Dua, "On-line optimization via off-line parametric optimization tools," Computers and Chemical Engineering, vol. 26, pp. 175-185, 2002.

[11] M. Herceg, "Real-Time Explicit Model Predictive Control of Processes," Dissertation Thesis, Slovak University of Technology in Bratislava, 2001.

[12] O. Stanojev, U. Markovic, P. Aristidou, et al., "MPC-Based Fast Frequency Control of Voltage Source Converters in Low-Inertia Power Systems," arXiv preprint arXiv:2004.02442, 2020. URL https://arxiv.org/abs/2004.02442.

[13] J. Chen, Y. Chen, L. Tong, et al., "A Back-Propagation Neutral Network based Explicit Model Predictive Control for DC-DC converters with High Switching Frequency," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020.

[14] K. Kiš and M. Klaučo , "Neural Network Based Explicit MPC for Chemical Reactor Control," arXiv preprint arXiv:1912.04684, 2019. URL https://arxiv.org/abs/1912.04684

[15] M. Sarailoo, Z. Rahmani and B. Rezaie, "Fuzzy predictive control of a boiler–turbine system based on a hybrid model system", Industrial &

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]

programming and explicit MPC solutions," Automatica, vol. 39, pp. 489-497, 2003.

[28] A. Bemporad and M. Morari. "Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints," Automatica, vol. 35, pp. 407–427, 1999.

[29] M. R. Zamani, Z. Rahmani and B. Rezaie, "A novel model predictive control for a piecewise affine class of hybrid system with repetitive disturbance," ISA Transactions, vol. 108, pp. 18-34, 2021.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.1.1.3]
[DOI: 10.52547/joc.16.1.1]