

بهره‌برداری هاب انرژی با استفاده از روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل مقاوم با در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی بار الکتریکی

زهرا هاشمی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، امین رضانی^۲، استادیار، محسن پارسامقدم^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران - Zahra.hashemi@modares.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران - Ramezani@modares.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران - Parsa@modares.ac.ir

چکیده: در سیستم چند حامله انرژی، نقاطی فیزیکی بنام هاب انرژی وجود دارند که محل تحویل انرژی به مصرف کننده بوده و امکان تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی را نیز دارند. امروزه کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل روشی مؤثر در کنترل این سامانه محسوب می‌شود اما این روش توانایی روبرویی با عدم قطعیت سامانه را ندارد. در این مقاله برای رفع این ضعف عدم قطعیت ناشی از خطای پیش‌بینی بارهای الکتریکی به صورت اغتشاش به مدل فضای حالت سامانه اضافه می‌شود سپس از کنترل کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل مقاوم بر مبنای ماتریس‌های نابرابری‌های خطی استفاده می‌شود. کنترل کننده پیشنهادی برای کنترل هاب انرژی شامل ترانسفورماتور، بویلر، CHP و ذخیره‌سازهای حرارتی و الکتریکی با در نظر گرفتن برنامه پا سخگویی بار به کار گرفته می‌شود. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که با وجود عدم قطعیت روش کنترل پیش‌بین مقاوم نسبت به کنترل پیش‌بین معمولی برنامه‌ریزی دقیق‌تری را برای سامانه انجام می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: هاب انرژی، کنترل پیش‌بین مقاوم، بهره‌برداری، عدم قطعیت، بارهای کنترل‌پذیر.

Operation of Energy Hub using Robust Model Predictive Control considering Uncertainties of Forecasted Electrical Loads

Z. Hashemi, M.S. student¹ A. Ramezani, Assistant Professor² M. Parsa-Moghaddam, Professor³

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: Zahra.Hashemi@modares.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: Ramezani@modares.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: Parsa@modares.ac.ir

Abstract: Multi-carrier systems have a number of physical nodes which are called energy hub, providing energy for consumers. Energy hub converts and stores energy as well. Recently, Model Predictive Control has been widely used to efficiently control Hubs. MPCs show no high performance facing to system uncertainties. In this paper to address this weakness, uncertainties of forecasted electrical loads has been added as disturbance to the state-space model of the system. Then LMI based Robust Model Predictive Controller studied on the EH consisting of transformer, boiler, CHP, electrical and heat storages considering demand side management. As simulation results show, Robust predictive controller carry outs more precise planning for the system than predictive controller, whilst uncertainty exists.

Keywords: Energy hub, robust model predictive control, operation, uncertainty, controlable load.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۴/۵/۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۶/۱۷ و ۹۴/۷/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۹/۲۹

نام نویسنده مسئول: امین رضانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

است که با در نظر گرفتن چارچوب قطعی داده‌های بار و قیمت و ملاحظه نمودن محدودیت‌ها تابع هزینه کلی سیستم حداقل می‌شود [۱۲-۱۰]. اما در حقیقت مسئله بهره‌برداری هاب انرژی با عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌سازی این سامانه و نوسانات قیمت و تقاضای بار و توان تولیدی منابع تجدیدپذیر روبرو است.

در پژوهش‌ها روش‌های متفاوتی برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها پیشنهاد می‌شود. مرجع [۱۳] از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدل‌سازی تصادفی پروفایل قیمت زمان واقعی بازار استفاده می‌کند. در مقالات [۱۴، ۱۵] به منظور بررسی اثر عدم قطعیت ضرایب بهره‌مبدل‌ها هاب انرژی بدون برنامه پاسخگویی بار و منابع تجدیدپذیر با در نظر گرفتن پیش‌بینی دقیق بار و قیمت با روش کنترل مقاوم برنامه‌ریزی می‌شوند. در مقاله [۱۶] برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مسئله بهره‌برداری هاب انرژی از شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید سناریوهای درختی بر اساس پیش‌بینی قیمت، باد و تقاضای بار الکتریکی استفاده می‌شود. ضمن حل این مسئله علاوه بر اینکه نقطه بهینه به دست نمی‌آید، بار محاسباتی بالایی نیز به وجود می‌آید. ذخیره‌سازها با روش کنترل پیش‌بین برای جبران عدم قطعیت ناشی از خطای پیش‌بینی توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر به کار گرفته شده‌اند [۱۷]. در مراجع [۱۸-۲۰] مسئله بهره‌برداری هاب‌های انرژی در ساعات مختلف با هدف بهینه‌سازی اقتصادی با روش کنترل پیش‌بین انجام می‌شود. به دلیل ماهیت حلقه بسته این روش کنترلی خطای ناشی از عدم قطعیت‌ها در هر تکرار تا حدی تصحیح می‌شود.

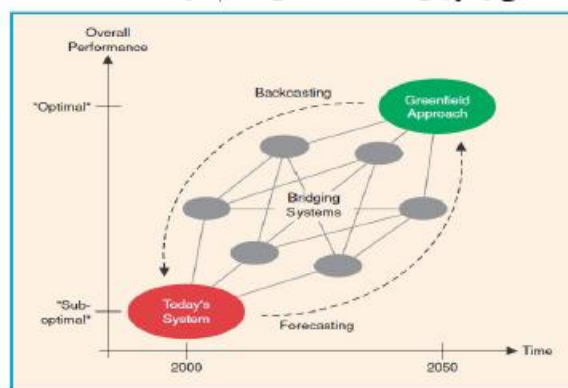
امروزه کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به‌عنوان ابزار کنترلی قوی برای بهره‌برداری سیستم‌های چندحامله انرژی به حساب می‌آید. اما باید به این نکته توجه داشت که در راهبرد کنترل پیش‌بین برای محاسبه سیگنال کنترل تابع هدف بهینه‌سازی بر اساس پیش‌بینی رفتار آینده حداقل می‌شود. این در حالی است که سامانه هاب انرژی در پیش‌بینی رفتار آینده خود دارای عدم قطعیت است. برای جبران این ضعف می‌توان با اضافه کردن این عدم قطعیت‌ها به مدل از کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم به‌جای کنترل‌کننده پیش‌بین معمولی بهره‌برد [۲۱، ۲۲].

در این مقاله رویکردی کنترلی برای مدل‌سازی و بهره‌برداری هاب انرژی پیشنهاد شده است. ابتدا مدل‌سازی فضای حالت سامانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از خطای پیش‌بینی بارهای الکتریکی به‌عنوان اغتشاش اضافه‌شونده به سیستم ارائه می‌شود.

سپس یک کنترل‌کننده مبتنی بر ترکیب دو روش کنترل پیش‌بین معمولی و مقاوم بر مبنای نامساوی‌های خطی پیشنهاد می‌شود. در این روش مسئله بهره‌برداری بر اساس دینامیک ذخیره‌سازهای انرژی، برنامه پاسخگویی و پروفایل بار و قیمت و با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از خطای پیش‌بینی بارهای الکتریکی حل می‌شود. در این روش از مدل برای پیش‌بینی خروجی‌های سامانه استفاده می‌شود. برای تعیین عملکرد بهینه، دو تابع بهینه‌سازی مربعی و MIN-MAX با هدف

علاوه بر سیستم قدرت، زیرساخت‌های انرژی دیگری نیز برای تأمین انرژی موردنیاز مصرف‌کنندگان نقش ایفا می‌کنند. در حال حاضر این زیرساخت‌ها به‌طور مستقل مورد بهره‌برداری و برنامه‌ریزی قرار می‌گیرند. ترکیب این زیرساخت‌ها مزایایی همچون افزایش قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری در تأمین بار و قابلیت بهینه‌سازی را فراهم می‌کند. برای اولین بار در پروژه «چشم‌انداز شبکه‌های انرژی آینده»^۱ در دانشگاه ETH مفهومی بنام هاب انرژی به‌عنوان مدلی برای مطالعه یکپارچه این زیرساخت‌های مطرح شد که افق زمانی پیشرو تا اجرایی شدن این پروژه در شکل ۱ مشخص شده است. هاب انرژی واحد متمرکزی است که توانایی تبدیل و ذخیره‌سازی اشکال مختلف انرژی را دارد [۱]. این واحد رابطی بین زیرساخت‌های مختلف انرژی است که از یک سو انرژی را از شبکه بالادست دریافت می‌کند و از سوی دیگر با مصرف‌کنندگان انرژی در ارتباط است [۲].

مفهوم کلی هاب انرژی برای مدل‌سازی انواع سامانه‌ها از خودروی هیبریدی تا نواحی جغرافیایی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد [۳، ۴]. در هاب انرژی این سؤال اساسی مطرح است که حامل‌های انرژی به چه میزانی خریداری، تبدیل و ذخیره‌سازی شوند تا در نهایت تقاضای بار مصرف‌کنندگان متصل به آن تأمین شود [۱]. این سؤال مسئله بهره‌برداری است که وجود ذخیره‌سازها این مسئله را در بعد زمانی منعطف کرده است [۵]. در مقاله [۶] هاب انرژی خانگی با در نظر گرفتن ذخیره‌سازهای خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر برنامه‌ریزی شده است. در مسئله بهره‌برداری، بهینه‌سازی می‌تواند بر اساس معیارهای متفاوتی همچون اقتصادی، زیست‌محیطی و افزایش قابلیت اطمینان انجام شود [۹-۷].



شکل ۱: افق زمانی اجرایی شدن پروژه VOFEN [۱]

مدل‌سازی ریاضی هاب انرژی، تعیین آرایش بهینه اجزا و مسئله بهره‌برداری این سامانه از جمله مسائلی بوده است که در سال‌های اخیر توجه محققین را به خود معطوف داشته است [۱]. رایج‌ترین روش حل مسئله بهره‌برداری هاب انرژی به این صورت

است. حداقل و حداکثر ظرفیت این ذخیره‌سازها نیز با معادله (۴) محدود می‌شود.

$$P_s^{e,h}(t) = P_s^{e,h}(t-1) + \eta P_{e,h}^b(t) - P_{e,h}^{loss}(t) \quad (1)$$

$$\eta_{e,h} = \begin{cases} \eta_{e,h}^{ch} & \text{if } P_{e,h}^b(t) > 0 \\ 1/\eta_{e,h}^{dis} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{e,h}^{loss}(t) = \alpha_{e,h}^{loss} P_s^{e,h} \quad (3)$$

$$\alpha_{e,h}^{min} P_{e,h}^M \leq P_s^{e,h}(t) \leq \alpha_{e,h}^{max} P_{e,h}^M \quad (4)$$

که در این روابط $P_{e,h}^{loss}(t)$ ، $P_{e,h}^b(t)$ ، $P_s^{e,h}(t)$ ، $\eta_{e,h}^{ch}$ و $\eta_{e,h}^{dis}$ به ترتیب انرژی ذخیره‌شده، انرژی شارژ و دشارژ، تلفات، ضرایب شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد.

۲-۲- بارهای الکتریکی

در این پژوهش، دو نوع بار الکتریکی در نظر می‌گیریم (رابطه ۵).
 ۱. بارهای قطعی $de^{cri}(t)$ که باید در زمان مشخص تأمین شوند،
 ۲. بارهای کنترل‌پذیر شامل تقاضای بار الکتریکی است که در بازه زمانی مشخصی می‌توان آن را به تعویق انداخت. این بازه زمانی بازه بهره‌برداری این بارها نامیده می‌شود که توسط مصرف‌کننده تعیین می‌شود. برای نشان دادن بارهای کنترل‌پذیر متغیر $dr(t)$ استفاده می‌شود که مقدار آن برابر مجموع بارهای کنترل‌پذیری که انتقال داده می‌شود و هنوز تأمین نشده‌اند (رابطه ۵). اگر تا گام زمانی t همه بارهای کنترل‌پذیر تأمین شده باشد و هیچ باری انتقال داده نشده باشد، مقدار متغیر بارهای کنترل‌پذیر $dr(t)$ برابر صفر خواهد بود. مقدار بار کنترل‌پذیر $de^{cul}(t)$ در هر گام زمانی به صورت ضریبی β از تقاضای بار الکتریکی در هر مرحله زمان $de(t)$ در نظر گرفته می‌شود (روابط ۶ و ۷). رابطه (۸) مقدار بارهای قطعی را نشان می‌دهد.

$$dr(t+1) = dr(t) - P_e(t) + de(t) \quad (5)$$

$$de^{cul}(t) = \beta de(t) \quad (6)$$

$$dr(t) - dr(t-1) \leq \beta de(t) \quad (7)$$

$$de^{cri}(t) = (1 - \beta) de(t) \quad (8)$$

$de(t)$ تقاضای بار الکتریکی مصرف‌کنندگان در هر گام زمانی که مجموع بارهای قطعی و کنترل‌پذیر در سامانه است. مقدار انرژی خالصی که جهت تأمین بار مصرف‌کنندگان به خروجی هاب فرستاده می‌شود

۲-۳- تعادل الکتریکی و گرمایی

روابط (۹-۱۰) به ترتیب تعادل انرژی الکتریکی و حرارتی را در خروجی هاب نمایش می‌دهند. رابطه (۱۱) نیز تأمین تقاضای گاز طبیعی هاب را نشان می‌دهد.

$$P_e(t) = A^{Net} \eta_{ee}^T P_e^{Net}(t) + A^{CHP} \eta_{ge}^{CHP} P_g^{NetCHP}(t) - P_e^b(t) \quad (9)$$

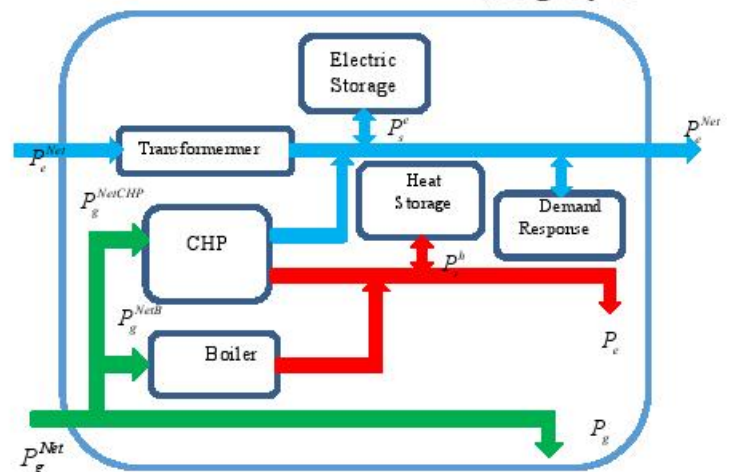
$$P_h(t) = \eta_{gh}^B P_g^{NetTB}(t) + A^{CHP} \eta_{gh}^{CHP} P_g^{NetCHP}(t) - P_h^b(t) \quad (10)$$

بهیئگی اقتصادی با ملاحظه نمودن محدودیت‌های سیستم حداقل می‌شود. نقاط کار سیستم برای ورودی‌های سامانه، مبدل‌ها و ذخیره‌سازها تعیین می‌شود. با استفاده از این رویکرد کنترلی از ذخیره‌سازهای الکتریکی و بارهای کنترل‌پذیر برای جبران خطای پیش‌بینی بارهای الکتریکی استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از روش کنترل پیش‌بین برنامهریزی را می‌توان به تغییرات قیمت انرژی و پروفایل بار تطبیق داد.

چارچوب مقاله به این صورت است که در بخش دوم مدل‌سازی هاب انرژی ارائه می‌شود. در بخش سوم طراحی کنترلی ارائه‌کننده پیشنهادی توضیح داده می‌شود. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی برای مدل معرفی شده در بخش دوم ارائه می‌شود. بخش پایانی مقاله نیز به جمع‌بندی و ارائه نتایج می‌پردازد.

۲- مدل‌سازی هاب

در این بخش مدل‌سازی هاب انرژی معرفی می‌شود. هاب انرژی در نظر گرفته شده در این مقاله شامل ترانسفورماتور، بویلر، CHP و ذخیره‌سازهای حرارتی و الکتریکی است (شکل شماره ۲). در بخش اول دینامیک‌های سیستم ذخیره‌سازهای الکتریکی و گرمایی و بارهای الکتریکی کنترل‌پذیر فرموله می‌شود. در بخش دوم معادلات تعادل انرژی و محدودیت‌ها بیان می‌شود. سرانجام مدل کلی به صورت مدل فضای حالت بازنویسی می‌شود. مفهوم مدل هاب انرژی بر اساس مرجع [۱۶] بیان می‌شود که در آن اطلاعات بیشتری در مورد جزئیات مدل‌سازی می‌توان یافت.



شکل ۲: نمونه‌ای از یک هاب انرژی

۲-۱- ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی

ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی را می‌توان با در نظر گرفتن تلفات و محدودیت‌ها با دقت مدل‌سازی کرد. مدل‌سازی گسسته این ذخیره‌سازها به صورت رابطه (۱) و (۲) بیان شده است. بالانویس e و h به ترتیب مربوط به الکتریکی و حرارتی است. تلفات ذخیره‌ساز نیز با رابطه (۳) بیان می‌شود که در این رابطه $\alpha_{e,h}^{loss}$ ضریب تلفات ذخیره‌ساز

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

۳- طراحی کنترل کننده

۳-۱- کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

در این بخش مسئله کنترل پیش بین به گونه ای فرمول بندی می شود که برای محاسبه دنباله سیگنال کنترل تابع هزینه بهره برداری هاب انرژی با در نظر گرفتن دینامیک سیستم و محدودیت ها حداقل شود [۲۳]. تابع هدف به گونه ای تعریف می شود که مجموع دوهدف کنترلی ردیابی و جریمه سیگنال های کنترل است. (۱) مجموع مربعات انحراف بین خروجی های پیش بینی شده و نقاط مرجع آن ها در طول افق پیش بینی که در این مسئله حداقل نگه داشتن انرژی ذخیره شده و متغیر بارهای کنترل پذیر مدنظر است، (۲) مجموع مربعات دنباله کنترل در طول افق کنترل که هدف حداقل کردن هزینه خریداری حامل های انرژی از شبکه را دنبال می کند. تابع هزینه J به صورت زیر تعریف می شود [۲۴].

$$J = (R_s - Y)^T Q (R_s - Y) + U^T R U \quad (26)$$

Q و R ماتریس وزن دوهدف کنترلی تابع هزینه است که به صورت ماتریس قطری برای تنظیم عملکرد حلقه بسته سیستم تعریف می شود. این دو ماتریس وزن متناسب باقیمت بازار مقاردهی و به روز می شوند. R_s و Y به ترتیب بردار سیگنال مرجع و بردار پیش بینی خروجی است. خروجی با استفاده از مدل فضای حالت با رابطه ۲۷ پیش بینی می شود.

$$Y = \Gamma x(t) + \Phi U + \Omega D \quad (27)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB_u & 0 & \dots & 0 \\ CAB_u & CB_u & \dots & 0 \\ CA^2 B_u & CA B_u & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ CA^{N_p-1} B_u & CA^{N_p-2} B_u & \dots & CA^{N_p-N_c} B_u \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} CB_d & 0 & \dots & 0 \\ CAB_d & CB_d & \dots & 0 \\ CA^2 B_d & CA B_d & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ CA^{N_p-1} B_d & CA^{N_p-2} B_d & \dots & CB_d \end{bmatrix} \quad (30)$$

همان طور که بیان شد تابع هزینه جهت برآورده کردن دوهدف ردیابی و جریمه سیگنال کنترل تعریف می شود. هدف اول حداقل نگه داشتن انرژی ذخیره شده ذخیره ساز و حداقل نگه داشتن مقدار بار کنترل پذیر است. بارهای کنترل پذیر بارهایی هستند که در طی ساعات انتقال داده می شوند تا در زمان مناسب تأمین شوند که برای به تعویق افتادن این بارها به

$$P_g(t) = P_g^{Net}(t) - P_g^{NetCHP}(t) - P_g^{NetB}(t) \quad (11)$$

که در این روابط η_{gh}^{CHP} و A^{CHP} η_{ee}^{Net} A^{Net} به ترتیب ضریب دسترسی پذیری به شبکه برق، ضریب بهره ترانسفورماتور، ضریب دسترسی پذیری و ضریب بهره تبدیل گاز به الکتریسیته CHP است. همچنین $P_g^{Net}(t)$ و $P_g^{NetCHP}(t)$ به ترتیب مقدار انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه و میزان گاز ورودی CHP است که هر دو ورودی هاب محسوب می شوند. $P_g(t)$ و $P_g^{Net}(t)$ نیز مقدار تقاضای گاز خروجی هاب و میزان گاز طبیعی خریداری شده از شبکه هستند.

۳-۲- محدودیت شبکه

روابط (۱۲-۱۳) محدودیت میزان گاز طبیعی و الکتریسیته خریداری شده از شبکه را مشخص می کنند.

$$P_g^{Netmin}(t) \leq P_g^{Net}(t) \leq P_g^{Netmax}(t) \quad (12)$$

$$P_g^{Netmin}(t) \leq P_g^{Net}(t) \leq P_g^{Netmax}(t) \quad (13)$$

۳-۲-۲ محدودیت های مبدل ها

روابط (۱۴-۱۶) محدودیت ورودی مبدل ها را مشخص می کنند.

$$\eta_{ee}^T P_e^{Net}(t) \leq P^T \quad (14)$$

$$\eta_{ge}^{CHP} P_e^{NetCHP}(t) \leq P^{CHP} \quad (15)$$

$$\eta_{gh}^{CHP} P_g^{NetB}(t) \leq P^B \quad (16)$$

۴-۲- مدل سازی فضای حالت

در این بخش مدل سازی هاب انرژی به صورت مدل فضای حالت بازنویسی می شود. $x(t)$ ، $u(t)$ و $d(t)$ به ترتیب بردارهای حالت، ورودی، اغتشاش شناخته شده سامانه هستند. $w(t)$ اغتشاش ناشناخته سیستم است که برای مدل سازی عدم قطعیت ناشی از خطای پیش بینی بار الکتریکی در نظر گرفته شده است. تنها اطلاعات در دسترس آن درصد تغییرات دامنه است. A ، B_u ، B_d ، B_w ، C ماتریس های سیستم هستند. $y(t)$ بردار خروجی سیستم که شامل انرژی ذخیره سازهای الکتریکی و حرارتی و بارهای کنترل پذیر است.

$$x(t+1) = Ax(t) + B_u u(t) + B_d d(t) + B_w w(t) \quad (17)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (18)$$

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} P_s^e(t+1) \\ P_s^h(t+1) \\ dr(t+1) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} P_e^{Net}(t) \\ P_e(t) \\ P_g^{NetCHP}(t) \\ P_g^{NetB}(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$d(t) = \begin{bmatrix} de(t) \\ P_h(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$A = \begin{bmatrix} (1 - \alpha_h^{loss}) & 0 & 0 \\ 0 & (1 - \alpha_h^{loss}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$x_{k+1} = Ax_k + B_u u_k + B_w w_k \quad (35)$$

$$y_k = Cx_k \quad (36)$$

$$x_k \in \mathbf{X}, \quad \mathbf{X} = \{x: E_x x \leq f_x\} \quad (37)$$

$$u_k \in \mathbf{U}, \quad \mathbf{U} = \{u: E_u u \leq f_u\} \quad (38)$$

$$w_k \in \mathbf{W} \quad (39)$$

که $w_k \in \mathcal{R}^r$ و $u_k \in \mathcal{R}^n$ ، $y_k \in \mathcal{R}^p$ ، $x_k \in \mathcal{R}^n$ حالت، خروجی، ورودی کنترل، اغتشاش ناشناخته سیستم هستند. A ، B_w ، B_u ماتریس‌های سیستم هستند. بردار متغیرهای حالت و ورودی سیستم با رابطه (۳۷-۳۹) محدود شده‌اند که \mathbf{X} و \mathbf{U} مجموعه محدود چندوجهی فرض می‌شود. در بسیاری از موارد مهندسان کنترل دانش اولیه نسبت به اغتشاش ندارند، فقط مجموعه‌ای از اغتشاشات ممکن را می‌دانند. \mathbf{W} مجموعه‌ای از اغتشاشات ممکن است. در این صورت قانون کنترلی مطلوب است که برای هر اغتشاش احتمالی عملکرد قابل قبولی را در پی داشته باشد. در مرجع [۲۵] روش کنترل پیش‌بین مقاوم ارائه شده است که پایداری و عملکرد سیستم را در مقابل اغتشاش اضافه‌شونده به سیستم حفظ می‌کند. مسئله به صورت مسئله بهینه‌سازی محدبی تحت ماتریس‌های نابرابری خطی فرموله می‌شود. تابع هزینه به صورت مسئله بهینه‌سازی MIN-MAX تعریف می‌شود.

$$\min_u \max_w \sum_{j=0}^{N_p-1} y_{k+j|k}^T Q y_{k+j|k} \quad (40)$$

$$+ u_{k+j|k}^T R u_{k+j|k}$$

subject to $u_{k+j|k} \in \mathbf{U} \quad \forall \omega \in \mathbf{W}$

$$x_{k+j|k} \in \mathbf{X} \quad \forall \omega \in \mathbf{W}$$

$$\omega_{k+j|k} \in \mathbf{W}$$

برای نمادگذاری مناسب بردارهای خروجی Y ، حالت X و ورودی‌های پیش‌بینی‌شده U و اغتشاشات ناشناخته W تعریف می‌شود.

با توجه به رابطه (۳۹) مجموعه اغتشاشات آینده به صورت رابطه (۴۱) است:

$$W \in \mathbf{W}^N = \mathbf{W} \times \mathbf{W} \times \dots \times \mathbf{W} \quad (41)$$

رابطه پیش‌بینی به صورت رابطه (۴۲) است.

$$Y = CX \quad (42)$$

$$X = Ax_{k|k} + B_u U + B_w W$$

از آنجایی که محدودیت‌ها به صورت نامساوی خطی است، به صورت رابطه (۴۳) بازنویسی می‌شود.

$$U \in \mathbf{U}^N = \{U: E_u U \leq F_u\} \quad (43)$$

$$X \in \mathbf{X}^N = \{X: E_x X \leq F_x\}$$

مسئله بهینه‌سازی MINMAX با استفاده از بردارهای تعریف‌شده، به صورت رابطه (۴۴) بازنویسی می‌شود.

$$\min_U \max_W Y^T Q Y + U^T R U \quad (44)$$

$$\text{subject to } U \in \mathbf{U}^N \quad \forall W \in \mathbf{W}^N$$

$$X \in \mathbf{X}^N \quad \forall W \in \mathbf{W}^N$$

مصرف‌کننده هزینه‌ای پرداخت می‌شود. پس این خروجی باید با وزن متناسب با همان مقدار هزینه جریمه شود. هدف دوم جریمه کردن سیگنال کنترل ورودی است. بردار ورودی شامل انرژی‌های خریداری شبکه که شامل گاز طبیعی و الکتریسیته است. پس وزن این سیگنال‌ها باید متناسب با قیمت این انرژی‌ها در بازار باشد. قیمت گاز طبیعی معمولاً مقدار ثابتی در بازار دارد. اما قیمت برق در طی ساعات روز متغیر است و دارای پروفایل مشخصی است که توسط بازار بالادست تعیین می‌شود. این پروفایل هر ساعت از روز توسط بازار برای ۲۴ ساعت آینده تعیین می‌شود تا بهره‌برداران بر اساس آن برای خرید خود تصمیم بگیرند. پس وزن‌های مربوط به سیگنال برق خریداری شده از شبکه در طول افق زمانی متغیر است. برای عملکرد درست سامانه این تابع وزن باید در هر ساعت که قیمت بازار تعیین می‌شود با آن تغییر کند. ماتریس‌های وزن، ماتریس‌های قطری هستند که به صورت روابط ۳۱ و ۳۲ تعریف می‌شوند.

$$Q = \bigoplus_{j=1}^{N_p} Q = \begin{pmatrix} Q & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & Q \end{pmatrix}, Q \in \mathcal{R}^{N_p n \times N_p n} \quad (31)$$

$$R = \bigoplus_{j=1}^{N_p} R = \begin{pmatrix} R & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & R \end{pmatrix}, R \in \mathcal{R}^{N_p m \times N_p m} \quad (32)$$

در مقالات معمولاً این ماتریس‌های وزن به صورت سعی و خطا انتخاب می‌شوند تا در خروجی پاسخ مناسب مشاهده شود. اما در این پژوهش برای عملکرد صحیح باید راه‌حل دیگری برای انتخاب آن به کار گرفته شود. در مراجع [۲۳، ۲۴] ایده‌نمایی تعریف کردن تابع هزینه به صورت روابط ۳۳ و ۳۴ مطرح شده است.

$$Q = \alpha^{N_p-j} \quad (33)$$

$$R = \beta^{N_p-j} \quad (34)$$

در این روابط α شاخص زمان است یعنی با انتخاب مقدار مناسب α و β می‌توان وزن گام‌ها در طول افق زمانی را متغیر تعریف کرد مثلاً با انتخاب $\alpha > 1$ گام‌های زمانی اول اهمیت بیشتری داشته باشند. در این پژوهش نیز از همین ایده استفاده می‌شود. ماتریس وزن را تمایزی تعریف کرده و توان آن قیمت‌های اعلام‌شده از بازار انتخاب می‌شود. بدین ترتیب هرچه قیمت بازار در آن ساعت بالاتر وزن آن در تابع هزینه بیشتر می‌شود. در نتیجه برنامه‌ریزی سامانه هاب همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد به درستی انجام می‌شود.

۲-۲- کنترل پیش‌بین مقاوم

سیستم خطی زمان گسسته زیر را در نظر بگیرید.

پس از حل مسئله بهینه‌سازی محدب، دنباله سیگنال کنترل U محاسبه می‌شود که طبق تکنیک افق کاهنده فقط اولین ترم این سیگنال به سیستم اعمال می‌شود.

۳-۳- طراحی کنترل کننده نهایی

همان‌طور که در بخش مدل سازی فضای حالت سیستم بیان شد، این مدل سازی دارای دو ترم اغتشاش شناخته شده $d(t)$ و اغتشاش ناشناخته $w(t)$ است. ترم اغتشاش شناخته شده $d(t)$ دارای پروفایل کاملاً مشخصی در آینده است در حالی که برای اغتشاش ناشناخته $w(t)$ اطلاعات اولیه به جز رنج تغییرات در دسترس نیست. وجود ترم اغتشاش $d(t)$ منجر به این می‌شود که دیگر نتوان از روش کنترلی ارائه شده در بخش ۳-۲ استفاده کرد. بنابراین برای رفع این مشکل از یک کنترل کننده پیش بین کمکی استفاده می‌شود. شکل ۳ نمای کلی کنترل کننده را نمایش می‌دهد. مدل کلی سامانه به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$(x_s + \Delta x)(k+1) = A(x_s + \Delta x)(k) + B_u(u_s + \Delta u)(k) + B_d(d_s + \Delta d)(k) \quad (50)$$

زیرنویس s نقطه کار مطلوب سامانه را نشان می‌دهد. Δ تغییرات سامانه نسبت به نقطه کار مطلوب را نشان می‌دهد. برای این که بتوان از روش پیش بین مقاوم استفاده کرد، مدل سامانه را به دو بخش تجزیه می‌کنیم. Δd در حقیقت همان ترم اغتشاش ناشناخته $w(k)$ در ماتریس فضای حالت سامانه است. دامنه تغییرات آن به صورت درصدی α از اغتشاش شناخته شده $d(k)$ در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۵۱). کنترل کننده MPC برای جبران ترم اغتشاش $d(t)$ طراحی می‌شود. در حالی که تغییرات سیگنال کنترلی برای جبران ترم اغتشاش $w(t)$ نیز با کنترل کننده RMPC محاسبه می‌شود.

$$-ad(k) \leq w(k) \leq +ad(k) \quad (51)$$

این دو کنترل کننده با به اشتراک گذاشتن اطلاعات مربوط به دامنه اغتشاشات و درصد عدم قطعیت به صورت موازی با یکدیگر کار می‌کنند و مجموع سیگنال کنترل این دو کنترل کننده سامانه را مدیریت می‌کند.

۴- شبیه سازی

کنترل کننده طراحی شده برای کنترل سامانه هاب انرژی توصیف شده در شکل ۲ به کار برده می‌شود. در بخش اول شبیه سازی عملکرد روش کنترل پیش بین برای حالت بدون عدم قطعیت بررسی می‌شود. در بخش دوم، عملکرد کنترل کننده پیشنهادی برای حالت با میزان عدم قطعیت مشخص بررسی و با کنترل کننده پیش بین معمولی مقایسه می‌شود. برای حل مسئله از QP solver در جعبه ابزار بهینه سازی متلب و جعبه ابزار YALMIP استفاده می‌شود.

در هاب انرژی، پروفایل تقاضای بار و قیمت پیش بینی شده است. شکل های ۴ و ۵ پروفایل های ۲۴ ساعته بار و قیمت را نمایش می‌دهد [۲۳]. فرض بر این است که پیش بینی بار گرمایی و قیمت بازار دقیق

$$W \in \mathbb{W}^N$$

برای حل مسئله MINMAX با یک تقریب محافظه کارانه حد بالای t برای تابع هدف تعریف می‌شود (رابطه ۴۵).

$$\min_{U,t} t \quad (45)$$

$$\text{subject to } Y^T Q Y + U^T R U \leq t \quad \forall W \in \mathbb{W}^N$$

$$U \in \mathbb{U}^N \quad \forall W \in \mathbb{W}^N$$

$$X \in \mathbb{X}^N \quad \forall W \in \mathbb{W}^N$$

برای استفاده از قضیه نامساوی نابرابری خطی مقاوم برای عدم قطعیت های تکراری، متغیر τ و ماتریس های مرتبط با آن به صورت رابطه (۴۶) تعریف می‌شود. متغیر τ به صورت بردار حقیقی مثبت با N_p المان تعریف می‌شود. ماتریس \mathcal{S} و T نیز با استفاده از المان های بردار τ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau = \mathbb{R}_+^{N_p} \quad (46)$$

$$\mathcal{S} = \bigoplus_{i=1}^{N_p} \tau_i = \begin{pmatrix} \tau_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \tau_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \tau_{N_p} \end{pmatrix}, \mathcal{S} \in \mathbb{R}^{N_p \times N_p}$$

$$T = \bigoplus_{i=1}^{N_p} \tau_i I^{r \times r} = \begin{pmatrix} \tau_1 I^{r \times r} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \tau_2 I^{r \times r} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \tau_{N_p} I^{r \times r} \end{pmatrix}, T \in \mathbb{R}^{N_p r \times N_p r}$$

محدودیت ورودی کنترلی $E_u u_{k+j|k} \leq f_u$ تحت تأثیر اغتشاشات نیست و نیازی به مقاوم سازی ندارد. اما همان‌طور که بیان شد حالت های پیش بینی به اغتشاشات آینده بستگی دارد. برای این که محدودیت به صورت مقاوم ارضا شود رابطه (۴۷) باید برقرار باشد.

$$E_x(Ax_{k|k} + B_u U) + E_x B_w W \leq F_x \quad \forall W \in \mathbb{W} \quad (47)$$

در این بخش باید ترم عدم قطعیت را در هر سطر $E_x B_w W$ باید بیشینه کنیم. بردار جدیدی بنام γ به صورت رابطه (۴۸) تعریف می‌شود:

$$(E_x B_w W)_i = \omega_i^T W = \sum_{j=1}^N \omega_{ij}^T \omega_{k+j-1|k} \quad (48)$$

$$\gamma_i = \max_{W \in \mathbb{W}^N} \omega_i^T W = \max_{\omega \in \mathbb{W}} \sum_{j=1}^N \omega_{ij}^T \omega_{k+j-1|k}$$

بدین ترتیب اثبات می‌شود که این مسئله را می‌توان به صورت مسئله بهینه سازی تحت ماتریس های نابرابری خطی زیر تبدیل کرد [۲۳]:

$$\min_{U,t,\tau} t \quad (49)$$

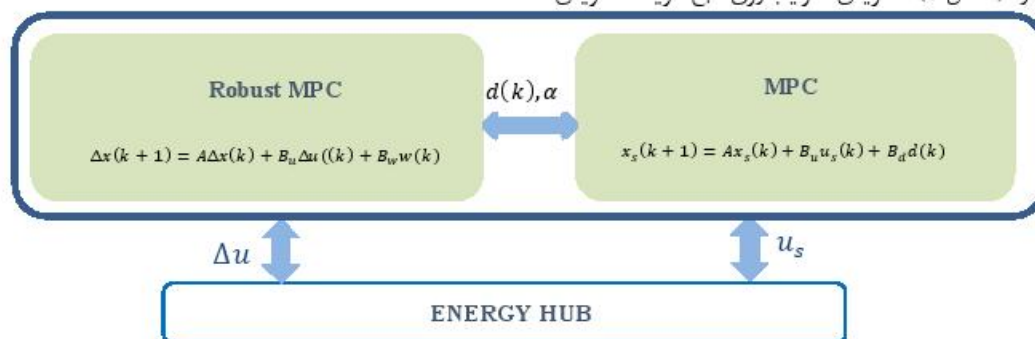
$$\text{subject to } \begin{pmatrix} t - \sum_{i=1}^N \tau_i & (C(Ax_{e|k} + B_u U))^T & U^T & 0 \\ C(Ax_{e|k} + B_u U) & Q^{-1} & 0 & C B_w \\ 0 & U & \mathcal{R}^{-1} & 0 \\ 0 & (C B_w)^T & 0 & T \end{pmatrix} \geq 0$$

$$E_u U \leq F_u$$

$$E_x(Ax_{k|k} + B_u U) + \gamma \leq F_x$$

قطری هستند که درایه‌های قطر اصلی آن تابع‌نمایی از قیمت بازار است. ضرایب و پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ برحسب پریونیت بیان شده است.

است. ولی در واقعیت این پیش‌بینی‌ها دارای خطای کمی هستند که با استفاده از رویکرد کنترل پیش‌بین این خطاها در هر گام تصحیح می‌شود. قیمت برق در طول شبانه‌روز متغیر است درحالی‌که قیمت گاز ثابت فرض می‌شود (شکل ۳). ماتریس ضرایب وزن تابع هزینه، ماتریس



شکل ۳: نمای کلی کنترل‌کننده

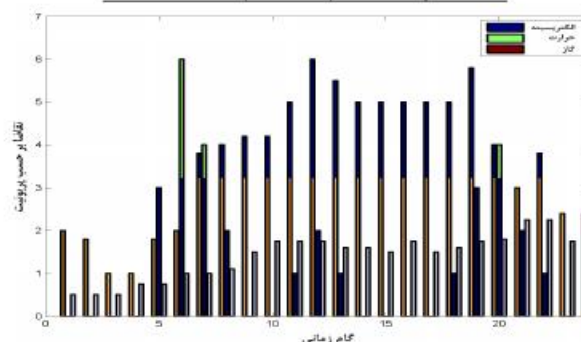
۴-۱- عملکرد MPC برای حالت بدون عدم قطعیت

عملکرد کلی رویکرد پیشنهادی را بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در این بخش بررسی می‌کنیم. برنامه‌ریزی بهره‌برداری برای یک دوره ۳۰ ساعته انجام می‌شود. طبق تکنیک افق کاهنده در کنترل پیش‌بین باوجود این‌که در هر گام زمانی با حل مسئله بهینه‌سازی دنباله کنترل بهینه برای کل افق پیش‌بینی محاسبه می‌شود، ولی تنها اولین متغیر کنترلی به سیستم اعمال می‌شود. بهینه‌سازی برای گام زمانی بعد طبق اندازه‌گیری‌های به‌روز شده، تکرار می‌شود. ماتریس وزن تابع هزینه توابع‌نمایی از قیمت بازار هستند. به همین دلیل برنامه‌ریزی نسبت به قیمت بازار بسیار حساس است. تابع هزینه کلی هزینه خریداری حامل‌های انرژی، هزینه برنامه پاسخگویی بار و هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره‌سازها را شامل می‌شود.

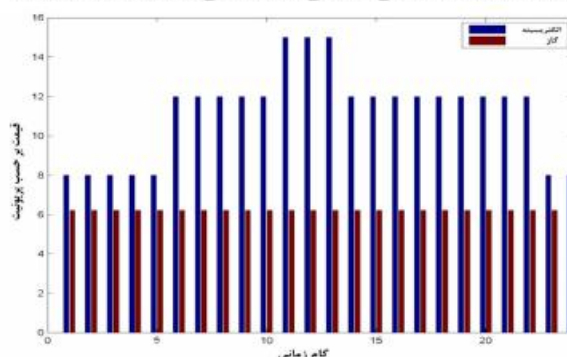
شکل ۶ روند تغییرات سیگنال‌های کنترل و متغیرهای حالت را در طی دوره بهره‌برداری نمایش می‌دهد. در حالتی که عدم قطعیتی در سیستم وجود ندارد عملاً کنترل‌کننده MPC به‌تنهایی هاب انرژی را مدیریت می‌کند. ذخیره‌ساز الکتریکی در ۵ ساعت اول به‌طور کامل شارژ می‌شود زیرا قیمت الکتریسیته در طی این ساعات کم‌ترین سطح خود را در طول روز دارد. به دلیل تلفات این ذخیره‌ساز در ساعت ۵ به‌طور کامل شارژ می‌شود. روند تغییرات برق خریداری شده از شبکه به‌شدت متأثر از دو عامل پروفایل بار الکتریکی و قیمت است. در ساعاتی که سامانه با اوج قیمت برق در شبکه مثلاً ساعات ۱۱ تا ۱۳ روبرو می‌شود، هاب بخش عمده بار الکتریکی خود را از طریق CHP و انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌سازها تأمین می‌کند. همچنین در ساعاتی که به‌طور همزمان بار حرارتی و الکتریکی در سامانه وجود دارد، این بارها از طریق CHP تأمین می‌شود. بویلر فقط در طی ساعات ۵ تا ۷ کار می‌کند. این ساعات اوج تقاضای بار حرارتی در طول روز است که CHP به دلیل پایین بودن ضریب بهره، توانایی تأمین این سطح از تقاضا را ندارد. به‌کارگیری ذخیره‌ساز حرارتی موجب شده است که هاب بتواند در ساعاتی که بار حرارتی وجود ندارد بارهای الکتریکی خود را از طریق

جدول ۱: ضرایب و پارامترهای شبیه‌سازی (واحد بر حسب پریونیت)

$\alpha_{e,h}^{loss}$	۰/۰۲	A^{CHP}	۰/۹۶
η_{ev}^T	۰/۹۸	A^{res}	۰/۹۹
$\eta_{e,h}^{ch}$	۰/۹	P_e^M	۳
$\eta_{e,h}^{div}$	۰/۹	P_h^M	۲
N_p	۲۴	P^T	۸
β	۰/۰۸	P^{CHP}	۸
η_{ge}^{CHP}	۰/۴	P^B	۸
η_{gh}^{CHP}	۰/۲۵	$\alpha_{e,h}^{min}$	۰/۰۵
η_{gh}^B	۰/۸۵	$\alpha_{e,h}^{max}$	۰/۹



شکل ۴: پروفایل بار الکتریکی، حرارتی و گاز طبیعی هاب به مدت ۲۴ ساعت



شکل ۵: پروفایل قیمت انرژی الکتریکی و گاز به مدت ۲۴ ساعت

۴-۲- عملکرد RMPC با در نظر گرفتن بارهای الکتریکی با خطای پیش‌بینی $\pm 5\%$ درصد

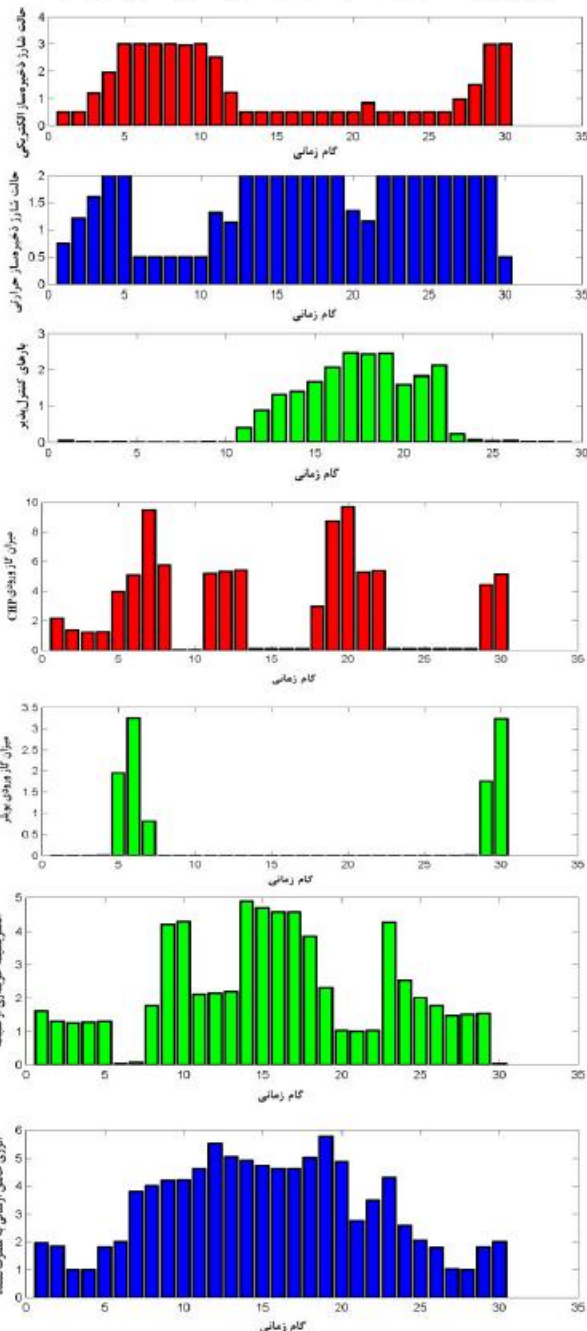
در صورتی که با وجود خطای پیش‌بینی بارهای الکتریکی برنامه‌ریزی را فقط با کنترل‌کننده MPC انجام دهیم، به دلیل وجود تصحیح خطای هر گام این روش تا خطای $\pm 3\%$ درصد برنامه‌ریزی درستی را برای سامانه انجام می‌شود. اما خطای پیش‌بینی بیش از این مقدار کنترل‌کننده را دچار ضعف می‌کند. در این بخش برنامه‌ریزی بهره‌برداری سامانه هاب انرژی را با در نظر گرفتن بارهای الکتریکی با خطای پیش‌بینی $\pm 5\%$ درصد با دو روش کنترل پیش‌بینی معمولی و مقاوم را با هم مقایسه می‌کنیم.

جدول ۲ برای بررسی برنامه‌ریزی دقیق‌تر سامانه توسط RMPC نسبت به MPC نشان داده شده است. $d_e^{mi}(t)$ مقدار بارهای کنترل‌پذیر که 0.108 درصد تقاضای الکتریکی در هر گام زمانی است (رابطه ۶) $d_e^{mi}(t)$ نیز میزان بارهای قطعی در هر گام که 0.92 درصد تقاضای الکتریکی که در هر گام است (رابطه ۸). $P_e(t)$ مقدار انرژی خالص ارسالی به مصرف‌کننده در هر گام زمانی است که برای برنامه‌ریزی صحیح باید از میزان بارهای قطعی در هر گام بیش‌تر باشد. $dr(t)$ نیز مجموع بارهای کنترل‌پذیر در گام‌های زمانی است (رابطه ۵). در شبیه‌سازی‌ها عدم قطعیت $\pm 5\%$ درصد در نظر گرفته شده است که موجب می‌شود MPC در برنامه‌ریزی دچار خطا شود. مقدار منفی متغیر $dr(t)$ در ساعاتی مانند ۴ تا ۱۱ نشان‌دهنده این است که مقدار انرژی ارسالی بیش‌تر از تقاضا بوده است. در ساعاتی که مانند ساعت ۱۳ مقدار این از مقدار 0.431 به $1/301$ افزایش می‌یابد که تغییر آن از میزان بارهای کنترل‌پذیر آن ساعت که 0.44 بیش‌تر است. این مسئله نشان‌دهنده این است که بخشی از بارهای قطعی سامانه در این ساعات تأمین نشده است. البته باید ذکر کرد که خطای کنترل‌کننده در تصمیم‌گیری در هر ساعت، در تصمیم‌گیری ساعات بعد نیز به دلیل دینامیک بارهای کنترل‌پذیر تأثیر می‌گذارد و آن‌ها را نیز دچار خطا می‌کند. در حالی که RMPC این عیب‌های کنترل‌کننده MPC را جبران می‌کند. مقدار متغیر $dr(t)$ در هیچ ساعتی منفی نیست و از مقدار بارهای کنترل‌پذیر تجاوز نمی‌کند. در نتیجه RMPC برنامه‌ریزی دقیق‌تری نسبت به MPC انجام می‌دهد.

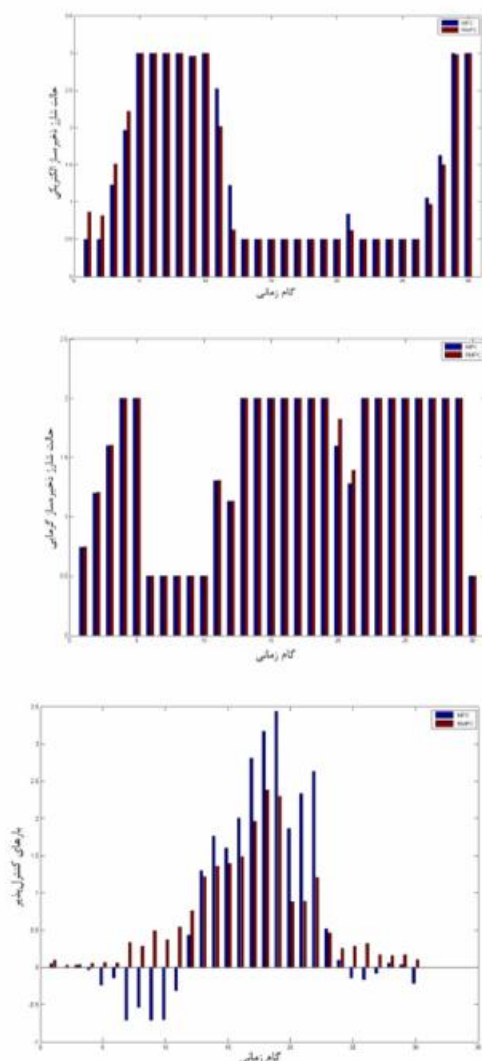
شکل ۷ روند تغییرات سیگنال‌های کنترل و متغیرهای حالت را در طی دوره بهره‌برداری نمایش می‌دهد. تفاوت عمده برنامه‌ریزی کنترل‌کننده MPC و RMPC در سیگنال‌های کنترلی برق خریداری‌شده از شبکه و مقدار انرژی خالص فرستاده‌شده و مقدار بارهای کنترل‌پذیر است. در برنامه‌ریزی که کنترل‌کننده RMPC انجام می‌دهد در ساعت اول انرژی بیش‌تری از شبکه خریداری و در ذخیره‌ساز الکتریکی ذخیره می‌شود تا در صورتی که بروز خطای پیش‌بینی این انرژی مصرف شود. با به‌کارگیری RMPC نسبت به حالت MPC انرژی الکتریکی خریداری و همچنین سیگنال کنترلی انرژی خالصی

CHP تأمین کند. مقدار حرارتی که به صورت همزمان تولید می‌شود، در این ذخیره‌سازهای حرارتی ذخیره می‌شود تا در زمان تقاضای بار مصرف شود.

روند تغییرات بارهای کنترل‌پذیر dr را در نظر بگیرید از ساعت ۱۱ که اوج قیمت برق در طول شبانه‌روز است هاب بارهای کنترل‌پذیر را انتقال می‌دهد تا در ساعت ارزان‌تر این بار را تأمین کند. در تنظیمات شبیه‌سازی بارهای کنترل‌پذیر هر ساعت می‌تواند تا ۶ ساعت به تأخیر بیفتد. به‌طور کلی بارهای کنترل‌پذیر پس از به تأخیر افتادن تا ساعت ۲۳ و ۲۴ که پایین‌ترین سطح قیمت را دارد، به‌طور کامل تأمین می‌شوند.



شکل ۶: سیگنال‌های کنترل و متغیرهای حالت MPC در حالت بدون عدم قطعیت (واحد محور عمودی بر حسب پریونیت)

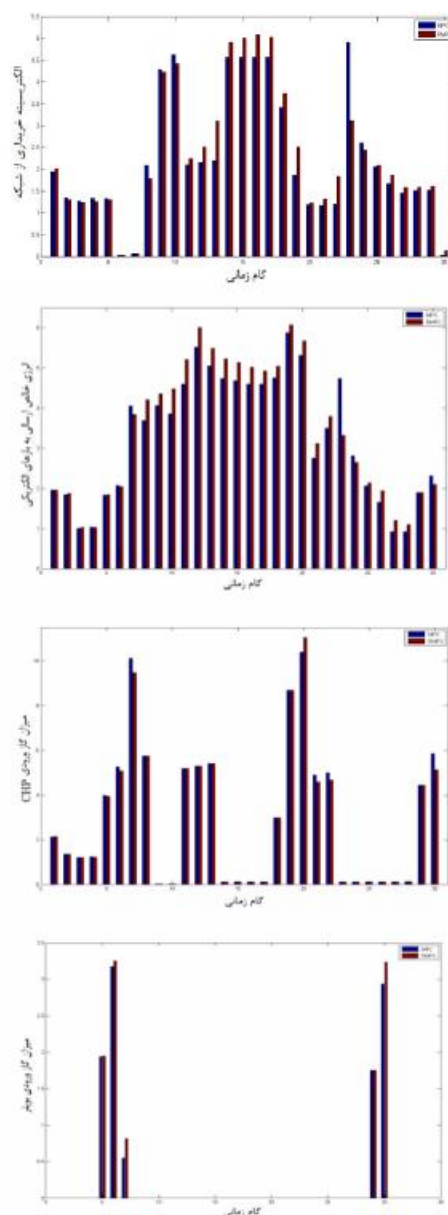


ادامه شکل ۷: مقایسه برنامه‌ریزی دوروش MPC و RMPC با در نظر گرفتن بارهای الکتریکی با عدم قطعیت $\pm 5\%$ درصد

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله رویکردی کنترلی برای مدل‌سازی و بهره‌برداری هاب انرژی پیشنهاد شده است. عدم قطعیت در هاب انرژی می‌تواند عملکرد سامانه را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل عدم قطعیت ناشی از خطای پیش‌بینی بارهای الکتریکی به صورت اغتشاش به مدل فضای حالت سامانه اضافه شده است. به دلیل وجود این عدم قطعیت در مدل از کنترل کننده پیش‌بین مقاوم مبتنی بر مدل بر مبنای نابرابری خطی و بهینه‌سازی محدب استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با وجود عدم قطعیت در سامانه کنترل پیش‌بین مقاوم در مقایسه با کنترل پیش‌بین معمولی برنامه‌ریزی دقیق‌تری را انجام می‌دهد. همچنین بارهای مصرف‌کنندگان با وجود عدم قطعیت به طور کامل تأمین می‌شود. در نهایت نیز افزایش هزینه مقاوم کردن سامانه در برابر درصدهای خطای پیش‌بینی متفاوت بررسی شد.

که به بارها فرستاده می‌شود، در طی ساعات ۱۲ تا ۲۲ مقدار بیش‌تری را دارا است. این مقدار بیش‌تر جهت جبران عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی است. با استفاده از کنترل کننده RMPC برای بارهای کنترل‌پذیر با وجود عدم قطعیت برنامه‌ریزی صحیحی انجام می‌شود. برنامه‌ریزی با روش کنترل پیش‌بین مقاوم نسبت به کنترل پیش‌بین معمولی محافظه کارانه است. به همین دلیل هزینه بالاتری را نیز در پی خواهد داشت. جدول ۳ مقدار تابع هزینه را برای برنامه‌ریزی مقاوم برای درصدهای متفاوت عدم قطعیت نشان می‌دهد.



شکل ۷: مقایسه برنامه‌ریزی دوروش MPC و RMPC با در نظر گرفتن بارهای الکتریکی با عدم قطعیت $\pm 5\%$ درصد (واحد محور عمودی بر حسب پروتونیت)

IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 1, pp. 24, 2007.

[2] R. Frick and P. Favre-Perrod, *Proposal for a multifunctional energy bus and its interlink with generation and consumption*, ETH Zurich: High voltage Laboratory, 2004.

[3] M. D. Galus and G. Andersson, "Power system considerations of plug-in hybrid electric vehicles based on a multi energy carrier model," in *Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 2009.

[4] T. Krause, F. Kienzle, Y. Liu and G. Andersson, "Modeling interconnected national energy systems using an energy hub approach," in *IEEE Trondheim PowerTech*, pp. 1-7, 2011.

[5] K. Alanne and A. Saari, "Distributed energy generation and sustainable development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 6, pp. 539-558, 2006.

[۶] عباس محمدویسی، علیرضا حاتمی‌شریف، «ارائه چارچوبی برای مدیریت انرژی خانه هوشمند: برنامه‌ریزی بهینه تجهیزات خانگی و برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر»، *مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۱، صفحه ۵۳، تبریز، بهار ۱۳۹۴.

[7] M. Gent and J. Lamont, "Minimum-emission dispatch," *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, vol. PAS-90, no. 6, pp. 2650-2660, 1971.

[8] J. Talaq, F. El-Hawary and M. El-Hawary, "Minimum emissions power flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 429-435, 1994.

[9] G. Koeppel and G. Andersson, "Reliability modeling of multi-carrier energy systems," *Energy*, vol. 34, pp. 235-244, 2009.

[10] M. Schulze, L. Friedrich and M. Gautschi, "Modeling and optimization of renewables: applying the energy hub approach," in *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, pp. 83-88, 2008.

[11] A. Hajimiragha, C. Canizares, M. Fowler, M. Geidl and G. Andersson, "Optimal energy flow of integrated energy systems with hydrogen economy considerations," in *Bulk Power System Dynamics and Control-VII. Revitalizing Operational Reliability*, pp. 1-11, 2007.

[12] M. Schulze and P. C. Del Granado, "Implementation of feed-in tariffs into multi-energy systems," *WASET 2009 World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009.

[13] F. Kienzle, P. Ahčin and G. Andersson, "Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 194-202, 2011.

[14] A. Parisio, C. Del Vecchio and A. Vaccaro, "A robust optimization approach to energy hub management," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 98-104, 2012.

[15] A. Parisio, C. Del Vecchio and G. Velotto, "Robust Optimization of operations in energy hub," in *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, pp. 4943-4948, 2011.

جدول ۲: میزان بارهای کنترل‌پذیر و قطعی در هر ساعت و نحوه عملکرد دو

کنترل‌کننده RMPC و MPC

T	MPC		MPC		RMPC	
	$de^{ctrl}(t)$	$de^{ctrl}(t)$	$P_e(t)$	$dr(t)$	$P_e(t)$	$dr(t)$
۱	-۰/۱۶	۱/۸۴	۱/۹۶	-۰/۴۹۲	۱/۹۵۹	-۰/۱۰۲
۲	-۰/۱۴۴	۱/۶۵۶	۱/۸۴	-۰/۰۰۲۲	۱/۸۷۴	-۰/۰۳۰
۳	-۰/۰۸	-۰/۹۲	۱/۰۶	-۰/۰۳۲۵	۱/۰۲۲	-۰/۰۴۱
۴	-۰/۰۸	-۰/۹۲	۱/۰۳۶	-۰/۰۳۰۶	۱/۰۲۷	-۰/۰۵۶
۵	-۰/۱۴۴	۱/۶۵۶	۱/۸۴	-۰/۲۲۳	۱/۸۲۸	-۰/۰۶۷
۶	-۰/۱۶	۱/۸۴	۲/۰۷	-۰/۱۳۹۶	۲/۰۴۵	-۰/۰۶۲
۷	-۰/۳۰۴	۳/۴۹۶	۴/۰۶۱	-۰/۷۰۵	۳/۸۴۱	-۰/۲۳۴
۸	-۰/۳۲	۳/۶۸	۳/۶۹۵	-۰/۵۳۲	۴/۲۱۹	-۰/۲۸۷
۹	-۰/۳۳۶	۳/۸۶۴	۴/۰۶۸	-۰/۷۰۶	۴/۳۶۶	-۰/۳۷۳
۱۰	-۰/۳۳۶	۳/۸۶۴	۳/۸۶۴	-۰/۷۰۱	۴/۴۸۶	-۰/۵۴۲
۱۱	-۰/۴	۴/۶	۴/۶	-۰/۳۰۷	۵/۲۱۶	-۰/۷۶۶
۱۲	-۰/۴۸	۵/۵۲	۵/۵۲	-۰/۴۳۱	۶/۰۱۳	۱/۲۱۷
۱۳	-۰/۴۴	۵/۰۶	۵/۰۶	۱/۳۰۱	۵/۴۹۴	۱/۳۵۷
۱۴	-۰/۴	۴/۶	۴/۷۴	۱/۷۶۰۸	۵/۲۳۸	۱/۳۹۹
۱۵	-۰/۴	۴/۶	۴/۶۸۶	۱/۶۰۴۵	۵/۱۴۵	۱/۴۹
۱۶	-۰/۴	۴/۶	۴/۶	۲/۰۰۵	۵/۰۱۷	۱/۹۶۰
۱۷	-۰/۴	۴/۶	۴/۶	۲/۸۱	۴/۹۲۵	۲/۳۸۳
۱۸	-۰/۴	۴/۶	۴/۶	۳/۱۷	۵/۰۵۲	۲/۲۹۷
۱۹	-۰/۴۶۴	۵/۳۳۶	۴/۷۶	۲/۴۴	۶/۰۷۵	-۰/۸۸۲
۲۰	-۰/۳۲	۳/۶۸	۵/۸۹	۱/۸۶	۵/۶۸۳	-۰/۸۹۲
۲۱	-۰/۲۴	۲/۷۶	۵/۳۲	۴/۳۳۴	۳/۱۲۲	۱/۲۰۷
۲۲	-۰/۳۰۴	۳/۴۹۶	۲/۷۶	۲/۶۳	۳/۸۰۲	-۰/۴۶۴
۲۳	-۰/۱۹۲	۲/۲۰۸	۳/۴۹۶	-۰/۵۱۸۳	۳/۳۲۸	-۰/۲۵۵
۲۴	-۰/۱۹۲	۲/۲۰۸	۴/۷۴	-۰/۱۰۱۷	۲/۶۴۹	-۰/۲۵۵
۲۵	-۰/۱۶	۱/۸۴	۲/۸۱۷	-۰/۱۴۰۹	۲/۱۳۹	-۰/۳۸۹
۲۶	-۰/۱۴۴	۱/۶۵۶	۲/۰۶۵۶	-۰/۱۶۱۹	۱/۹۴۲	-۰/۳۲۵
۲۷	-۰/۰۸	-۰/۹۲	-۰/۹۲	-۰/۰۷۷۹	۱/۲۰۳	-۰/۱۷۴
۲۸	-۰/۰۸	-۰/۹۲	-۰/۹۲۶۲	-۰/۰۵۵۹	۱/۱۰۰	-۰/۱۶۲
۲۹	-۰/۱۴۴	۱/۶۵۶	۱/۹۰۰	-۰/۰۳۹۷	۱/۸۹۴	-۰/۱۷۵
۳۰	-۰/۱۶	۱/۸۴	۲/۳۱۲	-۰/۲۰۸۵	۲/۱۰۱	-۰/۱۰۵

جدول ۳: مقایسه مقدار تابع هزینه RMPC بر حسب درصد خطای پیش‌بینی

متفاوت

عدم قطعیت	مقدار تابع هزینه	درصد افزایش هزینه
صفر درصد	$۳/۵۹۰۶ \times ۱۰^۲$	٪۰
±۵ درصد	$۳/۹۰۱ \times ۱۰^۳$	٪۸/۶
±۷ درصد	$۳/۹۵۰۵ \times ۱۰^۳$	٪۱۰
±۱۰ درصد	$۳/۹۲۱۷ \times ۱۰^۳$	٪۱۴

مراجع

[1] M. Geidl, G. Koeppel, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson and K. Frohlich, "Energy hubs for the future,"

- [۲۲] فاطمه پیروزمند، نعمت‌اله قهرمان، محمدرضا عاروان، «طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی برای سیستم کنترل وضعیت ماهواره»، مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۴، شماره ۴، صفحه ۱۰، تبریز، زمستان ۱۳۹۳.
- [23] E. F. Camacho and C. B. Alba, *Model predictive control*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [24] L. Wang, *Model predictive control system design and implementation using MATLAB*, Springer Science & Business Media, 2009.
- [25] J. Löfberg, *Minimax approaches to robust model predictive control*, Linköping Studies in Science and Technology, Dissertations, No. 812, 2003.
- [16] S. Pazouki, M.-R. Haghifam and A. Moser, "Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, pp. 335-345, 2014.
- [17] M. Arnold and G. Andersson, "Model predictive control of energy storage including uncertain forecasts," in *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, pp. 1-7, 2011.
- [18] M. Arnold, R. Negenborn, G. Andersson and B. De Schutter, "Distributed predictive control for energy hub coordination in coupled electricity and gas networks," in *Intelligent Infrastructures*, pp. 235-273, 2010.
- [19] M. Arnold, R. R. Negenborn, G. Andersson and B. De Schutter, "Model-based predictive control applied to multi-carrier energy systems," in *Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 2009.
- [20] M. J. Arnold, *On predictive control for coordination in multi-carrier energy systems*, Ph.D. Thesis, ETH Zurich, 2011.
- [21] M. Morari and J. H. Lee, "Model predictive control: past, present and future," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 23, no. 4-5, pp. 667-682, 1999.

زیرنویس‌ها

¹ Vision of Future Energy Networks (VoFEN)