

Supervisory Control Based on Fuzzy Cognitive Maps for a Dynamic System, Case Study: Energy Management in a Plug-in Hybrid Electric Vehicle

Hussein Eliasi

¹ Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract:

In this paper, a new control strategy based on Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) in order to design a supervisory controller for a complex system is presented. This supervisory controller is designed to provide reference signals needed for local controllers used in different sections of complex system. Designing of proposed supervisory controller consists of two part: 1- First, a basic FCM is constructed based on the cause and effect relationships between various components of the complex system, 2- Then, according to the control needs, new concepts are added to this cognitive map, and the relationship between these new concepts and the concepts of the primary fuzzy cognitive map is optimized based on a functional index. The proposed control approach is applied to energy management of a series-parallel plug-in hybrid electric vehicle problem. The simulation results show that the proposed control strategy has a better performance in satisfying the control objectives for a complex system than the conventional fuzzy controller.

Keywords: Complex systems, Fuzzy Cognitive Map, Supervisory Control, Plug-in Hybrid Electric Vehicle.

کنترل نظارتی مبتنی بر نقشه‌های شناختی فازی برای یک سیستم دینامیکی، مورد

مطالعاتی: مدیریت انرژی در یک خودروی هیبرید برقی پلاگین

حسین الیاسی^۱

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

h_eliasi@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک استراتژی جدید کنترلی مبتنی بر نقشه‌های شناختی فازی به منظور طراحی یک کنترل‌کننده نظارتی برای یک سیستم پیچیده ارائه شده است. این کنترل‌کننده نظارتی به گونه‌ای طراحی شده است تا سیگنال‌های مرجع لازم را برای کنترل‌کننده‌های محلی استفاده‌شده در بخش‌های مختلف سیستم پیچیده فراهم کند. طراحی کنترل‌کننده نظارتی پیشنهادی شامل دو بخش است: ۱- ابتدا براساس روابط علت و معلولی بین اجزای مختلف سیستم پیچیده، یک نقشه شناختی فازی اولیه پایه‌ریزی می‌شود. ۲- سپس با توجه به نیازهای کنترلی مفاهیم جدیدی به این نقشه شناختی اضافه می‌شود و ارتباط بین این مفاهیم جدید و مفاهیم نقشه شناختی فازی اولیه براساس یک شاخص عملکردی بهینه می‌شود. استراتژی کنترلی پیشنهادی برای مدیریت انرژی در یک خودروی هیبرید پلاگین برقی از نوع سری موازی استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند استراتژی کنترلی پیشنهادی، در مقایسه با کنترل‌کننده فازی مرسوم، عملکرد بهتری در برآورده شدن اهداف کنترلی برای یک سیستم پیچیده دارد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های پیچیده، نقشه‌های شناختی فازی، کنترل نظارتی، خودروی هیبرید پلاگین

۱- مقدمه

یکی از مسائل چالش‌برانگیز در این نوع سیستم‌ها، کنترل حلقه بسته آنها است. در بیشتر موارد، نمی‌توان یک مدل دقیق از سیستم پیچیده مطالعه شده ارائه کرد. مدلی که نمایان‌کننده دقیق رفتار سیستم پیچیده باشد، از چنان پیچیدگی بالایی برخوردار خواهد بود که برای طراحی یک قانون کنترل برای سیستم پیچیده مناسب نیست.

در مطالعات انجام‌شده، دو راه‌کار پایه‌ای برای کنترل کردن این نوع سیستم‌ها ارائه شده است: ۱- استفاده از یک مدل دینامیکی تقریبی ساده‌شده [۳] و ۲- طراحی کنترل‌کننده به شکل آزاد از مدل^۲ [۴، ۵]. هر دو حالت یک سری معایب به همراه خواهند داشت. در حالتی که از مدل دینامیکی تقریبی برای طراحی کنترل‌کننده استفاده می‌شود، قانون کنترلی از پیچیدگی بالایی برخوردار خواهد بود. در حالت دوم به علت کمتر استفاده کردن از اطلاعات

یک سیستم دینامیکی پیچیده، عموماً شامل چندین زیرسیستم دینامیکی است که به منظور ایجاد یک هدف مشخص با یکدیگر ارتباط داخلی دارند [۱]. آنچه باعث تمایز این نوع سیستم‌ها از سیستم‌های چندعاملی^۱ می‌شود، ویژگی‌هایی از قبیل پیچیدگی زیرسیستم‌ها و داشتن ساختار سلسله‌مراتبی است [۲].

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۳

نام نویسنده مسئول: حسین الیاسی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، بیرجند، دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

مصرف سوخت و عملکرد خودرو بررسی و تحلیل شده است. به منظور نشان دادن قابلیت‌های این استراتژی کنترلی جدید، عملکرد آن با عملکرد یک کنترل‌کننده فازی متداول مقایسه شده است.

نوآوری اصلی مقاله، ایجاد یک ساختار دینامیکی جدید برای نقشه شناختی به منظور پایه‌ریزی کنترل نظارتی برای یک سیستم پیچیده است. در بخش دو، نقشه شناخت فازی معرفی می‌شود. در بخش سه، پیاده‌سازی کنترل نظارتی مبتنی بر FCM بررسی شده است. در بخش چهار، شبیه‌سازی استراتژی کنترلی پیشنهادی بررسی شده و در نهایت در بخش پنج نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- نقشه‌های شناختی فازی

FCM، گراف جهت‌دار فازی شده با فیدبک است. یک FCM شامل تعدادی گره C_i و تعدادی کمان جهت‌دار e_{ij} است؛ به طوری که هر گره C_i یک مفهوم^۵ از سیستم و هر کمان نحوه ارتباط مفهوم C_i با مفهوم C_j را نشان می‌دهد. در حقیقت، FCM، یک سیستم دینامیکی پیچیده را به صورت مجموعه‌ای از مفاهیم و روابط علی بین آنها مدل می‌کند.

هر کمان e_{ij} که مفهوم C_i را به مفهوم C_j ارتباط می‌دهد، با یک ضریب w_{ij} وزن‌دهی می‌شود. این وزن‌ها، نوع و میزان تأثیرپذیری یک مفهوم از مفهوم دیگر را توصیف می‌کنند. وزن‌ها مقداری بین -۱ تا +۱ دارند. مثبت بودن وزن w_{ij} یعنی افزایش (کاهش) مفهوم C_i منجر به افزایش (کاهش) مفهوم C_j می‌شود؛ در صورتی که w_{ij} منفی باشد، کاهش (افزایش) مفهوم C_i ، افزایش (کاهش) مفهوم C_j را به همراه خواهد داشت. صفر بودن w_{ij} یعنی هیچ رابطه‌ی علی بین مفهوم C_i و مفهوم C_j وجود ندارد. شکل (۱)، شماتیکی از FCM شامل پنج مفهوم را نشان می‌دهد.

گفتنی است نقشه‌های شناختی فازی در واقع گراف‌هایی بر اساس شبکه‌های عصبی و منطق فازی‌اند که ویژگی‌ها و مزیت‌های هر دو را به ارث می‌برند [۹].

کیفی در طراحی کنترل‌کننده، ممکن است پاسخ حاصل از اعمال کنترل‌کننده چندان مطلوب نباشد. حالتی بین این دو، عیب‌های هر دو حالت را تا حد خیلی زیاد و چه بسا به طور کامل برطرف می‌کند.

یکی از ابزارهای سودمند در مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی پیچیده، نقشه‌های شناختی فازی^۳ یا به اختصار FCMها هستند [۶]. نخستین بار اکسلورد [۷] در سال ۱۹۷۶، مفهوم نقشه‌های شناختی را به منظور ایجاد ابزاری برای توصیف ساده سیستم‌های اجتماعی پایه‌گذاری کرد. کازکو در سال ۱۹۸۶، با الهام گرفتن از کار اکسلورد، FCM را راه‌کاری برای توصیف ساده رفتار سیستم‌های دینامیکی پیچیده معرفی کرد [۸]. این نوع نقشه‌ها از نحوه ارتباط بین متغیرهای مختلف در یک سیستم دینامیکی پیچیده کمک می‌گیرند و یک مدل ساده‌شده برای توصیف آن سیستم دینامیکی پایه‌ریزی می‌کنند.

نقشه شناختی فازی قابلیت یادگیری و تصحیح و گسترش دارد. به این معنی که لازم نیست در ابتدا همه موارد به صورت کاملاً واضح و کامل در نقشه لحاظ شود. به دلیل اینکه در بسیاری از موارد به دلیل پیچیدگی و تعدد متغیرها، امکان تبیین تمام نقش‌ها و وزن‌های علت و معلولی وجود ندارد؛ بلکه لازم است در حین کار برخی موارد و مفاهیم به نقشه، اضافه و تأثیر آن بر سیستم‌های دینامیکی تجزیه و تحلیل شود [۹].

در این مقاله از این ویژگی نقشه‌های شناختی برای ایجاد پیکربندی جدید به منظور پایه‌ریزی یک کنترل‌کننده نظارتی برای یک سیستم پیچیده استفاده شده است. ساختار کنترلی پیشنهادی این امکان را فراهم می‌کند تا بدون نیاز به داشتن مدل دقیقی از سیستم پیچیده، علاوه بر کاهش حجم محاسبات در تعیین قانون کنترل، برآورده شدن اهداف کنترلی به شکل مؤثرتری نسبت به استراتژی‌های کنترلی هوشمندی صورت گیرد که تاکنون معرفی شده‌اند.

ساختار پیشنهادی برای مدیریت بهینه انرژی در یک خودروی برقی هیبرید پلاگین^۴ یا به اختصار PHEV اعمال شده است. استراتژی کنترلی پیشنهادی، در حالات کاری متفاوت روی خودروی هیبرید از نوع پلاگین اعمال شده و

به صورت زیر خواهد بود:

$$A(k+1) = f(W(k)A(k)) \quad (2)$$

رابطه (۳)، ماتریس وزنی FCM در شکل (۱) را نشان می دهد.

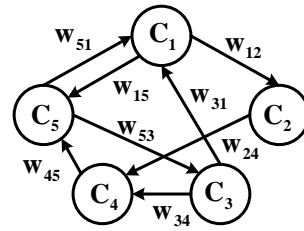
$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & w_{31} & 0 & w_{51} \\ w_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_{53} \\ 0 & w_{24} & w_{34} & 0 & 0 \\ w_{15} & 0 & 0 & w_{45} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

بعد از پیکربندی کردن FCM، باید وزنهای کمانهای مختلف را تعیین کرد. برای آموزش وزنها، سه دسته بندی اصلی وجود دارد: ۱- روشهای مبتنی بر الگوریتم هبیین [۱۰]، ۲- روشهای مبتنی بر الگوریتمهای تکاملی [۱۱]، ۳- روشهای ترکیبی [۱۴، ۱۵]. در [۹، ۱۶]، مروری بر این الگوریتمها انجام شده است.

در بیشتر FCMها، وزن بین مفاهیم یک مقدار ثابت در نظر گرفته می شود. این نوع FCMها، بیشتر برای مدل سازی رفتار حالت پایای یک سیستم مناسب اند و ممکن است رفتار حالت گذرای سیستم را نتوانند به خوبی مدل سازی کنند. با توجه به اینکه در این مقاله از یک FCM به عنوان کنترل کننده نظارتی استفاده شده، لازم است این کنترل کننده قابلیت لحاظ کردن ویژگیهای رفتار گذرای سیستم را نیز داشته باشد. یک راه کار برای مواجه شدن با این مورد، در نظر گرفتن وزنهای بیان شده با ماتریس W ، به شکل متغیر با زمان و براساس یک جدول جستجو است [۱۷].

راه کار دیگر، استفاده از درخت تصمیم گیری است. در این حالت، ساختار نقشه متناسب با حالت های مختلف سیستم می تواند تغییر کند [۱۸]. این نوع نقشه شناختی برای مدل کردن سیستم های اجتماعی مناسب است. همچنین، از تئوری اتوماتا برای پایه ریزی FCM دینامیک می توان کمک گرفت [۱۹].

در این مقاله برای استفاده از FCM، به عنوان یک کنترل کننده نظارتی، ساختار جدید برای FCM پیشنهاد شده است که در آن تعدادی از وزنها، فازی و تعدادی نیز به شکل ترکیب خطی از مقدار مفاهیم سیستم در هر لحظه به همراه یک بایاس اند. رابطه (۴)، شکل کلی یکی از وزنها



شکل (۱): شماتیک یک نقشه شناختی فازی

برای ترسیم نقشه شناخت فازی یک سیستم لازم است مراحل چهارگانه زیر طی شود:

۱. تعیین کردن مفاهیم شکل دهنده سیستم و نمایش دادن هر مفهوم با یک گره (C_i).

۲. تعیین کردن رابطه علی و سببی بین هر دو مفهوم و نمایش دادن آن با یک کمان وزن دار شده که دو گره را به هم متصل می کند.

۳. تعیین اثرگذاری یک مفهوم روی مفاهیم دیگر با در نظر گرفتن علامت «مثبت»، «منفی» یا «خنثی» برای وزن هر کمان.

۴. تعیین مقدار ضریب وزنی هر کمان که بیان کننده شدت تأثیرگذاری یک مفهوم روی مفهوم دیگر است.

بعد از نمایش و بیان گرافیکی سیستم با نقشه شناخت فازی، می توان آن را با یک مدل ریاضی توصیف کرد. در این مدل ریاضی، هر مفهوم یک مقدار عددی دارد که این مقدار در هر مرحله به کمک رابطه زیر محاسبه می شود:

$$A_i(k+1) = f\left(A_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ji} A_j(k)\right) \quad (1)$$

به طوری که $A_i(k)$ مقدار عددی مفهوم نام گره (C_i) در لحظه k و $A_i(k+1)$ مقدار عددی مفهوم نام در لحظه بعدی است. f به طور معمول یک تابع سیگموئید به شکل

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}}$$

در نظر گرفته می شود. پارامتر λ برای تعیین شکل این تابع استفاده می شود. در نظر گرفتن f به شکل سیگموئید باعث می شود مجموع مقادیر وزن یافته به محدوده [۰، ۱] هدایت شوند. مقدار عددی مفاهیم در هر لحظه به شکل یک بردار $n \times 1$ به اسم $A(k)$ و وزنهای بین مفاهیم در قالب یک ماتریس $n \times n$ به اسم $W(k)$ نمایش داده می شوند؛ به این ترتیب، نمایش ریاضی یک FCM

را برای نمونه نشان می‌دهد:

$$w_{ij}(k) = \sum_{m=1}^n \alpha_m^{ij} A_m(k) + b_{ij} \quad (۴)$$

که در آن، n تعداد مفاهیم، $A_m(k)$ مقدار عددی مفهوم m ام در لحظه k ، ضریب اثرگذاری مفهوم $A_m(k)$ روی وزن $w_{ij}(k)$ و b_{ij} مقدار بایاس وزنی است.

با انتخاب این ساختار برای وزن‌های مسیرهای بین مفاهیم، FCM حالت دینامیکی به خود خواهد گرفت و برای مدل‌سازی رفتار گذرای سیستم نیز مناسب خواهد بود.

۳- کنترل نظارتی مبتنی بر FCM

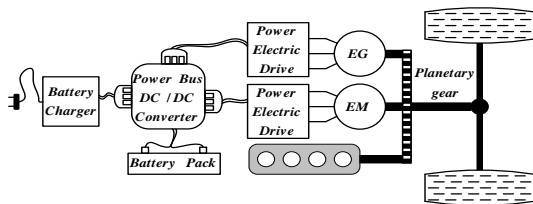
یکی از راه‌کارهای مفید برای کنترل کردن سیستم‌های دینامیکی با پیچیدگی بالا، این است که کل سیستم به چند زیرسیستم، تقسیم و برای هر زیرسیستم، یک کنترل‌کننده محلی مجزا طراحی شود و این کنترل‌کننده‌ها از طریق کنترل‌کننده نظارتی با هم هماهنگ شوند. وظیفه این کنترل‌کننده نظارتی، فراهم کردن سیگنال‌های مرجع مناسب برای کنترل‌کننده‌های محلی هر بخش از سیستم دینامیکی پیچیده است. در ادامه، نحوه طراحی این کنترل‌کننده نظارتی برای مسئله مدیریت انرژی در یک خودروی برقی هیبرید پلاگین به‌عنوان یک سیستم پیچیده شرح داده شده است.

در ابتدا، یک PHEV به‌طور مختصر توصیف می‌شود. در طراحی خودروهای هیبریدی (معمولی، پلاگین) چهار نوع سیستم انتقال قدرت استفاده می‌شود. این چهار نوع عبارت‌اند از سیستم انتقال قدرت سری، سیستم انتقال قدرت موازی، سیستم انتقال قدرت پیچیده (ترکیبی از حالت‌های قبل). انتقال قدرت در خودروی مطالعه‌شده در این مقاله، سری‌موازی است. این نوع سیستم انتقال قدرت تلفیقی از مزایای سیستم انتقال قدرت موازی و سیستم انتقال قدرت سری را دارد [۲۰].

بخش‌های اصلی خودروی هیبرید پلاگین، عبارت‌اند از ۱- موتور الکتریکی، ۲- ژنراتور، ۳- موتور احتراق داخلی، ۴- باتری و ۵- دینامیک خودرو. شکل (۲)، شماتیک کلی از نحوه اتصال بخش‌های مختلف یک PHEV را نمایش

می‌دهد.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، شفت‌های موتور الکتریکی، ژنراتور و موتور از طریق یک مجموعه گیربکس سیاره‌ای^۶ به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین، موتور و ژنراتور با اینورترهای سه‌فاز به باتری و هر دو اینورتر و سیستم شارژ به یک باس DC متصل می‌شوند که این باس DC با یک مبدل DC به DC به باتری متصل شده است.



شکل (۲): شماتیک کلی خودروی هیبرید پلاگین

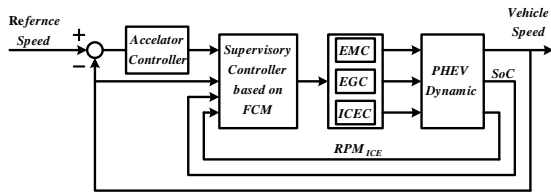
مدل در نظر گرفته شده برای خودروی هیبرید پلاگین مطالعه‌شده، در محیط Advisor^۸ پیاده‌سازی شده است. مشخصات این خودرو در جدول (۱) بیان شده است.

مدل دینامیکی خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین از پیچیدگی بالایی برخوردار است. همین امر باعث می‌شود طراحی یک کنترل‌کننده کلاسیک یا مدرن مبتنی بر مدل برای این خودرو نسبتاً مشکل باشد. همچنین، اگر کنترل‌کننده براساس مدل ساده‌شده از خودرو طراحی شود و این کنترل‌کننده روی مدل واقعی خودرو پیاده شود که جزئیات بیشتری دارد، اهداف کنترلی شامل دنبال‌کردن سرعت درخواستی توسط راننده و کاهش مصرف سوخت، به شکل مطلوبی برآورده نخواهد شد؛ به این ترتیب، اهمیت طراحی کنترل‌کننده با وابستگی کمتر به مدل نمود پیدا می‌کند.

به‌منظور مدیریت مؤثرتر و ساده‌تر انرژی در PHEV، به کنترل‌کننده هوشمند و بهینه‌ای نیاز است که توزیع انرژی در خودرو را با محاسبات سریع انجام دهد. طراحی کنترل‌کننده باید به‌گونه‌ای باشد که در آن به مدل دقیق خودرو نیاز نباشد و با یک مدل توصیفی ساده از خودرو بتوان کنترل‌کننده را طراحی کرد.

مقایسه شده است و با یک کنترل کننده، شتاب مرجع لازم برای تأمین این سرعت تعیین می شود. این شتاب به همراه سرعت لحظه ای خودرو، سطح شارژ باتری^۹ (SoC) و سرعت موتور احتراقی برحسب rpm (RPM_{ICE})، وارد کنترل کننده نظارتی مبتنی بر FCM شده است و این کنترل کننده، سیگنال های مرجع لازم برای سه کنترل کننده محلی اشاره شده را تأمین می کند.

در این شکل، EGC، EMC و ICEC به ترتیب سه کنترل کننده PI برای کنترل گشتاور موتور الکتریکی، ژنراتور و موتور احتراقی اند.



شکل (۳): شماتیک کلی روش کنترلی پیشنهادی

پایه ریزی کنترل کننده نظارتی از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله نخست، یک FCM اولیه براساس شناخت کلی استخراج می شود که از خودروی هیبرید پلاگین در دسترس است. مفاهیم لازم برای شکل دادن این FCM، عبارت اند از ۱- سطح شارژ باتری (SoC)، ۲- سرعت موتور الکتریکی برحسب دور بر دقیقه (RPM_{EM})، ۳- سرعت ژنراتور برحسب دور بر دقیقه (RPM_{EG})، ۴- سرعت موتور احتراقی (RPM_{ICE})، ۵- گشتاور موتور احتراقی (T_{ICE})، ۶- گشتاور درخواستی از موتور الکتریکی (T_{Req}^{Em})، ۷- گشتاور درخواستی از ژنراتور (T_{Req}^{EG})، ۸- میزان درخواستی بازبودن دریچه سوخت (Thr)، ۹- تغییرات سرعت خودرو (ΔV) و ۱۰- مصرف سوخت ($Fuel$).

شکل (۴)، FCM اولیه ای را نشان می دهد که به منظور مدل سازی رفتار دینامیکی سیستم استفاده می شود. مطابق با شکل، برای توصیف این FCM، از ۱۲ واقعه^{۱۰} (Event) استفاده شده است. وزن های بین مفاهیم مطابق با رابطه (۴) در نظر گرفته می شوند.

جدول (۱): مشخصات خودروی هیبرید مطالعه شده

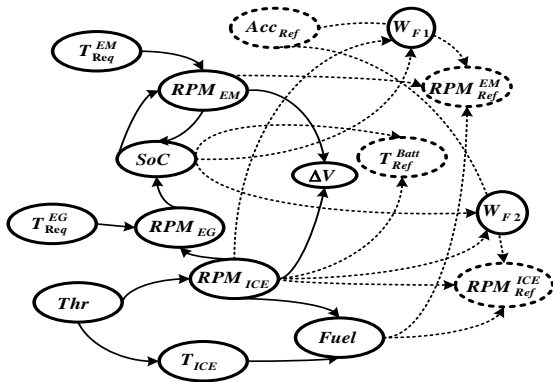
بخش	پارمتر	مقدار
وزن	(kg)	۵۹۲
سطح مؤثر جلو	(m ²)	۲/۱۶
شعاع چرخ ها	(m)	۰/۳
فاصله محور جلو از مرکز ثقل	(m)	۱/۳۵
فاصله محور عقب از مرکز ثقل	(m)	۱/۵۵
نوع موتور	انژکتوری	
توان ماکزیمم	(kw)	۱۱۴
سرعت در توان ماکزیمم	(rpm)	۵۰۰۰
سرعت ماکزیمم	(rpm)	۶۰۰۰
توان ماکزیمم	(kw)	۵۰
توان ماکزیمم	(kw)	۱۲۰
نوع باتری	نیکل - منال - هیدراید	
ولتاژ نامی (v)		۲۰۰
ظرفیت نامی (Ah)		۸/۱
تعداد سلول ها در حالت سری		۲۰
تعداد سلول ها در حالت موازی		۱۰

از منظر مدیریت توان، یک PHEV را می توان به سه بخش اساسی تقسیم کرد: ۱- موتور الکتریکی؛ وظیفه آن تولید بخشی از نیروی پیشران خودرو است، ۲- موتور احتراقی؛ وظیفه آن علاوه بر تأمین کردن بخشی از نیروی پیشران، تأمین کردن نیروی لازم برای به حرکت درآوردن ژنراتور است، ۳- ژنراتور الکتریکی؛ وظیفه شارژ کردن باتری در هنگام حرکت خودرو را بر عهده دارد. علاوه بر اینکه هرکدام از این سه بخش از پیچیدگی دینامیکی بالایی برخوردارند، ارتباط بین آنها و دینامیک خودرو (مدل مرکز جرم، نیروهای پیشران و دینامیک لاستیک ها) نیز درجه پیچیدگی بالایی دارد.

در ساختار کنترلی پیشنهادی برای هرکدام از این سه بخش یک کنترل کننده محلی طراحی شده است. وظیفه کنترل کننده نظارتی، تعیین مقدار مرجع برای هرکدام از سه کنترل کننده محلی مربوط به موتور الکتریکی، موتور احتراقی و ژنراتور است.

شماتیک کلی روش کنترلی پیشنهادی در شکل (۳) آمده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، در هر لحظه، سرعت خودرو با سرعت درخواستی توسط راننده

این مفاهیم و مفاهیم FCM اولیه با خط چین نشان داده شده است.



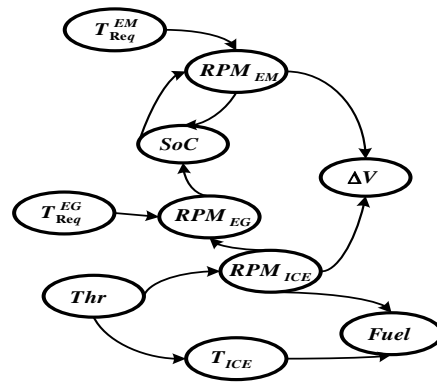
شکل (۵): ساختار کنترل کننده نظارتی مبتنی بر FCM اولیه

در این شکل، وزن‌های W_{F1} و W_{F2} ، وزن‌های فازی اند که مقادیر آنها با توجه مقدار RPM_{ICE} و SoC تعیین می‌شوند. با توجه به اینکه در FCM، مقدار مفاهیم به بازه $[0,1]$ نگاشته می‌شوند، توابع عضویت برای SoC ، RPM_{ICE} ، W_{F1} و W_{F2} در همین بازه در نظر گرفته می‌شود. جدول تخصیص وزن‌های فازی به همراه توابع عضویت مربوط به SoC برای نمونه در شکل (۶) نمایش داده شده است. برای سه مفهوم دیگر، توابع عضویت مانند توابع عضویت SoC در نظر گرفته شده است. در این کنترل کننده نظارتی ضرایب مربوط به وزن‌های FCM اولیه، همان ضرایب به دست آمده در مرحله قبل در نظر گرفته می‌شود. ساختار وزن‌های جدید غیر از W_{F1} و W_{F2} ، همان ساختار اشاره شده در رابطه (۴) است.

برای تنظیم ضرایب مربوط به وزن‌های جدید نیز از الگوریتم EDA استفاده شده است. در این حالت، تابع هزینه به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$J = \frac{1}{2(T-1)} \sum_{k=2}^T \alpha^{(T-k)} [c_1(0.8 - SoC(k))^2 + c_2 Fuel(k)^2] \quad (6)$$

هدف از انتخاب این تابع هزینه، کمینه کردن میزان مصرف سوخت و نگه داشتن سطح شارژ باتری در یک محدوده مشخص است.



شکل (۴): ساختار FCM اولیه

برای تنظیم ضرایب α_m^{ij} ها و b_{ij} ها از الگوریتم تخمین توزیع^{۱۱} [۲۱] استفاده شده است. در این الگوریتم تابع هزینه به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

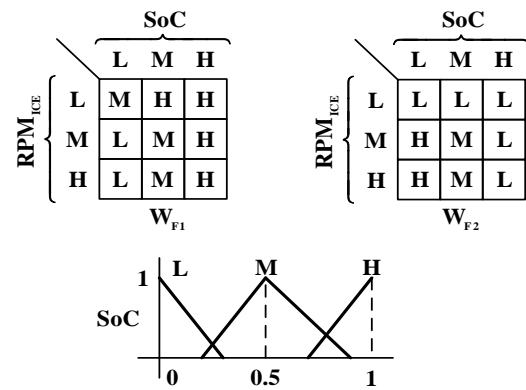
$$J = \frac{1}{(T-1)n} \sum_{k=2}^T \alpha^{(T-k)} \sum_{i=1}^n (A_i(k) - A_i^{est}(k))^2 \quad (5)$$

در رابطه (۴)، $A_i(k)$ مقدار واقعی مفهوم نام و $A_i^{est}(k)$ مقدار تخمین زده شده مفهوم نام در لحظه k است. همچنین، T پنجره زمانی است که در آن از مقادیر مفاهیم برای تنظیم ضرایب استفاده می‌شود. α یک فاکتور فراموشی و n تعداد مفاهیم اولیه است. با کمینه کردن تابع هدف داده شده به کمک الگوریتم EDA، ضرایب مدنظر به دست می‌آیند. ضرایب به دست آمده در انتهای هر پنجره زمانی به عنوان مقادیر اولیه ضرایب در ابتدای پنجره زمانی بعدی استفاده می‌شوند.

در مرحله دوم، برای شکل دادن کنترل کننده نظارتی، چهار مفهوم جدید به FCM اولیه اضافه می‌شود تا از طریق این مفاهیم، مراجع لازم برای سه کنترل کننده محلی فراهم شود که در ابتدای همین بخش به آنها اشاره شد. این مفاهیم جدید عبارت‌اند از ۱- سرعت مرجع برای موتور الکتریکی برحسب دور بر دقیقه (RPM_{Ref}^{EM})، ۲- سرعت مرجع برای موتور احتراقی برحسب دور بر دقیقه (RPM_{Ref}^{ICE})، ۳- گشتاور مرجع برای ژنراتور به منظور شارژ باتری (T_{Ref}^{Batt}) و ۴- شتاب مرجع تولید شده با کنترل کننده سرعت (Acc_{Ref}). شکل (۵)، ساختار کنترل کننده نظارتی مبتنی بر FCM اولیه را نشان می‌دهد.

در شکل (۵)، مفاهیم جدید به همراه ارتباط علی بین

است، گشتاور درخواستی، سرعت خودرو و سطح شارژ به‌منزله ورودی‌های کنترل‌کننده فازی و گشتاور مرجع برای موتور احتراق داخلی، به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. گشتاور مرجع برای موتور الکتریکی به‌صورت اختلاف بین گشتاور درخواستی و گشتاور تأمین‌شده با موتور احتراق داخلی در نظر گرفته شده است. همچنین، گشتاور مرجع برای ژنراتور براساس یک سیستم استنتاج فازی تعیین شده است که ورودی‌های آن، سطح شارژ باتری و سرعت موتور احتراق داخلی و خروجی آن، گشتاور مرجع برای ژنراتور است.



شکل (۶): جدول تخصیص وزن‌های W_{F1} و W_{F2} به‌همراه توابع عضویت مربوط به SoC

در حالت دوم (استفاده از استراتژی کنترلی پیشنهادی)، برای آموزش ضرایب وزنی FCM اولیه و کنترل‌کننده نظارتی مبتنی بر FCM، پارامترهای α و T در هر دو رابطه (۵) و (۶) به‌ترتیب 0.9 و 30 نمونه زمانی در نظر گرفته شده‌اند. شبیه‌سازی در محیط Advisor [۲۳] پیاده‌سازی شده است. شبیه‌سازی برای سیکل‌های واقعی و استاندارد EUDC (low power vehicles) و ECE15، EUDC و همچنین، یک نمونه سیکل واقعی رانندگی تهران بزرگ [۲۴] انجام شده است.

عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهادی و کنترل‌کننده فازی، از نظر مدیریت مصرف سوخت برای سیکل‌های مختلف در جدول (۲) مقایسه شده است. همان‌طور که نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند، در شرایط یکسان کنترل‌کننده FCM عملکرد مطلوبی داشته و میزان مصرف سوخت را در حد پذیرفتنی کاهش داده است.

برای آموزش وزن‌های دو FCM، از نتایج حاصل از اعمال یک کنترل‌کننده فازی [۲۲] و یک کنترل‌کننده کلاسیک غیرنظارتی متشکل از کنترل‌کننده‌های PI، روی سیکل‌های حرکتی استاندارد EUDC، ECE15 و EUDC (low power vehicles) استفاده شده است که سیکل‌های حرکتی منطبق بر استانداردهای رانندگی در اروپا هستند. EUDC (low power vehicles) یک سیکل درون شهری است و دو سیکل دیگر، ترکیبی از سیکل‌های درون شهری و رانندگی در اتوبان هستند. در بخش بعدی عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهادی بررسی شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور بررسی عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهادی، شبیه‌سازی در دو حالت مدیریت انرژی مبتنی بر یک کنترل‌کننده فازی متداول و مدیریت انرژی مبتنی بر FCM، پیاده‌سازی و با یکدیگر مقایسه شده است.

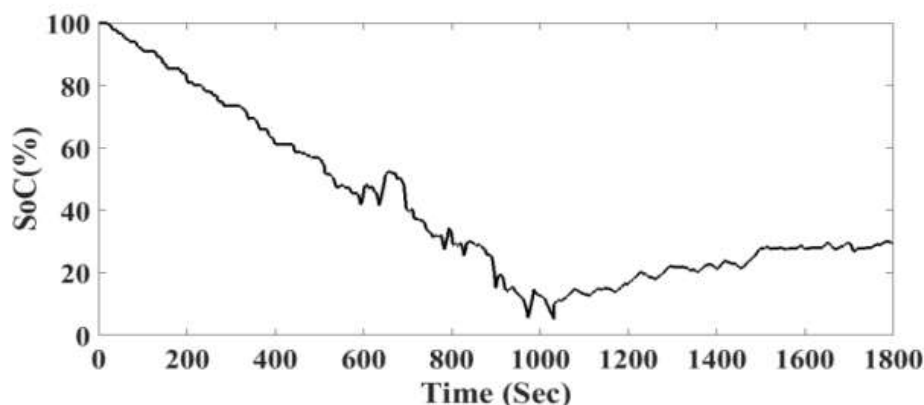
در حالت اول که کنترل‌کننده فازی متداول استفاده شده

جدول (۲): مقایسه مصرف سوخت بین کنترل‌کننده فازی متداول و کنترل‌کننده FCM پیشنهادی

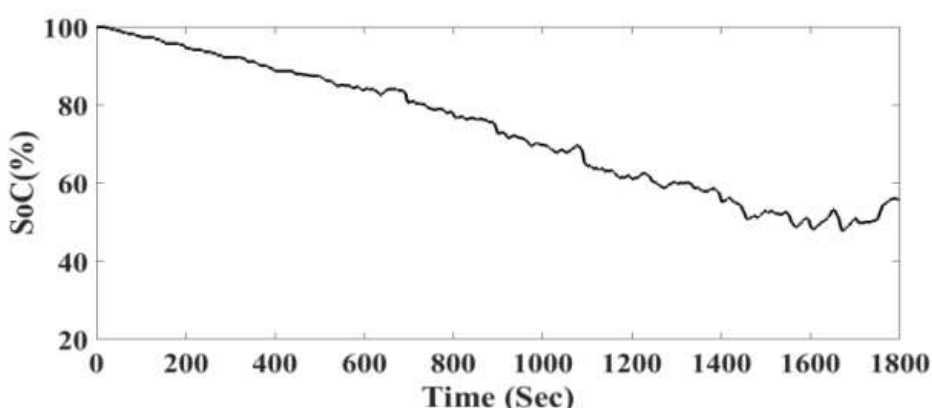
نوع سیکل	با کنترل‌کننده فازی متداول			با کنترل‌کننده FCM پیشنهادی		
	میزان مصرف سوخت در مسافت ۱۰۰ کیلومتر برحسب لیتر	توان پیمایش برحسب کیلومتر	میزان مصرف سوخت در مدت زمان آزمایش برحسب لیتر	میزان مصرف سوخت در مسافت ۱۰۰ کیلومتر برحسب لیتر	توان پیمایش برحسب کیلومتر	میزان مصرف سوخت در مدت زمان آزمایش برحسب لیتر
EUDC	۱/۵۲	۶۵/۷۸	۰/۱۰۶۳	۱/۱۵	۸۶/۷۰	۰/۰۸۰۲
ECE15	۴/۵۱	۲۲/۱۷	۰/۰۴۴۸	۳/۵۳	۲۸/۳۰	۰/۰۳۵۱
EUDC(LPV)	۱/۴۶	۶۸/۶۹	۰/۰۹۶۷	۱/۲۳	۸۱/۱۸	۰/۰۸۱۴
تهران بزرگ	۴/۴۲	۲۲/۶۳	۰/۳۶۸۶	۳/۸۷	۲۵/۸۵	۰/۳۲۲۶

را در حد مطلوب نگه دارد؛ به همین دلیل، نمودار سطح شارژ باتری با افت بیش از حد، به مقداری نزدیک ۵٪ رسیده است. در صورتی که استفاده از کنترل‌کننده نظارتی FCM پیشنهادی باعث می‌شود سطح شارژ باتری در حد مطلوبی حفظ شود.

شکل‌های (۷) و (۸)، تغییرات سطح شارژ باتری را در سیکل واقعی رانندگی تهران بزرگ به ترتیب در دو حالتی نشان می‌دهند که کنترل‌کننده فازی متداول و کنترل‌کننده FCM پیشنهادی استفاده شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده فازی نتوانسته است سطح شارژ باتری



شکل (۷): تغییرات سطح شارژ باتری در سیکل تهران با کنترل‌کننده فازی متداول



شکل (۸): تغییرات سطح شارژ باتری در سیکل تهران با کنترل‌کننده FCM پیشنهادی

به اینکه در FCM برخلاف سیستم استنتاج فازی متداول، از مفاهیم شکل‌دهنده سیستم بررسی شده و ارتباط آنها با یکدیگر بهره گرفته می‌شود، از آن به‌عنوان روش و راه‌حل مناسب به‌منظور طراحی کنترل‌کننده برای یک سیستم پیچیده، مانند خودروی هیبرید الکتریکی پلاگین می‌توان استفاده کرد. همچنین، با در نظر گرفتن وزن‌های بین مفاهیم FCM، به شکل دینامیک، از آن برای مدل‌سازی و کنترل طیف وسیع‌تر و پیچیده‌تری از سیستم‌های دینامیکی می‌توان بهره برد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک استراتژی کنترلی جدید مبتنی بر نقشه‌های شناختی فازی به‌منظور طراحی یک کنترل‌کننده نظارتی برای یک سیستم دینامیکی پیچیده ارائه شده است. با توجه به اینکه این روش به داشتن مدل دقیقی از سیستم نیاز ندارد، حجم محاسبات در تعیین قانون کنترلی کمتر بوده و پیاده‌سازی آن نسبت به روش‌های کلاسیک ساده‌تر است. استراتژی کنترلی پیشنهادی در مسئله مدیریت انرژی در یک PHEV به‌عنوان سیستم پیچیده استفاده شده است. با توجه

سیاسگزاری

در اینجا از کمیته علمی «ششمین کنگره مشترک سیستم‌های فازی و هوشمند ایران»، جهت بازبینی مقاله و انتخاب آن برای چاپ در ویژه نامه مجله «هوش محاسباتی در مهندسی برق و کامپیوتر» کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مراجع

- J. Comput. Sci., Vol. 2, No. 2, pp. 142–149, 2007.
- [13] D. E. Koulouriotis, I. E. Diakoulakis, D. M. Emiris, “Learning fuzzy cognitive maps using evolution strategies: a novel schema for modeling and simulating high-level behavior”, Proceedings of IEEE Congr. Evol. Comput., pp. 364–371, 2001.
- [14] E. I. Papageorgiou, P. P. Groumos, “A new hybrid learning algorithm for fuzzy cognitive maps learning”, Appl. Soft Comput., Vol. 5, pp. 409–431, 2005.
- [15] Y. Zhu, W. Zhang, “An integrated framework for learning fuzzy cognitive map using RCGA and NHL algorithm”, Proceedings of Int. Conf. Wireless Commun., Netw. Mobile Comput., Dalian, China, 2008.
- [16] W. Stach, L.A.Kurgan, W. Pedrycz, “A survey of fuzzy cognitive map learning methods”, in Issues in Soft Computing: Theory and Applications, P. Grzegorzewski, M. Krawczak, and S. Zadrozny, Eds., pp. 71–84, 2005.
- [17] Y. Miao, Z. Q. Liu, C. K. Siew, C. Y. Miao, “Dynamical cognitive network - an extension of fuzzy cognitive map”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 9, No. 5, pp. 760–770, 2001.
- [18] E. I. Papageorgiou, “A Novel Approach on Constructed Dynamic Fuzzy Cognitive Maps Using Fuzzified Decision Trees and Knowledge-Extraction Techniques”, Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Applications, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Springer-Verlag, Vol. 247, Chapter 3, pp. 43–70, 2010.
- [19] G. Acampora, V. Loia, “On the Temporal Granularity in Fuzzy Cognitive Maps”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 19, No. 6, pp. 1040–1057, 2011.
- [20] S. S. Williamson, “Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles,” Springer, 2013.
- [21] P. Larrañaga, J. A. Lozano, “Estimation of Distribution Algorithms: A New Tool for Evolutionary Computation”, Springer, 2002.
- [22] A. Behzadpour, H. Eliasi, “Fuzzy based controller design for parallel hybrid electric vehicle: An approach to fuel consumption and emission reduction”, Proceedings of KBEL, IEEE, pp. 640–649, 2015.
- [23] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O’Keefe, S. Sprik, K. Wipke, “ADVISOR: a Systems Analysis Tool for Advanced Vehicle Modeling”, Journal of Power Sources, Vol. 110, pp. 255–266, 2002.
- [24] R. Barmaki, M. Ilkhani, S. Salehpour, “Investigation of energy usage and emissions on plug-in and hybrid electric vehicle”, Tehnički Vjesnik, Vol. 23 No. 3, pp. 899–906, 2016.
- [1] A. Zeng, Z. Shen, J. Zhou, J.Wu, Y. Fan, Y. Wang, H. E. Stanley, “The science of science: From the perspective of complex systems”, Physics Reports, Vol. 714–715, pp. 1–73, 2017.
- [2] K. Vamvoudakis, S. Jagannathan, (Eds.). “Control of Complex Systems: Theory and Applications”, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [3] A. L. Fradkov, I. V. Miroshnik, V. O. Nikiforov, “Nonlinear and adaptive control of complex systems”, Springer Science & Business Media, Vol. 491, 2013.
- [4] M. Fliess, C. Join, “Model-free control and intelligent PID controllers: towards a possible trivialization of nonlinear control?”, IFAC Proceedings Volumes, Vol. 42, No. 10, pp. 1531–1550, 2009.
- [5] J. Boes, F. Migeon, “Self-organizing multi-agent systems for the control of complex systems”, Journal of Systems and Software, Vol. 134, pp.12–28, 2017.
- [6] C. D. Stylios, P.P. Groumos, “Modeling complex systems using fuzzy cognitive maps”, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 34, No. 1, pp. 155–162, 2004.
- [7] R. Axelord, “Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites”, Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1976.
- [8] B. Kosko, “Fuzzy cognitive maps”, Int. J. Man-Mach. Stud., Vol. 24, pp. 65–75, 1986.
- [9] E. I. Papageorgiou, “Learning Algorithms for Fuzzy Cognitive Maps—A Review Study”, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), Vol. 42, No. 2, pp. 150–163, 2012.
- [10] E. Papageorgiou, C. D. Stylios, P. P. Groumos, “Active Hebbian learning algorithm to train fuzzy cognitive maps” , Int. J. Approx. Reason., Vol. 37, No. 3, pp. 219–249, 2004.
- [11] S. Alizadeh, M. Ghazanfari, M. Fathian, “Using data mining for learning and clustering FCM”, Int. J. Comput. Intell., Vol. 4, No. 2, pp. 118–125, 2008.
- [12] S. Alizadeh, M. Ghazanfari, M. Jafari, S. Hooshmand, “Learning FCM by tabu search,” Int.

¹ Multi-agents systems

² Model-free control

- ³ Fuzzy Cognitive Map (FCM)
- ⁴ Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)
- ⁵ Concept
- ⁶ Hebbian
- ⁷ Planetary Gear Set
- ⁸ Advanced Vehicle Simulator
- ⁹ State of Charge (SoC)
- ¹⁰ Event
- ¹¹ Estimation of Distributed Algorithm (EDA)