مروری بر انتخاب توابع عضویت فازی در سیستم‌های الکتریکی

مهدی زنگنه[۱]، ابراهیم آقاجری*[۲]، مهدی فروزان‌فر[۳]
[۱] دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[۲*] استادیار گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، aghajari@iahavaz.ac.ir
[۳] استادیار گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۱۷

چکیده: امروزه استفاده وسیع از کنترل‌کننده‌های فازی در سیستم‌های الکتریکی به ویژه سیستم‌های غیر خطی و دارای نامعینی به سرعت رو به افزایش است. بدیهی است که طراحی یک سیستم استنتاج فازی مطلوب، مستلزم انتخاب صحیح نوع، تعداد و دامنه توابع عضویت به منظور فازی‌سازی متغیرهای ورودی و خروجی سیستم می‌باشد. لیکن تا کنون هیچ پژوهش و یا روش ساختاریافته‌ای برای انتخاب صحیح توابع عضویت معرفی نشده و منحصراً این انتخاب مبتنی بر سعی و خطا و شناخت طراح از سیستم بوده است. با توجه به اهمیت این مساله، مقاله حاضر بررسی جامعی بر توابع عضویت انتخاب شده در مقالات مرتبط با سیستم‌های الکتریکی انجام داده است.در پایان بر اساس مقالات بررسی شده و دسته بندی‌های انجام گرفته پیشنهاداتی جهت انتخاب بهینه توابع عضویت بر اساس اهداف کاربردی سیستم‌های الکتریکی ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: توابع عضویت، منطق فازی، استنتاج فازی، سیستم‌های الکتریکی.

۱- مقدمه

تئوری مجموعه‌های فازی اولین بار توسط پرفسور لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح گردید[۱]. از زمان مطرح شدن این تئوری تا کنون ده‌ها هزار مقاله و مطلب علمی در این زمینه توسط دانشمندان علوم مختلفی از جمله علوم مهندسی به چاپ رسیده که نشان دهنده‌ی حوزه‌ی گسترده‌ی کاربرد تئوری و عملی این نظریه است. این تئوری به دلایلی از جمله سادگی اجرا، قابلیت تطبیق بالا، حساسیت کم نسبت به نوسانات سیستم و عدم نیاز به مدل ریاضی به صورت گسترده برای کنترل فرایند-ها در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۲, ۳]. عمده مراجع در زمینه های مختلف علوم مهندسی گاهی منحصراً روشی مبتنی بر منطق فازی مورد استفاده قرار داده‌اند و گاهی نیز از این روش در کنار سایر الگوریتم‌های هوشمند بهره برده‌اند.

از آن‌جا که عمدتا کاربرد منطق فازی در بخش کنترل سیستم‌ها می‌باشد لذا همواره ترکیب‌های متفاوت کنترلی مبتنی بر منطق فازی در ارتباط با سیستم‌های الکتریکی مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. این کنترل‌کننده‌ها فقط بر اساس منطق فازی و یا با استفاده از ترکیب آن در کنار دیگر روش‌های کنترلی، مانند کنترل‌کننده‌های کلاسیک، مد لغزشی، شبکه‌های عصبی و یا الگوریتم‌های بهینه سازی تکاملی انجام پذیرفته است.

هر سیستم استنتاج فازی اساساً از پنج قسمت تشکیل گردیده است. برای عملکرد مناسب یک سیستم استنتاج فازی تمامی این پنج قسمت باید به درستی و با دقت انتخاب شوند. یکی از مهم‌ترین قسمت-هایی که در این مقاله بدان پرداخته شده، مبحث انتخاب نوع پایگاه داده[۱] است. پایگاه داده شامل اطلاعات توابع عضویت، مجموعه‌های فازی و دامنه‌های آن‌ها است. عموماً نحوه‌ی انتخاب نوع توابع عضویت، تعداد و دامنه‌ی آن‌ها توسط آزمون و خطا یا توسط تجربه و دانش طراح انتخاب شده و عموماً پاسخ‌های خروجی با استفاده از تکنیک‌های بهینه مرسوم بهبود بخشیده می‌شوند[۴]. در صورت عدم استفاده از تکنیک-های بهینه‌سازی، انتخاب اطلاعات پایگاه داده در دو سطح انجام می-شود، در گام اول با توجه به تجربه‌ی پیشین سیستم‌های کنترل، یک انتخاب اولیه برای توابع عضویت، تعداد و دامنه‌ی آنها صورت گرفته و در گام بعد با بررسی نتایج FIS[۲] در شرایط مختلف کاری، انتخاب اولیه-ی انجام شده به تدریج اصلاح شده تا عملکرد مطلوب سیستم کنترل فازی حاصل شود [۵].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

از آن‌جا که این توابع عضویت معرف تغییر رفتار یک متغییر فیزیکی هستند، بنابر این باید به گونه‌ای متناسب با رفتار واقعی متغییر انتخاب شوند. توابع عضویتی که به طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل تابع عضویت مثلثی، ذوزنقه‌ای، سیگموئید، گوسی، زنگوله‌ای و میله‌ای و... می‌باشند که بسته به کاربرد ممکن است از ترکیب موارد فوق یا تابع عضویت اختصاصی[۳] که خود طراح ایجاد نموده استفاده شود [۶]. دامنه و تعداد توابع عضویت نیز متناسب با دقت مورد نظر طراح انتخاب می‌شود.

مقاله مذکور مروری بر کاربردهای مختلف منطق فازی در سیستم-های الکتریکی و اطلاعات مربوط به پایگاه داده‌ی مقالات انجام داده است. سعی بر این شده که در یک نگاه کلی نسبت به انتخاب نوع توابع عضویت جهت کاربردهای متفاوت، یک جمع‌بندی جامع انجام شود تا به طراحان در انتخاب اولیه‌ی توابع عضویت مناسب کمک نماید.

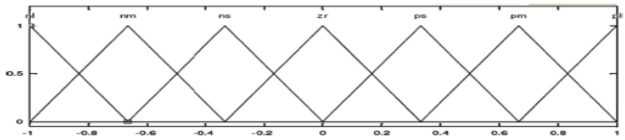
در ادامه‌ی روند این مقاله مباحث مربوط به انتخاب توابع عضویت از دیدگاه کاربرد در سیستم‌های الکتریکی به شرح زیر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بخش دوم به بررسی کنترل کننده‌های کلاسیک مبتنی بر منطق فازی اختصاص داده شده است. بخش‌های سوم و چهارم به ترتیب مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر و پایدارسازی سیستم‌های قدرت میباشد. بخش‌های پنجم تا هشتم به ترتیب کاربردهای کنترل فازی در حوزه کنترل فرکانس بار، مبدل‌ها، فیلترهای قدرت و توربین‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد و در ادامه بخش‌های نهم و دهم مربوط به خودروهای الکتریکی و موتورها می‌باشند و در پایان نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲- کنترل کننده‌های کلاسیک و فازی

کنترل‌کننده‌های کلاسیک (تناسبی، انتگرالی، مشتق گیر) PID یکی از پرکاربرد ترین کنترل کننده‌ها در اتوماسیون صنعتی و فرایندهای کنترل هستند. از مهم ترین دلایلی که باعث استفاده‌ی گسترده این کنترل کننده در صنعت و همچنین جلب توجه محققان به این کنترل کننده شده است، می‌توان به سادگی طراحی، اجرا، هزینه‌ی پایین در اجرا و نگهداری و همچنین عملکرد مناسب برای سیستم‌های خطی اشاره کرد اما در کنار این مزایای قابل توجه این کنترل کننده در کنار سیستم‌های غیر خطی، سیستم‌های خطی مرتبه بالا، سیستم‌های همراه با تأخیر و همچنین سیستمهای پیچیده اجرای مناسبی از خود نشان نمی‌دهند[۷].

ویژگی‌های خاص این کنترل‌کننده باعث شده محققان همواره برای بهبود عملکرد این کنترل کننده روش‌هایی ارائه دهند. عموما این روش‌ها بر اساس باز تنظیم پارامترهای ضریب تناسبی (Kp)، ضریب انتگرال گیر (Ki) و ضریب مشتق‌گیر (Kd) متناسب با شرایط لحظه‌ای سیستم است. یکی از روش‌های مورد توجه محققان استفاده از کنترل‌کننده فازی یا ترکیبی از کنترل‌کننده فازی با دیگر روش‌های متداول در کنار کنترل-کننده PID است. اما با توجه به ماهیت کنترل‌کننده‌های PID استفاده از چه توابع عضویتی مناسب ترین انتخاب برای عملکرد قابل قبول کنترل‌کننده فازی در کنار این کنترل‌کننده است. در این قسمت مروری بر انتخاب توابع عضویت سیستم فازی در کنار کنترل‌کننده PID انجام شده است.

یکی از توابع عضویتی که برای کنترل‌کننده فازی در کنار PID بیشتر مورد توجه بوده است، استفاده از توابع مثلثی و کاملا متقارن در ورودی و خروجی می‌باشد. در کنترل‌کننده‌های F-PID[۴] آنجا که منطق فازی به طور مستقیم برای باز تنظیم ضرائب کنترل کننده PID مورد استفاده قرار می‌گیرد عموما ورودی‌های کنترل کننده خطا و نرخ تغییرات آن است و بازه تغییرات [۱، ۱-] برای آن در نظر گرفته می‌شود. مراجع [۳, ۴] برای بهینه سازی کنترل کننده PID ترکیب روش‌های فازی و کنترل کننده مرتبه کسری را به کار برده‌اند و در مرجع [۲] از کنترل تطبیقی و فازی برای بهبود کنترل‌کننده PID استفاده نموده است. ساختار فازی پیشنهاد شده در این مقالات از توابع عضویت مثلثی و کاملا متقارن با بازه [۱،۱-] و هفت برچسب (شکل۱) استفاده شده است. مرجع [۸] برای تخمین گین دینامیک سیستم غیر خطی از کنترل‌کننده فازی چند لایه تطبیقی استفاده نموده که بازه پیاده سازی توابع عضویت مشابه قبل بوده ولی تعداد برچسب‌ها متفاوت است.

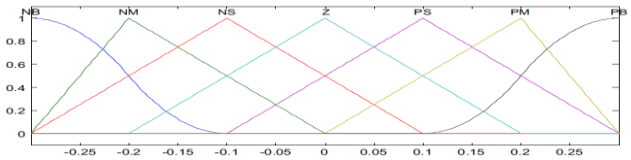


شکل (۱): توابع عضویت ورودی و خروجی در مرجع [۲]

مرجع [۹] از دو ساختار فازی برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID استفاده نموده است، اولین کنترل‌کننده فازی وظیفه‌ی ایجاد پارامتری برای باز تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID را بر عهده دارد و کنترل‌کننده فازی دوم وزن قوانین کنترل کننده فازی اول را باز تنظیم می‌نماید. در این روش کنترل‌کننده فازی اول از توابع عضویت مثلثی در ورودی و تابع میله‌ای در خروجی استفاده نموده و دومین کنترل‌کننده دارای توابع مثلثی در ورودی و خروجی است، بازه تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها در این دو کنترل‌کننده [۱،۱-] در نظرگرفته شده است. استفاده از تابع عضویت مثلثی و میله‌ای به ترتیب برای ورودی و خروجی در مراجع دیگر [۱۲-۱۰] نیز قابل مشاهده می‌باشد.

در مواردی دیگر از ترکیب توابع عضویت مختلف برای ساختار فازی استفاده شده است. مرجع [۱۳] در کنترل کننده PID از منطق فازی و کنترل کننده مرتبه‌ی متغییر کسری[۵] استفاده نموده، مطابق شکل (۲) در این روش توابع عضویت، ترکیبی (مثلثی-گوسی) با هفت برچسب در ورودی و خروجی و بازه [۰,۳ ،۰,۳-] هستند. مرجع[۱۴] نیز در کنترل-کننده F-PID پیشنهادی برای ورودی و خروجی از ترکیب مثلثی ذوزنقه‌ای با هفت برچسب در بازه [۱،۱-] استفاده نموده است. و در نهایت کنترل‌کننده فازی پیشنهاد شده در مرجع [۷] در ورودی و خروجی دارای توابع عضویت ذوزنقه‌ای، با دو برچسب در ورودی و چهار برچسب در خروجی است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



شکل (۲): توابع عضویت ورودی در مرجع [۱۳]

در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های تکاملی[۶] برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته و پیوسته به وفور مورد استفاده قرار گرفته [۱۵]، یکی از کاربردهای این الگوریتم‌ها، بهینه‌سازی کنترل‌کننده فازی در کنار کنترل‌کننده PID است. مرجع [۱۶] الگوریتم بهینه‌سازی معلم[۷] را در کنار کنترل‌کننده F-PID[۸] به‌کاربرده، مرجع [۱۷] از الگوریتم جستجوی الگو و بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۹] در کنار کنترل‌کننده F-PI[۱۰]، مرجع [۱۸] از الگوریتم بهینه سازی غذایابی باکتری[۱۱] در کنترل‌کننده FOF-PID[۱۲] و مرجع [۱۹] از الگوریتم کرم شب‌تاب[۱۳] در کنار کنترل‌کننده F-PID بهره برده است. در تمامی موارد فوق در ورودی و خروجی از توابع عضویت ترکیبی (مثلثی-ذوزنقه‌ای) با پنج برچسب و در بازه [۱، ۱-] استفاده شده است.

مرجع [۲۰] از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری[۱۴] در کنار کنترل‌کننده F-PI استفاده نموده که توابع عضویت ورودی ترکیب مثلثی ذوزنقه‌ای می‌باشند ولی خروجی آن توابع میله‌ای است. مراجع [۲۱، ۲۲] نیز به ترتیب از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده F-PID استفاده کرده‌اند که توابع عضویت انتخابی در آنها برای ورودی و خروجی به صورت مثلثی با هفت برچسب و در بازه [۱،۱-] است.

۳- انرژی‌های تجدید پذیر

با پیشرفت‌های صنعتی و تولیدی در قرن گذشته، نیاز به استفاده از انرژی نیز متناسب با آن افزایش یافته است [۲۳]. کاهش منابع انرژی طبیعی و سوخت‌های فسیلی از یک سو و نگرانی‌ها نسبت به آلودگی‌های زیست محیطی استفاده از این سوخت‌ها از سوی دیگر باعث ایجاد نیاز به جستجوی منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی، انرژی باد و...) شده است [۲۴]. پیشرفت تکنولوژی در سال‌های اخیر، افزایش بهره وری و کاهش هزینه‌های استفاده از این منابع انرژی باعث گسترش سریع استفاده از این انرژی‌ها شده است [۲۵]. در این بخش به بررسی توابع عضویت انتخابی در سیستم‌های انرژی خورشیدی، انرژی بادی و استفاده‌ی ترکیبی از منابع انرژی پرداخته خواهد شد.

۳-۱- انرژی خورشیدی

بررسی مقالات نشان می‌دهد عمده اهداف کنترلی که برای سیستم‌های انرژی خورشیدی در نظر گرفته می‌شود بهبود بهره‌وری، ردیابی حد اکثر توان و همچنین پایداری (یا تنظیم) فرکانس شبکه متصل به مزرعه‌های خورشیدی می‌باشند. برای هر یک از این اهداف کنترلی و نقش کنترل‌کننده فازی در آن، ورودی‌های مختلفی برای ساختار فازی درنظرگرفته‌شده‌است ولی با یک نگاه کلی می‌توان به این نکته اشاره کرد که برای هدف بهبود بهره‌وری و ردیابی حداکثر توان معمولا ورودی سیستم فازی، خطا (خطای تعریف شده بر حسب مشخصه‌های P-،P-I I-V،V) و تغییرات خطا است و برای کنترل فرکانس شبکه، معمولا میزان خطای فرکانس یکی از ورودی‌های کنترل کننده فازی می‌باشد.

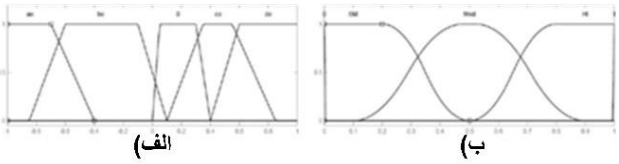
یکی از اشکال پر کاربرد توابع عضویت در مقالات مربوط به انرژی خورشیدی استفاده ترکیبی از توابع عضویت مثلثی-ذوزنقه‌ای در ورودی و خروجی است.

مرجع [۲۶] از کنترل کننده فازی تک ورودی پایدار برای بهبود بهره‌وری سیستم خورشیدی استفاده نموده است که در آن توابع عضویت ورودی و خروجی ترکیبی (مثلثی-ذوزنقه‌ای)، دارای پنج برچسب و بازه [۱۰،۱۰-] و [۱،۱-] هستند. مرجع [۲۷] برای کنترل سیستم خورشیدی متصل به شبکه از روش فازی در کنار مد لغزشی استفاده نموده است که دارای ترکیب توابع عضویت اشاره شده و هفت برچسب در ورودی و خروجی است. مرجع [۲۸] از کنترل قدرت مستقیم پیش بین فازی[۱۵] برای سیستم خورشیدی متصل به شبکه استفاده نموده که ساختار فازی آن کاملا مشابه ساختار پیشنهادی در مرجع قبلی است. مرجع [۲۹] نیز در سیستم مستقل خورشیدی از کنترل‌کننده فازی برای ردیابی حد اکثر توان استفاده نموده است که دارای همین نوع توابع عضویت و پنج برچسب در ورودی و خروجی می‌باشد.

یکی دیگر از توابع عضویت پرکاربرد در مقالات مربوط به انرژی خورشیدی تابع عضویت مثلثی می‌باشد مانند مرجع [۳۰] که از الگوریتم کنترل فازی نامتقارن[۱۶] برای سیستم خورشیدی متصل به شبکه استفاده‌نموده است که توابع عضویت آن به فرم مثلثی و با هفت برچسب در ورودی و خروجی هستند. مرجع [۳۱] به منظور ردیابی حداکثر توان از توابع مثلثی با یازده و هفت برچسب و بازه [۱،۰] [۰/۱، ۰/۳-] در ورودی و از همین توابع عضویت با بیست و یک برچسب در محدوده‌ی [۰/۵، ۰/۵-] در خروجی استفاده نموده است. مرجع [۳۲] نیز با همین هدف کنترلی برای سیستم خورشیدی متصل به شبکه از روش عصبی-فازی استفاده می‌نماید. کنترل‌کننده فازی مورد استفاده در این مرجع دو ورودی یک خروجی می‌باشد که یک ورودی و خروجی آن از توابع مثلثی و دیگر ورودی از توابع ترکیبی اشاره شده استفاده نموده است، تمامی ورودی‌ها و خروجی دارای سه برچسب می‌باشند. همین نویسنده در مرجع [۳۳] مدل سازی، کنترل و شبیه سازی سیستم خورشیدی و باتری متصل به شبکه را ارائه می‌دهد که کنترل‌کننده استفاده شده در آن کاملا مشابه کار پیشین است.

در مقالات بررسی شده مرتبط با انرژی خورشیدی توابع عضویت دیگری نیز وجود دارد که نسبت به توابع عضویت ذکر شده کمتر مورد استفاده واقع شده‌اند از جمله این توابع می توان به تابع عضویت گوسی، ترکیبی (گوسی-سیگموئید) و پی شکل[۱۷] (شکل ۳) اشاره کرد که به ترتیب در مراجع [۳۴-۳۶] به کار برده شده‌اند.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



شکل (۳): توابع عضویت مرجع [۳۶]، الف) ورودی ب)خروجی

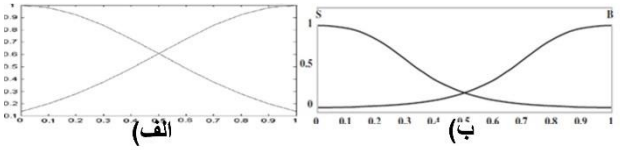
۳-۲- انرژی بادی

یکی دیگر از روش‌های تولید انرژی پاک، تبدیل انرژی موجود در جریان هوا به الکتریسیته است. با پیشرفت تکنولوژی ساخت توربین‌های بادی، استفاده از این منبع انرژی نیز افزایش یافته است. ازجمله این پیشرفت‌ها می‌توان به تولید سیستم‌های مبدل بادی با سرعت متغییر[۱۸] اشاره کرد که به دلایلی چون امکان استخراج بهینه‌ی انرژی باد در سرعت‌های مختلف، کاهش لرزش‌ها به دلیل حذف افزاینده‌ی سرعت[۱۹]، بهبود پایداری و کاهش هزینه‌های نگهداری همواره بیش از سیستم‌های با سرعت ثابت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳۷]. با توجه به این پیشرفت‌ها و ساخت توربین‌هایی با ظرفیت بالا، روش‌های کنترل این سیستم‌ها نیز توسعه یافته است، در این میان می‌توان به روش‌های کلاسیک و هوش محاسبتی (از جمله روش فازی) اشاره نمود [۳۸].

در ارتباط با این موضوع، اهداف کنترلی که در آن از کنترل‌کننده‌ی فازی برای تبدیل انرژی باد استفاده شده است می‌توان به مواردی چون استخراج توان با قابلیت اطمینان بالا، بهبود راندمان، کاهش هزینه‌ها و کاهش نوسانات اشاره نمود. این اهداف در شرایط مختلفی چون قطعیت و عدم قطعیت بار و توان تولیدی، همچنین با توربین‌هایی با ساختارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. عموما ورودی ساختار فازی در این مقالات خطا و تغییرات آن می‌باشد، که متناسب با هدف مورد نظر طراح، این خطا تعریف و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مقالات مربوط به انرژی بادی طراحان بیشتر علاقه‌مند به استفاده از توابع عضویتی با تغییرات ملایم مانند توابع عضویت گوسی و زنگوله‌ای می‌باشند.

مرجع [۲۴] از قابلیت کنترل خطای سراسری[۲۰] و منطق فازی برای بهبود عملکرد ژنراتورهای القایی تغذیه دوبل در مزرعه‌های بادی[۲۱] استفاده می‌کند. در این مقاله کنترل‌کننده فازی پیشنهادی، تک ورودی تک خروجی، دارای سه برچسب و بازه [۱،۱-] است، و دارای توابع عضویت گوسی در ورودی و خروجی است. مرجع [۳۹] برای گرفتن بیشینه توان از انرژی باد و حذف هارمونیک‌های ولتاژ از کنترل‌کننده فازی در کنار روش مد لغزشی استفاده می‌نماید که توابع عضویت ورودی و خروجی آن گوسی و دارای هفت برچسب در ورودی و خروجی هستند. مرجع [۳۷] کنترل کننده F-PI را برای گرفتن بیشینه توان انرژی باد مورد استفاده قرار می‌دهد و مرجع [۴۰] از کنترل‌کننده "فازی بهره-برنامه‌ریزی تغییرات خطا"[۲۲] برای کنترل توربین بادی استفاده می‌کند، در این دو مقاله در ورودی از توابع مثلثی با هفت برچسب و بازه [۱،۱] استفاده شده است و در خروجی تابع زنگوله‌ای با دو برچسب و بازه [۱، ۱-] به کار برده شده است. (اگر چه این دو کنترل کننده به لحاظ نوع توابع، بازه و تعداد برچسب مشابه هستند ولی به لحاظ تعداد ورودی و پارامترهای توابع عضویت خروجی دارای تفاوت‌هایی می‌باشند) شکل (۴) توابع عضویت خروجی استفاده شده در این دو مقاله را نشان می‌دهد.



شکل (۴): توابع عضویت خروجی الف) مرجع [۴۰] ب) مرجع [۳۷]

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، تابع عضویت مثلثی نیز در مقالات مرتبط به انرژی بادی زیاد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مانند مرجع [۴۱] که یک کنترل‌کننده فازی برای محافظت از ژنراتور القایی تغذیه دوبل[۲۳] هنگام بروز خطا پیشنهاد می‌دهد که توابع عضویت آن مثلثی، دارای هفت برچسب در بازه [۱، ۱-] برای ورودی و خروجی هستند. مرجع [۲۳] برای کنترل توان توربین بادی از کنترل‌کننده فازی با توابع عضویت مثلثی متقارن با پنج برچسب در ورودی‌ها، هفت برچسب در خروجی و بازه [۱، ۱-] استفاده می‌کند. مرجع [۴۲] با توجه به عدم قطعیت میزان بار درخواستی و میزان باد، برای بهبود بهره‌وری انرژی از فازی و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات خود-تطبیق فراگیر[۲۴] استفاده می‌کند که کنترل‌کننده فازی آن دارای توابع عضویت فوق الذکر با سه برچسب در ورودی‌ها و خروجی و به صورت کاملا متقارن است. مرجع [۴۳] در کنترل سیستم‌های تبدیل انرژی بادی از کنترل‌کننده تطبیقی F-PI بهره می‌برد که توابع عضویت آن مانند دو مقاله‌ی پیشین مثلثی، کاملا متقارن، با هفت برچسب و بازه [۱، ۱-] است.

ترکیب توابع عضویت مثلثی-ذوذنقه‌ای نیز در مقالات مرتبط با انرژی بادی مانند مراجع [۲۵] و [۴۴] قابل مشاهده می باشد اما این شکل توابع عضویت نسبت به موارد پیشین کمتر مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۲- مدیریت انرژی و دیگر انرژی‌های پاک

وابستگی انرژی‌های تجدیدپذیر به شرایط محیطی و راندمان پایین این منابع باعث می‌شود که عموماً از چند منبع انرژی در کنار سیستم-های قدرت ترکیبی شامل انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده شود. مسئله‌ی اصلی در چنین سیستم قدرت ترکیبی، مدیریت انرژی می‌باشد، به نحوی که تغذیه‌ی بار تضمین شود و منبع ذخیره همواره شارژ نگه داشته شود تا در شرایط خاص از آن استفاده گردد [۴۵]. برای کنترل چنین سیستم قدرتی معمولا از روش‌های منطقی یا هوشمند استفاده می‌گردد که در میان روش‌های هوشمند، کنترل فازی همواره مورد توجه محققان بوده است.

در ارتباط با موضوع مدیریت منابع انرژی بیشترین استفاده از توابع عضویت مثلثی به تنهایی یا ترکیب مثلثی و ذوزنقه‌ای می‌باشد.

مرجع [۴۶] مدیریت انرژی در مصارف خانگی شامل سیستم ترکیبی انرژی باد، خورشید و منبع ذخیره‌ی انرژی را با استفاده از

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

کنترل‌کننده فازی چند ورودی چند خروجی اجرا نموده است. این کنترل‌کننده فازی دارای توابع عضویت مثلثی، با سه برچسب و بازه [۱، ۰] در ورودی و خروجی است. مراجع [۴۷، ۴۸] مدیریت انرژی را به ترتیب برای سیستم سلول سوختی، انرژی خورشیدی و سلول سوختی، انرژی خورشیدی، منبع ذخیره اجرا نموده‌اند. این دو مرجع هر دو از توابع عضویت مثلثی با هفت برچسب در ورودی استفاده نموده‌اند، در خروجی نیز همین توابع عضویت ولی با تعدادبرچسب متفاوت به کار برده‌اند. مرجع [۴۷] یازده برچسب و مرجع [۴۸] هفت برچسب.

مرجع [۴۹] برای بهبود ردیابی حداکثر توان پیل سوختی غشای تبادل پروتون[۲۵] از توابع عضویت ترکیبی(مثلثی-ذوزنقه‌ای) با پنج برچسب در ورودی و خروجی استفاده نموده است، همچنین مرجع [۵۰] برای کاهش مصرف انرژی در زمان اوج مصرف و مرجع [۵۱] برای کنترل غیر متمرکز توان راکتیو سیستم انرژی بادی-خورشیدی از همین ترکیب توابع عضویت استفاده نموده‌اند.

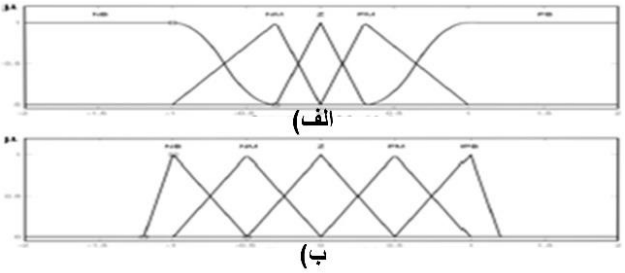
۴- پایدار سازی سیستم قدرت

تغییرات شرایط ورودی و خروجی در سیستم‌های قدرت معمولاً باعث بروز نوسانات فرکانس پایین در این سیستم‌ها می‌شود، این فرکانس‌ها با گذشت زمان کاهش پیدا کرده و از بین می‌روند، اما گاهی این نوسانات تشدید شده و باعث بروز خاموشی می‌گردند، لذا یک سیگنال مکمل به سیستم تحریک ژنراتور همزمان[۲۶] افزوده می‌شود تا از بروز خاموشی به علت نوسانات فرکانس پایین جلو گیری کند[۵۲]. در گذشته برای دست یابی به این امر از روش‌های مختلفی مانند کنترل کننده‌ی PID، PI، پیشفاز-پسفاز[۲۷]، کنترل مقاوم و... استفاده گردیده است اما با توجه به مزایای کنترل‌کننده‌ی فازی و کاربرد گسترده‌ی آن در صنایع مختلف، استفاده از این کنترل کننده به منظور پایدارسازی سیستم‌های قدرت نیز مورد توجه محققان گرفته است که اطلاعات پایگاه داده‌ی تعدادی از این مقالات بررسی می‌گردد.

توابع عضویت به کار برده شده برای سیستم‌های قدرت عموما مثلثی می‌باشند و در مواردی این تابع عضویت با توابع عضویت سیگموئید یا ذوزنقه‌ای ترکیب شده است.

مرجع [۵۳] مدلی برای پایداری ولتاژ DSTATCOM[۲۸] (ابزاری بر اساس عملکرد مبدل‌ها برای اعمال ضریب توان دلخواه) ارائه می‌دهد که با کنترل کننده F-PI جریان سیستم پایدار سازی می‌شود. این کنترل کننده فازی مطابق شکل (۵) دارای توابع عضویت ترکیبی (سیگموئید-مثلثی) در ورودی و توابع عضویت مثلثی در خروجی است که با پنج برچسب و بازه‌ی [۲، ۲-] تعریف می‌شوند.

مرجع [۵۴] کنترل‌کننده فازی را برای پایداری و سازگاری بالای ریز شبکه مورد استفاده قرار می‌دهد که دارای توابع عضویت ترکیبی (مثلثی-ذوزنقه‌ای) در ورودی و مثلثی در خروجی است که همگی دارای پنج برچسب می‌باشند. مرجع [۵۲] پایدار سازی سیستم قدرت را بر اساس منطق فازی و با استفاده از فیدبک خروجی و کنترل‌کننده PD انجام داده است. در این مرجع ساختار فازی در ورودی و خروجی دارای توابع عضویت ترکیبی (مثلثی-ذوزنقه‌ای) با پنج برچسب و بازه‌ی [۱، ۱-] می‌باشد. مرجع [۵۵] از الگوریتم جستجوی هارمونیک شبه-مخالف[۲۹] و کنترل کننده فازی برای پایدار سازی فرکانسی سیستم قدرت ترکیبی ایزوله شده[۳۰] استفاده نموده است. کنترل کننده فازی به کار برده شده در این مرجع دارای توابع عضویت ترکیبی (مثلثی-ذوزنقه‌ای) با هفت برچسب در ورودی و خروجی است.



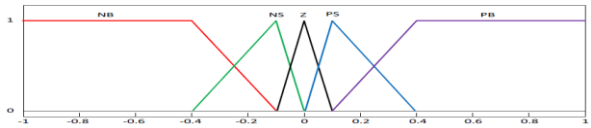
شکل (۵): توابع مرجع [۵۳]، الف) ورودی‌ها ب) خروجی

دیگر تابع عضویتی که در بحث پایدارسازی مورد استفاده قرارگرفته شده تابع عضویت مثلثی است مانند مرجع [۵۶] که با هدف پایدارسازی سیستم قدرت از تابع عضویت مثلثی با هفت برچسب و محدوده[۱،۱-] در ورودی و خروجی استفاده نموده است.

۵- کنترل فرکانس بار

در سیستم‌های قدرت برای اینکه فرکانس سیستم از مقدار نامی منحرف نشود، باید بین میزان توان تولیدی و بار تقاضا شده‌ی کل همخوانی وجود داشته باشد. از آنجا که در این سیستم‌ها تقاضای بار به صورت لحظه‌ای تغییر می‌کند، ثابت نگه داشتن فرکانس سیستم در مقدار نامی نیاز به کنترل دارد [۵۹-۵۷]. برای دست یابی به این هدف از روش‌های کلاسیک، الگوریتم‌های بهینه سازی، کنترل فازی و دیگر روش‌های هوشمند استفاده شده است [۶۰]. با توجه به ماهیت سیستم-های قدرت و تغییرات مداوم در سطح بار، برای رسیدن به پاسخ مناسب معمولا از ترکیب روش‌های فوق استفاده گردیده است که در این بخش به بررسی چگونگی استفاده از توابع عضویت، در این مقالات خواهیم پرداخت.

ترکیب توابع عضویتی که مقالات مربوط به کنترل فرکانس بار زیاد از آن بهره برده‌اند، ترکیب مثلثی-ذوزنقه‌ای می‌باشد. خصوصا روش به کار برده شده در شکل (۶)، که در مقالات متعدد دقیقا همین ترکیب مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۶): توابع عضویت ورودی و خروجی مراجع [۵۷]، [۵۹] و[۶۱]

مرجع [۶۲] بر اساس منطق فازی کنترل فرکانس بار را برای سیستم قدرت ترکیبی ایزوله شده اجرا نموده است که توابع عضویت

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

آن در ورودی و خروجی ترکیبی (مثلثی ذوزنقه‌ای)، دارای سه برچسب و بازه [۱، ۱-] می‌باشند. در مرجع‌های [۵۷] و [۶۱-۵۹] کنترل فرکانس بار بر اساس منطق فازی برای سیستم‌های قدرت چند منطقه‌ای و دارای منابع متعدد، با الگوریتم‌های تکاملی مختلف و با کنترل کننده‌های PID اجرا شده است که ساختار فازی آن در تمامی این مراجع دارای توابع عضویت ترکیبی (مثلثی-ذوزنقه‌ای) با پنج برچسب و بازه [۱،۱-] در ورودی و خروجی می‌باشد.

شکل دیگر توابع عضویت که در مقالات مربوط به کنترل فرکانس بار مورد استفاده قرار گرفته است ولی نسبت به توابع ترکیبی (مثلثی-ذوزنقه‌ای) دفعات کاربرد آن کمتر می‌باشد، تابع عضویت مثلثی به تنهایی در ورودی و خروجی است.

مرجع [۶۳] کنترل فرکانس بار را بر اساس منطق فازی قطبی[۳۱] اجرا نموده و با رویکرد الگوریتم ژنتیک، قدرت تطبیق آن را بهبود بخشیده است. ساختار فازی به‌کار برده شده در این مرجع تک ورودی تک خروجی، دارای توابع عضویتی مثلثی، با دو برچسب در ورودی و خروجی است. مرجع [۶۴] به معرفی کنترل‌کننده LQR-F[۳۲] پرداخته است که برای کنترل فرکانس بار با پاسخ تقاضای متغییر مورد استفاده قرار گرفته است، ساختار فازی این کنترل‌کننده دارای توابع عضویت مثلثی با سه برچسب در ورودی و خروجی است، همچنین مرجع [۶۵] کنترل فرکانس بار چند منطقه‌ای را توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با قوانین فازی اجرا نموده است که این کنترل‌کننده فازی نیز دارای توابع عضویت فوق با هفت برچسب در ورودی و خروجی است.

از دیگر توابع عضویتی که در ساختار فازی با هدف کنترل فرکانس بار مورداستفاده‌قرارگرفته‌اند می‌توان به توابع گوسی در ورودی و خروجی [۵۸]، و توابع مثلثی در ورودی و میله‌ای در خروجی [۶۶، ۶۷] اشاره‌کرد.

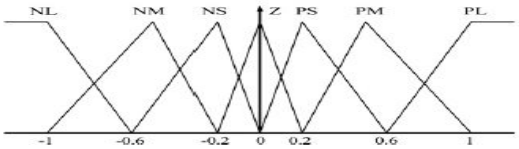
۶- مبدل‌ها

با توسعه‌ی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در دهه‌ی اخیر، منابع تولید پراکنده رشد چشم گیری داشته‌اند. اما خروجی این منابع به شرایط محیطی وابسته است و نمی‌توان توان تولید شده توسط این منابع را به طور مستقیم به شبکه اعمال نمود. برای حل این مشکل از مبدل‌ها برای بهبود ضریب کیفیت[۳۳]، اعمال کمترین اعوجاج هارمونیک کل[۳۴] به شبکه و... استفاده می‌شود[۷۱-۶۸]. در حقیقت مبدل‌ها کیفیت توان تولید شده توسط منابع تجدید پذیر را بهبود بخشیده و آن را متناسب با استانداردهای IEEE شبکه می‌نمایند [۷۱]. با رشد منابع تولید پراکنده در سال‌های اخیر، توسعه و بهبود مبدل‌ها بیش از پیش مورد توجه محققان قرارگرفته‌است. لذا برای کنترل مبدل‌ها روش‌های هوشمند و البته کنترل فازی نیز مورد استفاده قرارگرفته‌است که به چگونگی انتخاب اطلاعات پایگاه داده‌ی تعدادی از این مقالات می‌پردازیم.

استفاده از تابع عضویت میله‌ای در خروجی باعث کاهش بار محاسباتی سیستم و افزایش سرعت کنترل‌کننده می‌شود. در مقالات مربوط به کنترل مبدل‌ها از این روش به‌کرات استفاده شده است.

مرجع [۶۹] براساس کنترل‌کننده فازی مبدل باک-بوست غیرمعکوسی طراحی و تحلیل می‌نماید که توابع عضویت ورودی آن گوسی، دارای دو برچسب و بازه [۱،۰] هستند وخروجی آن دارای تابع عضویت میله‌ای می‌باشد. مرجع [۷۰] توسط کنترل‌کننده فازی و جریان ورودی پیش‌بین، مبدلی با ضریب توان واحد طراحی‌نموده‌است که توابع عضویت ساختار فازی آن در ورودی مثلثی، دارای پنج برچسب و بازه [۸، ۸-] است و در خروجی از توابع میله‌ای با پنج برچسب استفاده شده‌است. مرجع [۷۱] نیز با استفاده از کنترل‌کننده فازی از مبدل‌های چندمنظوره در اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه استفاده‌نموده که توابع عضویت ورودی آن مثلثی دارای پنج برچسب و در محدوده[۹،۹-] هستند و توابع عضویت خروجی آن میله‌ای و دارای سه برچسب می‌باشند.

ترکیب توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای در مواردی مانند مرجع‌های [۶۸] و [۷۲] برای کنترل مبدل‌ها موردتوجه طراحان بوده است (شکل ۷) و اشکال دیگر تابع عضویت که کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند تابع عضویت مثلثی [۷۳] و گوسی [۷۴] در ورودی و خروجی می‌باشند.



شکل (۷): توابع عضویت وروردی و خروجی در مرجع [۶۸]

۷- فیلترهای قدرت و انتقال

در سال‌های اخیر با افزایش استفاده از تجهیزاتی مانند درایوهای موتور با قابلیت تنظیم سرعت، یکسوکننده‌های قدرت استاتیک و ادوات الکترونیک قدرت در بخش صنعت، موضوع جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان بیشتر مورد توجه محققان قرارگرفته است. ادوات فوق که بارهای غیرخطی می‌باشند با اتصال به شبکه باعث بروز هارمونیک‌های جریان می‌شوند که این هارمونیک‌ها بر شکل موج ولتاژ و جریان شبکه تأثیر گذاشته و باعث کاهش ضریب قدرت می‌شوند[۷۷-۷۵]. با گسترش کاربرد کنترل‌کننده‌های فازی در شاخه‌های مختلف، استفاده از این کنترل‌کننده برای فیلترهای قدرت فعال[۳۵] نیز مورد توجه محققان قرار گرفته است. همچنین پاسخ بهتر این کنترل‌کننده‌ها در مقایسه با کنترل‌کننده‌های کلاسیک PI در ارتباط با فیلترهای قدرت فعال موجب شد مقالاتی در این زمینه انتشار یابد[۷۷-۷۵].

مرجع [۷۵] فیلتر توان اکتیو سه فاز چهار سیمه را به صورت زمان حقیقی با استفاده از کنترل‌کننده PI و فازی اجرا نموده است که ساختار فازی آن در ورودی و خروجی دارای توابع عضویت مثلثی با هفت برچسب و بازه [۱،۱-] است. مرجع [۷۶] نیز طراحی و اجرای زمان حقیقی فیلتر توان اکتیو تک فاز را توسط کنترل‌کننده فازی سوئیچ شده اجرا نموده است که در ورودی کنترل‌کننده فازی، توابع عضویت ترکیبی (مثلثی- ذوزنقه‌ای) با سه برچسب و محدوده‌ی [۱،۱-] به‌کار برده شده و خروجی دارای تابع میله‌ای با دو برچسب و بازه [۱،۰] است.

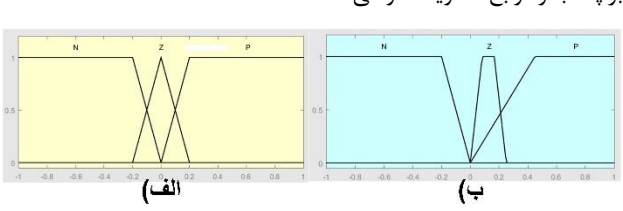
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

مرجع [۷۷] کنترل فیلتر اکتیو شانت[۳۶] را توسط منطق فازی با توابع عضویت مختلف (ذوزنقه‌ای، مثلثی و گوسی) به‌صورت زمان حقیقی اجرانموده و به این نتیجه رسیده است که سیستم با توابع عضویت گوسی فیلتری با بیشترین حذف هارمونیک‌ها و کمترین اعوجاج در خروجی را نتیجه می‌دهد.

۸- توربین‌ها

همراه با پیشرفت و توسعه‌ی نیروگاه‌های تولید انرژی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی، آبی و خورشیدی متمرکزشده[۳۷]، بهبود بهره‌وری و قابلیت اطمینان توربین‌ها نیز موردتوجه محققان قرار گرفته‌است. به‌طورکلی مهم‌ترین وظیفه‌ی توربین‌ها تنظیم توان خروجی تولیدی و ردیابی[۳۸] فرکانس شبکه می‌باشد و از آنجا که انرژی‌های تجدید پذیر وابسته به شرایط محیط می‌باشند، دستیابی به دو وظیفه‌ی فوق در این نیروگاه‌ها دارای اهمیت بیشتری نسبت به نیروگاه‌های سوخت فسیلی است[۷۸،۷۹]. علاوه بر موارد فوق بهبود کیفیت کنترل توربین‌ها ارتباط مستقیمی با پایداری، امنیت و عملکرد اقتصادی نیروگاه‌ها دارد. با توجه به اینکه سیستم حاکم بر توربین یک سیستم غیرخطی ترکیبی می‌باشد و با توجه به عملکرد ضعیف کنترل-کننده‌های کلاسیک مانند PID ها در مواجهه با سیستم‌های غیرخطی، در مواردی محققان از کنترل‌کننده‌ی فازی برای بهبود عملکرد این کنترل‌کننده‌ها بهره‌برده‌اند[۸۰].

مرجع [۷۸] در سیستم کنترل توربین هیدرولیکی از کنترل‌کننده فازی- مدلغزشی استفاده نموده است که ساختار فازی آن مطابق شکل (۸) تک ورودی تک خروجی، دارای توابع عضویت ترکیبی (مثلثی-ذوزنقه‌ای) با سه برچسب در ورودی است و در خروجی دارای همین تعداد برچسب و توابع عضویت ذوزنقه‌ای است. مرجع [۷۹] کنترل کننده PID باز تنظیم شده بر اساس منطق فازی را برای کنترل توربین بخار نیروگاه خورشیدی متمرکز مورد استفاده قرار می‌دهد که فازی کنترل-کننده آن دارای توابع عضویت ترکیبی (مثلثی-ذوزنقه‌ای) با سه برچسب در ورودی و خروجی است. مرجع [۸۰] در کنترل توربین هیدرولیکی غیرخطی، الگوریتم جستجوی گرانشی[۳۹] و کنترل‌کننده‌ی فازی PID به کار برده است که دارای توابع عضویت ترکیبی (تابع S – مثلثی – تابع Z) با هفت برچسب در ورودی است و در خروجی دارای همین تعداد برچسب و توابع عضویت گوسی است.



شکل (۸): توابع عضویت مرجع [۷۸]، الف) ورودی، ب) خروجی

۹- خودروهای الکتریکی و ترکیبی[۴۰]

مبحث دیگری که همواره مورد توجه محققان بوده است، موضوعات مختلف در زمینه‌ی خودروهای الکتریکی و ترکیبی هستند[۸۱]. آلودگی ناشی از استفاده‌ی سوخت‌های فسیلی در خودروهای کلاسیک واثرات گازهای گلخانه‌ای ناشی از آن و همچنین توسعه‌ی استفاده از منابع تجدیدپذیر برای تولید الکتریسیته، بهبود بهره وری این منابع و کاهش هزینه‌های استفاده از این منابع از مهم‌ترین دلایل گسترش استفاده از خودروهای الکتریکی هستند[۸۲]. در ارتباط با موضوعات مورد توجه محققان در زمینه‌ی کنترل خودروهای الکتریکی و ترکیبی می‌توان به کنترل سیستم پیشران[۴۱]، بهبود بهره‌وری انرژی، هدایت خودرو، کنترل شارژ خودروهای متصل به شبکه، کنترل فرکانس شبکه‌ی شامل خودرو-های در حال شارژ و... اشاره نمود.

در ارتباط با این مباحث محققان از روش‌های مختلف و از جمله منطق فازی برای کنترل خودروهای الکتریکی استفاده‌نموده‌اند. در طراحی کنترل‌کننده‌ها عموما خطا به عنوان یکی از ورودی‌ها در نظر گرفته می‌شود لیکن از نکات قابل توجه جهت طراحی کنترل‌کننده به منظور هدایت خودرو، در نظر گرفتن شارژ خودرو، بهبود بهره وری یا کنترل فرکانس شبکه‌ی متصل به خودروهای الکتریکی، وضعیت شارژ باتری (SOC[۴۲]) و... مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین بازه در نظر گرفته شده برای این ورودی‌ها معمولا [۱، ۰] و یا [۱۰۰، ۰] میباشد.

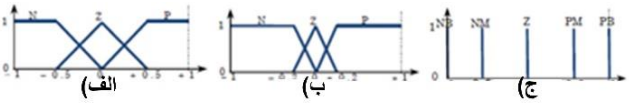
فرم توابع عضویت مثلثی-ذوزنقه‌ای در ورودی و خروجی در مقالات متعددی مربوط به کنترل خودروهای الکتریکی به کار برده شده است. مرجع [۸۳] برای بهبود کنترل جریان انرژی خودرو، از هفت برچسب برای ورودی و خروجی در بازه [۱، ۱-] استفاده کرده است. مرجع [۸۴] نیز با همین هدف کنترلی به ترتیب از سه و چهار برچسب برای ورودی‌ها و چهار برچسب برای خروجی خود استفاده نموده است. مرجع [۸۵] برای کنترل شارژ خودروهای الکتریکی متصل به شبکه از سه برچسب در ورودی‌ها و چهار برچسب در خروجی و مرجع [۸۶] به منظور مدل سازی ترمز احیاکننده‌ی خودرو از ترکیب توابع عضویت فوق با تعداد برچسب‌ها و بازه‌های متفاوت در ورودی و خروجی استفاده نموده است.

شکل دیگری از توابع عضویت که به کرات در مقالات مربوط به خودروهای الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است، ترکیب توابع عضویت مثلثی-ذوزنقه‌ای در ورودی و تابع میله‌ای در خروجی می‌باشد.

مرجع [۸۷] برای کنترل سیستم پیشران خودرو مطابق شکل (۹) در ورودی و خروجی به ترتیب از سه و پنج برچسب با بازه [۱، ۱-] استفاده نموده است. مرجع [۸۲] نیز با همین هدف کنترلی از هفت برچسب با بازه [۶، ۵-] در ورودی و نه برچسب با بازه [۱۰۰۰، ۱۰۰۰-] در خروجی استفاده نموده است. در مرجع [۸۸] همین نویسنده از ساختار فازی دیگری کمک گرفته تا توابع عضویت کنترل‌کننده فازی پیشنهاد شده در مرجع [۸۲] را به صورت لحظه‌ای باز تنظیم نماید. در مرجع [۸۹] نیز برای پایداری فرکانسی شبکه‌ی هوشمند متصل به خودروهای الکتریکی در حال شارژ از ترکیب روش‌های فازی و تطبیقی

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power- Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

استفاده شده است که کنترل کننده فازی آن دارای پنج و هفت برچسب برای دو ورودی و دو خروجی خود است. مراجع [۹۰، ۹۱] نیز به منظور هدایت خودرو از ترکیب توابع عضویت ذکر شده با تعداد برچسب و بازه-های متفاوت استفاده نموده‌اند.



شکل (۹): توابع عضویت مرجع [۸۷]، الف و ب) ورودی‌ها، ج) خروجی

ترکیب‌های توابع عضویتی که در ارتباط با موضوع خودروهای الکتریکی به نسبت موارد فوق کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل توابع عضویت مثلثی [۹۲، ۹۳] و ترکیب مثلثی-سیگموئید [۹۴] می-باشند.

۱۰- موتورهای الکتریکی

موتورهای الکتریکی یکی از پرکاربردترین تجهیزات مورد استفاده در صنایع مختلف هستند تا آن‌جا که می‌توان ادعا کرد بدون شک یک موتور الکتریکی در تولید یا در مراحل تولید هر محصول یا خدمتی که امروز استفاده نموده‌ایم وجود دارد [۹۵]. این موتورها درای انواع مختلفی بوده و هر کدام دارای ویژگی‌های خاص و کاربرد متناسب با آن می‌باشند. از انواع پرکاربرد موتورهای صنعتی می‌توان به موتورهای القایی، جریان مستقیم با جاروبک، جریان مستقیم بدون جاروبک و پله‌ای اشاره نمود. همچنین از اهداف کلی کنترلی که برای موتورهای الکتریکی در نظر گرفته می‌شود، می‌توان به کنترل سرعت، گشتاور، مکان، تعقیب، بهبود بهره‌وری، بهبود سرعت پاسخ و... اشاره کرد.

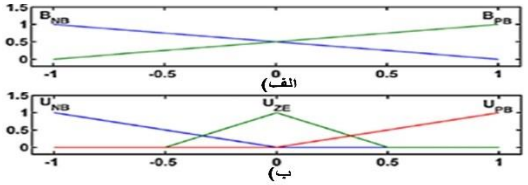
با توجه به این حجم کاربرد، تنوع موتورها و تنوع وظایف، کنترل این موتورها همواره مورد توجه محققان بوده است. بدون شک هرکدام از این اهداف کنترلی برای هرکدام از انواع موتورهای فوق از روش‌های فازی و دیگر روش‌های کنترلی، توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته-اند. در استفاده از کنترل‌کننده فازی برای کنترل موتورها عموما ورودی کنترل‌کننده خطا (خطای سرعت، گشتاور و مکان نسبت به مقدار مطلوب آن) و نرخ تغییرات آن می‌باشد.

بررسی مقالات نشان می‌دهد پر کاربرد ترین تابع عضویت مورد استفاده برای کنترل موتورهای الکتریکی توابع عضویت مثلثی می‌باشند. در این قسمت به مقالاتی اشاره خواهد شد که این تابع عضویت را به صورت کاملا متقارن مورد استفاده قرار داده‌اند.

مرجع [۹۶] برای کنترل سرعت موتور جریان مستقیم از ترکیب منطق فازی و کنترل‌کننده PI استفاده نموده است که ساختار کنترل-کننده فازی آن دارای هفت برچسب و بازه [۲۵۵، ۰] در ورودی و خروجی است. در مرجع [۹۷] یک مشاهده گر لیونبرگر[۴۳] رتبه کامل بر اساس منطق فازی برای کنترل یک طرفه موتور القایی خطی پیشنهاد داده شده است که ساختار فازی پیشنهادی آن مشابه مقاله‌ی قبل بوده با این تفاوت که بازه ورودی و خروجی [۱، ۱-] انتخاب شده است.

در مرجع [۹۵] از شبکه‌های هوش مصنوعی و منطق فازی در کنترل ترکیبی موتور القایی سه فاز بهره برده که کنترل‌کننده فازی آن دارای پنج برچسب و بازه [۱، ۱-] در ورودی و خروجی است. در مرجع [۹۸] به منظور پیش بینی خطای سیم پیچی موتور القایی از روش بهینه سازی فازی خاکستری[۴۴] و همچنین مرجع [۹۹] برای کنترل همین نوع موتور از ترکیب تئوری آشوب[۴۵]، منطق فازی و کنترل‌کننده PI استفاده نموده است که در ساختار کنترل‌کننده فازی آن از تابع عضویت مثلثی و متقارن در ورودی و خروجی ولی با تعداد برچسب و بازه‌های متفاوت استفاده شده است.

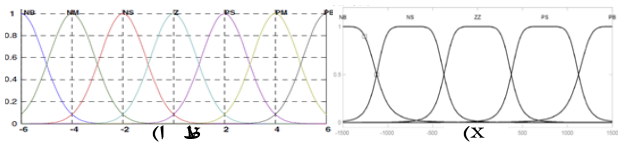
مقالاتی نیز تابع عضویت مثلثی را به صورت نامتقارن در ورودی یا خروجی به کاربرده‌اند مانند مرجع [۱۰۰] که برای کنترل سرعت موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، از ترکیب منطق فازی و کنترل‌کننده PID که تابع عضویت مثلثی با هفت برچسب در بازه[۱، ۱-] برای ورودی و خروجی به‌کاربرده‌است. همچنین مرجع [۱۰۱] برای کنترل ردیابی همین نوع موتور ترکیب منطق فازی، کنترل تطبیقی مدل مرجع و کنترل‌کننده PID استفاده‌نموده‌است که تعداد برچسب و بازه ورودی‌ها مشابه مرجع پیش بوده ولی بازه خروجی‌ها متفاوت و بین [۲، ۰] انتخاب شده‌است. مرجع[۱۰۲] کنترل‌کننده‌ای براساس منطق فازی برای کنترل سرعت موتورهای القایی دو ستاره تحت کنترل میدان مغناطیسی غیر مستقیم پیشنهاد می‌دهد که مطابق شکل (۱۰) تعداد برچسب ورودی‌ها و خروجی به ترتیب دو و سه و محدوده‌ی آنها در بازه [۱،۱-] می‌باشد.



شکل (۱۰): توابع عضویت مرجع [۱۰۲]، الف) ورودی‌ها ب) خروجی

در کاربردهایی نیز از ترکیب توابع مثلثی و ذوزنقه‌ای در ورودی استفاده شده ولی در خروجی از توابع عضویت دیگری مانند: تابع مثلثی [۱۰۳]، میلـه‌ای [۱۰۴]، ذوزنقه‌ای [۱۰۵] و یا ترکیب مثلثی-ذوزنقه‌ای [۱۰۶] استفاده شده است.

دیگر توابع عضویتی که در مقالات مربوط به موتورهای الکتریکی کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل توابع عضویت ذوزنقه‌ای به تنهایی [۱۰۷]، گوسی [۱۰۸] و زنگوله‌ای [۱۰۹] (شکل ۱۱) می باشند.



شکل (۱۱): شکل ورودی و خروجی الف) مرجع [۱۰۸] ب) مرجع [۱۰۹]

۱۱- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده، در کنترل سیستم‌های الکتریکی همواره مصالحه‌ای بین سرعت و دقت انجام می‌شود. به این معنا که برای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

افزایش سرعت در سیستم‌های کنترل طراح مجبور به کاهش بار محاسباتی است که این امر با در نظر گرفتن تقریب‌هایی همراه است که خود باعث کاهش دقت سیستم می‌شود.همچنین آنجا که به دقت بالا نیاز است طراح مجبور به کاهش استفاده از تقریب است که خود منجر به افزایش بار محاسباتی و کاهش سرعت سیستم کنترل می‌شود.

اگر بخواهیم در یک سیستم استنتاج فازی مصالحه‌ای بین سرعت و دقت انجام دهیم ابتدا باید میزان بار محاسباتی FIS را مورد بررسی قرار دهیم. اجزای یک FIS که نقش تعیین کننده‌ای در میزان بار محاسباتی دارند توابع عضویت و نوع سیستم استنتاج هستند. برای توابع عضویت پر کاربرد می‌توان به، گوسی، سیگموئید، مثلثی و ذوزنقه‌ای اشاره کرد، در میان این توابع عضویت، تابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای کمترین بار محاسباتی را به سیستم اعمال می‌کنند. همچنین در مورد نوع سیستم استنتاج می‌توان به روش ممدانی و سوگنو اشاره کرد که روش سوگنو دارای بار محاسباتی کمتری نسبت به روش ممدانی است.

بررسی مقالات مربوط به منطق فازی در حوزه‌ی کاربردی صنعت برق نشان می‌دهد که در بیش از ٪۹۰ کاربردهای عملی سیستم‌های الکتریکی که عموما به صورت آنلاین هستند در ورودی یا خروجی از توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای استفاده شده است. با توجه به بررسی-های جامع انجام شده در این مقاله، علت اصلی این امر کاهش بار محاسباتی به دلیل مرتبه ۱ بودن توابع ریاضی این نوع توابع عضویت است. این مسئله نشان می‌دهد که اگرچه ممکن است انتخاب توابع عضویت از انواع غیر مثلثی و ذوزنقه‌ای منجر به پاسخی با دقت بالاتر شود ولی با توجه به سرعت فیزیکی سیستم‌های الکتریکی ودقت مورد نیاز در صنعت، توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای مناسب ترین انتخاب برای اجرا در سیستم‌های الکتریکی هستند. البته لازم به ذکر است که در بعضی سیستم‌های آنلاین تنها انتخاب توابع عضویت با بارمحاسباتی کم پاسخ گوی سرعت سیستم نبوده و طراح مجبور به استفاده از توابع عضویت میله‌ای (روش سوگنو) در خروجی بوده تا به سرعت مورد نیاز دست یابد.

مراجع

[1] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," in *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, And Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A Zadeh*, World Scientific, 1996, pp. 394–432.

[2] A. Fereidouni, M. A. S. Masoum, and M. Moghbel, "A new adaptive con fi guration of PID type fuzzy logic controller," *ISA Trans.*, pp. 1–19, 2014.

[3] S. Das, I. Pan, S. Das, and A. Gupta, "Engineering Applications of Artificial Intelligence A novel fractional order fuzzy PID controller and its optimal time domain tuning based on integral performance indices," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 25, no. 2, pp. 430–442, 2012.

[4] S. Ganguly, T. Mahto, and V. Mukherjee, "Integrated frequency and power control of an isolated hybrid power system considering scaling factor based fuzzy classical controller," *Swarm Evol. Comput.*, pp. 1–18, 2016.

[5] R. Sarrias-mena, L. M. Fernández-ramírez, C. A. García-vázquez, and F. Jurado, "Fuzzy logic based power management strategy of a multi-MW doubly- fed induction generator wind turbine with battery and ultracapacitor," *Energy*, pp. 1–16, 2014.

[6] J. Zhao and B. K. Bose, "Evaluation of Membership Functions for Fuzzy Logic Controlled Induction Motor Drive," *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*. pp. 229–234, 2002.

[7] N .K . Arun, B. M. Mohan and N. Kuruvilla, "A Nonlinear Fuzzy PID Controller via Algebraic Product AND-Maximum Or-Larsen Product Inference," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 1, pp. 543–548, 2016.

[8] P. D. Ngo and Y. C. Shin, "Gain estimation of nonlinear dynamic systems modeled by an FBFN and the maximum output scaling factor of a self-tuning PI fuzzy controller," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 42, pp. 1–15, 2015.

[9] O. Karasakal, M. Guzelkaya, I. Eksin, E. Yesil, and T. Kumbasar, "Online tuning of fuzzy PID controllers via rule weighing based on normalized acceleration," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 26, no. 1, pp. 184–197, 2013.

[10] A. J. H. Al, M. W. Mustafa, and H. H. Jebur, "A novel design of high-sensitive fuzzy PID controller," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 24, pp. 794–805, 2014.

[11] I. Filip and I. Szeidert, "Adaptive fuzzy PI controller with shifted control singletons," *Expert Syst. Appl.*, vol. 54, pp. 1-12, 2016.

[12] Y. I. Kudinov, V. A. Kolesnikov, F. F. Pashchenko, A. F. Pashchenko, and L. Papic, "Optimization of fuzzy PID controller ' s parameters," *Procedia - Procedia Comput. Sci.*, vol. 103, no. October 2016, pp. 618–622, 2017.

[13] L. Liu, F. Pan, and D. Xue, "Variable-order fuzzy fractional PID controller," *ISA Trans.*, pp. 1–7, 2014.

[14] P. S. Londhe, Y. Singh, M. Santhakumar, B. M. Patre, and L. M. Waghmare, "Robust nonlinear PID-like fuzzy logic control of a planar parallel (2PRP-PPR) manipulator," *ISA Trans.*, pp. 1–15, 2016.

[15] M. Sanie Abadeh and Z. Jebel Amelyan, *Evolutionary Algorithms and Biological Calculations*, Second edi, Nyazdanesh press, 2016.

[16] B. Kumar, S. Pati, P. Kumar, and S. Panda, "Teaching – learning based optimization algorithm based fuzzy-PID controller for automatic generation control of multi-area power system," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 27, pp. 240–249, 2015.

[17] R. K. Sahu, S. Panda, and G. T. C. Sekhar, "Electrical Power and Energy Systems A novel hybrid PSO-PS optimized fuzzy PI controller for AGC in multi area interconnected power systems," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 64, pp. 880–893, 2015.

[18] Y. Arya and N. Kumar, "BFOA-scaled fractional order fuzzy PID controller applied to AGC of multi-area multi-source electric power generating systems," *Swarm Evol. Comput*, vol. 32, pp. 202-218, 2016.

[19] P. C. Pradhan, R. K. Sahu, and S. Panda, "Firefly algorithm optimized fuzzy PID controller for AGC of multi-area multi-source power systems with UPFC and SMES," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 1, pp. 338-354, 2015.

[20] R. E. Precup, R. C. David, E. M. Petriu, A. S. Steanin and C. B. Dragos, "Grey Wolf Optimizer-Based Approach to the Tuning of PI-Fuzzy Controllers with a Reduced Process Parametric Sensitivity," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 5, pp. 55–60, 2016.

[21] I. S. Jesus and R. S. Barbosa, "Genetic optimization of fuzzy fractional PD+I controllers," *ISA Trans.*, vol. 57, pp. 220-230, 2015.

[22] V. Haji Haji Concepcion and A. monje, "Fractional Order Fuzzy-PID Control of a Combined Cycle Power Plant Using Particle Swarm Optimization Algorithm with an Improved Dynamic Parameters Selection," *Applied soft computing*, vol. 58, pp. 256-264, 2017.

[23] A. Ghani, A. Tahour, M. Abid, and F. Nollet, "Power Control of Wind Turbine based on Fuzzy Controllers," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 163–172, 2013.

[24] G. Rashid and M. Hasan, "Fault ride through capability improvement of DFIG based wind farm by fuzzy logic controlled parallel resonance fault current limiter," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 146, pp. 1–8, 2017.

[25] A. Beddar, H. Bouzekri, B. Babes, and H. Afghoul, "Experimental enhancement of fuzzy fractional order PI + I controller of grid connected variable speed wind energy conversion system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 123, pp. 569–580, 2016.

[26] M. Farhat, O. Barambones, and L. Sbita, "Ef fi ciency optimization of a DSP-based standalone PV system using a stable

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

single input fuzzy logic controller," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 907–920, 2015.
[27] A. Menadi, S. Abdeddaim, A. Ghamri, and A. Betka, "Implementation of fuzzy-sliding mode based control of a grid connected photovoltaic system," *ISA Trans.*, vol. 58, pp. 586-594, 2015.
[28] S. Ouchen, A. Betka, S. Abdeddaim, and A. Menadi, "Fuzzy-predictive direct power control implementation of a grid connected photovoltaic system , associated with an active power filter," *Energy Convers. Manag.*, vol. 122, pp. 515–525, 2016.
[29] B. Bendib, F. Krim, H. Belmili, M. F. Almi, and S. Boulouma, "Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system," *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 383–392, 2014.
[30] N. Gupta and R. Garg, "Tuning of asymmetrical fuzzy logic control algorithm for SPV system connected to grid," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, n. 26, pp. 16375-16385, 2017.
[31] Y. Chen, Y. Jhang, and R. Liang, "A fuzzy-logic based auto-scaling variable step-size MPPT method for PV systems," *Sol. ENERGY*, vol. 126, pp. 53–63, 2016.
[32] A. Rezvani and M. Gandomkar, "ScienceDirect Modeling and control of grid connected intelligent hybrid photovoltaic system using new hybrid fuzzy-neural method," *Sol. ENERGY*, vol. 127, pp. 1–18, 2016.
[33] A. Rezvani and M. Gandomkar, "Modeling and control of grid connected intelligent hybrid photovoltaic system using new hybrid fuzzy-neural method," *Sol. ENERGY*, vol. 127, pp. 1–18, 2016.
[34] W. Batayneh, A. Owais, and M. Nairoukh, "Automation in Construction An intelligent fuzzy based tracking controller for a dual-axis solar PV system," *Autom. Constr.*, vol. 29, pp. 100–106, 2013.
[35] N. Sa-ngawong and I. Ngamroo, "Intelligent photovoltaic farms for robust frequency stabilization in multi-area interconnected power system based on PSO-based optimal Sugeno fuzzy logic control," *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 555–567, 2015.
[36] E. Visek, L. Mazzrella, and M. Motta, "Performance analysis of a solar cooling system using self tuning fuzzy-PID control with TRNSYS," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 2609–2618, 2014.
[37] A. Ghani, A. Tahour, N. Essounbouli, F. Nollet, and M. Abid, "A Fuzzy-PI control to extract an optimal power from wind turbine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 65, pp. 688–696, 2013.
[38] M. Lüy, E. Çam, and H. Mamur, "A new fuzzy logic proportional controller approach applied to individual pitch angle for wind turbine load mitigation," *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 708-717, 2017.
[39] X. Yin, Y. Lin, W. Li, Y. Gu, H. Liu, and P. Lei, "A novel fuzzy integral sliding mode current control strategy for maximizing wind power extraction and eliminating voltage harmonics," *Energy*, vol. 85, pp. 677–686, 2015.
[40] H. Badihi, Y. Zhang, and H. Hong, "Fuzzy gain-scheduled active fault-tolerant control of a wind turbine," *J. Franklin Inst.*, vol. 351, no. 7. pp. 3677-3706, 2013.
[41] M. M. Ismail and A. F. Bendary, "Protection of DFIG wind turbine using fuzzy logic control," *ALEXANDRIA Eng. J.*, vol.55, no. 2, pp, 941-949, 2016.
[42] B. Bahmani-firouzi, E. Farjah, and R. Azizipanah-abarghooee, "An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties," *Energy*, vol. 50, pp. 232-244, 2013.
[43] K. Bedoud, M. Ali-rachedi, T. Bahi, and R. Lakel, "Adaptive Fuzzy Gain Scheduling of PI Controller for control of the Wind Energy Conversion Systems," vol. 74, pp. 211–225, 2015.
[44] X. Yin, Y. Lin, W. Li, Y. Gu, P. Lei, and H. Liu, "Electrical Power and Energy Systems Sliding mode voltage control strategy for capturing maximum wind energy based on fuzzy logic control," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 70, pp. 45–51, 2015.
[45] Z. Roumila, D. Rekioua, and T. Rekioua, "Energy management based fuzzy logic controller of hybrid system wind/photovoltaic/diesel with storage battery," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 30, pp. 19525–19535, 2017.
[46] A. Derrouazin, M. Aillerie, N. Mekkakia-Maaza, and J. P. Charles, "Multi input-output fuzzy logic smart controller for a residential hybrid solar-wind-storage energy system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 148, pp. 238–250, 2017.
[47] T. Vigneysh and N. Kumarappan, "Autonomous operation and control of photovoltaic / solid oxide fuel cell / battery energy

storage based microgrid using fuzzy logic controller," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–15, 2015.
[48] M. Tiar, A. Betka, S. Drid, and S. Abdeddaim, "Optimal energy control of a PV-fuel cell hybrid system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 1456-1465, 2016.
[49] A. Harrag and S. Messalti, "How fuzzy logic can improve PEM fuel cell MPPT performances?," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 2, pp. 1877-1891, 2017.
[50] K. H. Chua, Y. S. Lim, and S. Morris, "A novel fuzzy control algorithm for reducing the peak demands using energy storage system," *Energy*, vol. 122, pp. 265–273, 2017.
[51] F. Rezaei and S. Esmaeili, "Decentralized reactive power control of distributed PV and wind power generation units using an optimized fuzzy-based method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 87, pp. 27–42, 2017.
[52] Y. Lin, "Proportional plus derivative output feedback based fuzzy logic power system stabiliser," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 301–307, 2013.
[53] D. Amoozegar, "DSTATCOM modelling for voltage stability with fuzzy logic PI current controller," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 76, pp. 129–135, 2016.
[54] A. Javad, F. Henry, S. Ben, B. Ray, K. Hinzer, and J. E. Haysom, "High Stability Adaptive Microgrid Control Method Using Fuzzy Logic," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 25, pp. 57-64, 2016.
[55] V. Mukherjee, "Electrical Power and Energy Systems A novel quasi-oppositional harmony search algorithm and fuzzy logic controller for frequency stabilization of an isolated hybrid power system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 66, pp. 247–261, 2015.
[56] M. Bakhshi, M. H. Holakooie, and A. Rabiee, "Fuzzy based damping controller for TCSC using local measurements to enhance transient stability of power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 85, pp. 12–21, 2017.
[57] R. K. Sahu, G. T. C. Sekhar, and S. Panda, "DE optimized fuzzy PID controller with derivative filter for LFC of multi source power system in deregulated environment," *AIN SHAMS Eng. J.*, 2015.
[58] R. Kumar, S. Panda, and P. Chandra, "Design and analysis of hybrid firefly algorithm-pattern search based fuzzy PID controller for LFC of multi area power systems," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 69, pp. 200–212, 2015.
[59] R. K. Sahu, S. Panda, and N. K. Yegireddy, "A novel hybrid DEPS optimized fuzzy PI / PID controller for load frequency control of multi-area interconnected power systems," *J. Process Control*, vol. 24, no. 10, pp. 1596–1608, 2014.
[60] B. Kumar, T. Kumar, J. Ranjan, S. Panda, and S. Kumar, "A novel hybrid LUS – TLBO optimized fuzzy-PID controller for load frequency control of multi-source power system," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 74, pp. 58–69, 2016.
[61] D. K. Sahoo, R. K. Sahu, G. T. C. Sekhar, and S. Panda, "A novel modified differential evolution algorithm optimized fuzzy proportional integral derivative controller for load frequency control with thyristor controlled series compensator," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 2016.
[62] T. Mahto and V. Mukherjee, "A novel scaling factor based fuzzy logic controller for frequency control of an isolated hybrid power system," *Energy*, vol. 130, pp. 339-350, 2017.
[63] D. K. Chaturvedi, R. Umrao, and O. P. Malik, "Adaptive Polar Fuzzy logic based Load Frequency Controller," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 66, pp. 154–159, 2015.
[64] P. S. Devi, R. V. Santhi, and D. V Pushpalatha, "Introducing LQR-Fuzzy Technique with Dynamic Demand Response Control Loop to Load Frequency Control Model," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 1, pp. 567–572, 2016.6.
[65] S. Singh, J. Singh, and S. Marwaha, "Multi area load frequency control using particle swarm optimization and fuzzy rules," *Procedia - Procedia Comput. Sci.*, vol. 57, pp. 460–472, 2015.
[66] M. H. Khooban and T. Niknam, "A new intelligent online fuzzy tuning approach for multi-area load frequency control : Self Adaptive Modified Bat Algorithm," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 71, pp. 254–261, 2015.
[67] B. Big, "Interval type-2 fuzzy PID load frequency controller using Big," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 15, pp. 100-112, 2013.
[68] N. Altin and S. Ozdemir, "Three-phase three-level grid interactive inverter with fuzzy logic based maximum power point

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

tracking controller," *Energy Convers. Manag.*, vol. 69, pp. 17–26, 2013.
[69] O. N. Almasi, V. Fereshtehpoor, M. H. Khooban, and F. Blaabjerg, "Analysis, control and design of a non-inverting buck-boost converter: A bump-less two-level T–S fuzzy PI control," *ISA Trans.*, vol. 67, pp. 515–527, 2017.
[70] A. Bouafassa, L. Rahmani, A. Kessal, and B. Babes, "Unity power factor Converter based on a Fuzzy controller and Predictive Input Current," *ISA Trans.*, vol. 53, no. 6, pp. 1817–1821, 2014.
[71] T. Vigneysh and N. Kumarappan, "Grid interconnection of renewable energy sources using multifunctional grid-interactive converters: A fuzzy logic based approach," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, pp. 359–368, 2017.
[72] P. Siano and C. Citro, "Designing fuzzy logic controllers for DC-DC converters using multi-objective particle swarm optimization," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 112, pp. 74–83, 2014.
[73] M. Ranjani and P. Murugesan, "Optimal fuzzy controller parameters using PSO for speed control of Quasi-Z Source DC/DC converter fed drive," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 27, pp. 332–356, 2015.
[74] A. G. Saravanan and M. Rajaram, "Fuzzy controller for dynamic performance improvement of a half-bridge isolated DC-DC converter," *Neurocomputing*, vol. 140, pp. 283–290, 2014.
[75] R. Patel and A. K. Panda, "Real time implementation of PI and fuzzy logic controller based 3-phase 4-wire interleaved buck active power filter for mitigation of harmonics with i d – i q control strategy," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 59, pp. 66–78, 2014.
[76] H. Afghoul, F. Krim, D. Chikouche, and A. Beddar, "Design and real time implementation of fuzzy switched controller for single phase active power fi lter," *ISA Trans.*, vol. 58, pp. 614-621, 2015.
[77] A. K. Panda and S. Mikkili, "FLC based shunt active filter (p – q and I d – I q) control strategies for mitigation of harmonics with different fuzzy MFs using MATLAB and real-time digital simulator," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 47, pp. 313–336, 2013.
[78] X. Yuan, Z. Chen, Y. Yuan, and Y. Huang, "Design of fuzzy sliding mode controller for hydraulic turbine regulating system via input state feedback linearization method," *Energy*, vol. 93, pp. 173–187, 2015.
[79] S. Dettori, V. Iannino, V. Colla, and A. Signorini, "A fuzzy logic-based tuning approach of PID control for steam turbines for solar applications," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 480–485, 2017.
[80] C. Li, Y. Mao, J. Zhou, N. Zhang, and X. An, "Design of a fuzzy-PID controller for a nonlinear hydraulic turbine governing system by using a novel gravitational search algorithm based on Cauchy mutation and mass weighting," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 52, pp. 290-305, 2017.
[81] S. Falahati, S. Abbas, and M. Shahidehpour, "Grid frequency control with electric vehicles by using of an optimized fuzzy controller," *Appl. Energy*, vol. 178, pp. 918–928, 2016.
[82] O. Kraa *et al.*, "Fuzzy Logic Maximum Structure and State Feedback Control Strategies of The Electrical Car," *Energy Procedia*, vol. 50, no. 0, pp. 178–185, 2014.
[83] M. A. C. Fernandes, "Fuzzy Controller Applied to Electric Vehicles with Continuously Variable Transmission," *Neurocomputing*, vol. 214, pp. 684-691, 2016.
[84] H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, "A real time fuzzy logic power management strategy for a fuel cell vehicle," *Energy Convers. Manag.*, vol. 80, pp. 63–70, 2014.
[85] S. Faddel, A. A. S. Mohamed, and O. A. Mohammed, "Fuzzy logic-based autonomous controller for electric vehicles charging under different conditions in residential distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, pp. 48–58, 2017.
[86] R. Maia, M. Silva, R. Ara, and U. Nunes, "Electrical Vehicle Modeling: A Fuzzy Logic Model for Regenerative Braking," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 22, pp. 8504-8519, 2015.
[87] B. Allaoua and A. Laoufi, "A Novel Sliding Mode Fuzzy Control based on SVM for Electric Vehicles Propulsion System," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 120–129, 2013.
[88] O. Kraa *et al.*, "A Novel Adaptive Operation Mode based on Fuzzy Logic Control of Electrical Vehicle," *Energy Procedia*, vol. 50, no. 0, pp. 194–201, 2014.
[89] C. Jamroen, P. Namproom, and S. Dechanupaprittha, "TS-Fuzzy based Adaptive PEVs Charging Control for Smart Grid Frequency Stabilization under Islanding Condition," *Procedia - Procedia Comput. Sci.*, vol. 86, no. March, pp. 124–127, 2016.
[90] J. Pérez and M. Santos, "Fuzzy logic steering control of autonomous vehicles inside roundabouts," vol. 35, pp. 662–669, 2015.
[91] N. Nedjah, P. R. S. S. Sandres, L. D. M. Mourelle, N. Nedjah, P. Renato, and S. S. Sandres, "Customizable Hardware Design of Fuzzy Controllers Applied to Autonomous Car Driving," *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 16, pp. 7046-7060, 2014.
[92] H. Li, X. Wang, S. Song, and H. Li, "Vehicle Control Strategies Analysis Based on PID and Fuzzy Logic Control," vol. 137, pp. 234–243, 2016.
[93] X. Wang, M. Fu, Y. Yang, and H. Ma, "Lateral Control of Autonomous Vehicles Based on Fuzzy Logic X ; Y ; X ; Y ; n," pp. 237–242, 2013.
[94] M. Haiying, L. Chaopeng, and W. Zhi, "Direct Yaw-Moment Control Based on Fuzzy Logic of Four Wheel Drive Vehicle under the Cross Wind," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2310–2316, 2017.
[95] K. Bouhoune, K. Yazid, M. S. Boucherit, and A. Chériti, "Hybrid control of the three phase induction machine using artificial neural networks and fuzzy logic," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 55, pp. 289-301, 2017.
[96] E. Abd, E. M. Ramadan, and M. El-bardini, "Embedded system based on a real time fuzzy motor speed controller," *AIN SHAMS Eng. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 399-409, 2013.
[97] M. Hosein, M. Ojaghi, and A. Taheri, "Full-order Luenberger observer based on fuzzy-logic control for sensorless fi eld-oriented control of a single-sided linear induction motor," *ISA Trans.*, vol. 60, pp. 96-108, 2015.
[98] A. Verma, S. Sarangi, and M. H. Kolekar, "Stator winding fault prediction of induction motors using multiscale entropy and grey fuzzy optimization methods q," *Comput. Electr. Eng.*, 2014.
[99] A. N. Ranjbar, and H. A. Kholerdi, "Chaotification and fuzzy PI control of three-phase induction machine using synchronization approach," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 91, pp. 443–451, 2016.
[100] A. Varshney, D. Gupta, and B. Dwivedi, "Speed Response of Brushless DC Motor using Fuzzy PID Controller under Varying Load Condition," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 310-321, 2016.
[101] A. A. El-samahy and M. A. Shamseldin, "Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control," *AIN SHAMS Eng. J.*, vol. 9, no. 3, pp. 341-352, 2016.
[102] Z. Tir, O. P. Malik, and A. M. Eltamaly, "Fuzzy logic based speed control of indirect field oriented controlled Double Star Induction Motors connected in parallel to a single six-phase inverter supply," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 134, pp. 126–133, 2016.
[103] J. A. Ali, M. A. Hannan, A. Mohamed, and M. G. M. Abdolrasol, "Fuzzy Logic Speed Controller Optimization Approach for Induction Motor Drive Using Backtracking Search Algorithm," *MEASUREMENT*, vol. 78, pp. 49-62, 2016.
[104] H. Chou, Y. Kung, N. Vu, and S. Cheng, "Optimized FPGA design , verification and implementation of a neuro-fuzzy controller for PMSM drives," *Math. Comput. Simul.*, vol. 90, pp. 28–44, 2013.
[105] A. P. K. M, A. Unnikrishnan, and U. Nair, "Fuzzy Sliding Mode Control of a Switched Reluctance Motor," *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 735–742, 2016.
[106] J. Joy and S. Ushakumari, "Performance Comparison of a Sensorless PMBLDC Motor Drive System with Conventional and Fuzzy Logic Controllers," *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 643–651, 2016.
[107] S. Wang, C. Tseng, and C. Chiu, "Design of a Novel Adaptive TSK-fuzzy Speed Controller for Use in Direct Torque Control Induction Motor Drives," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 31, pp. 396-404, 2015.
[108] A. M. Zaki, M. El-bardini, F. A. S. Soliman, and M. Mabrouk, "Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control," *AIN SHAMS Eng. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 65-75, 2015.
[109] K. Premkumar and B. V Manikandan, "Fuzzy PID supervised online ANFIS based speed controller For Brushless dc motor," *Neurocomputing*, vol. 157, pp. 76-90, 2015.

[Downloaded from ijeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

زیر نویس ها

[1] Data Base
[2] Fuzzy Inference System
[3] Custom membership function
[4] Fuzzy-PID
[5] Variable-order fuzzy fractional PID controller
[6] Evolutionary Algorithm
[7] Teaching-Learning Algorithm
[8] Fuzzy-PID controller
[9] Particle Swarm Optimization and Pattern Search
[10] Fuzzy-PI controller
[11] Bacterial Foraging Optimization Algorithm
[12] Fractional Order Fuzzy-PID
[13] Firefly Algorithm
[14] Grey Wolf Optimization Algorithm
[15] Fuzzy-predictive direct power control
[16] Asymmetrical fuzzy logic control algorithm
[17] Pi shape
[18] Wind conversion system with variable speeds
[19] Speed multiplier
[20] Fault ride through capability improvement of DFIG
[21] wind farm
[22] Fuzzy gain-scheduled active fault-tolerant control
[23] Doubly fed induction generator
[24] Fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization
[25] Proton exchange membrane fuel cell
[26] Synchronous generator excitation system
[27] Lead-lag
[28] Distribution Static Synchronous Compensator
[29] Quasi-Oppositional Harmony Search Algorithm
[30] Isolated hybrid power system
[31] Polar Fuzzy logic based
[32] Linear Quadratic Regulator-Fuzzy
[33] Power Quality
[34] Total harmonic distortion
[35] Active power filters
[36] Shunt active filter
[37] Concentrated solar power plant
[38] Traking
[39] Gravitational Search Algorithm
[40] Electrical vehicles and hybrid vehicles
[41] Propulsion system
[42] State Of Charge
[43] Luenberger
[44] Grey fuzzy optimization
[45] Chaotification

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]

Fuzzy Membership Function Selection in Electrical Systems: A Review

Mehdi Zangeneh[1], Ebrahim Aghajari[2 *], Mehdi Forouzanfar[3]

[1] Department of Electrical Engineering, Ahwaz Branch, Islamic Azad University, Ahwaz, Iran
[2*] Department of Electrical Engineering, Ahwaz Branch, Islamic Azad University, Ahwaz, Iran, aghajari@iahavaz.ac.ir
[3] Department of Electrical Engineering, Ahwaz Branch, Islamic Azad University, Ahwaz, Iran

Abstract: Today, the widespread use of fuzzy controllers in electrical systems, especially, systems includes nonlinear and uncertainty terms, which are rapidly increasing. Indeed, the design of a desirable fuzzy inference system requires the correct selection of the type, number, and scope of membership functions due to fuzzifying the input and output variables of the system. But so far, no research or structural method has been introduced for the correct selection of membership functions and exclusively has been based on trial and error of the designer of the system. Considering the importance of this issue, the current paper investigated a comprehensive review of the membership functions selection in articles related to electrical systems. Finally, based on the articles reviewed and the categories carried out, suggestions for optimal selection of membership functions are presented based on the applications of electrical systems.

Keywords: Membership functions, Fuzzy logic, Fuzzy inference, Electrical systems.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.2.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019