ISSN: 3828-2588

عصر برق ۹

ASR-E-BARQ

فصل‌نامه علمی ـ ترویجی
انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، شاخه خراسان
سال پنجم • شماره ۹ • تابستان ۱۳۹۷
قیمت ۵۰۰۰ تومان

مطالعات بارزدایی زیر فرکانس برای یک شبکه قدرت بزرگ به هم پیوسته به کمک شبیه‌سازی‌های دینامیکی/ الگوریتم جدید برای ردیابی اهداف راداری با مانور بالا در مختصات قطبی مبتنی بر روش نویز معادل/ طراحی و مشخصه‌سازی نانوربات‌های زیستی/ مروری بر رویکردهای کنترل ازدحام در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم/ کاربرد رویتگرها در عملیات پزشکی با کمک ربات‌ها/ آنالیز فنی و اقتصادی سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه با استفاده از نرم‌افزار PVsyst و مطالعه موردی بر روی یک نمونه ۵ کیلوواتی منصوبه/ استفاده از الگوریتم خفاش به‌منظور کاهش محتوای هارمونیکی کل در اینورتر چند سطحی/ تولید هم‌زمان برق و تصفیه فاضلاب

CIVILICA
ISC

عصر برق • سال پنجم • شماره ۹
فصل‌نامه علمی-ترویجی انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران

شرکت مخابرات ایران

روابط عمومی منطقه خراسان رضوی

www.mci.ir

بسته‌هایی که میلیونی هستند

۶۰ جایزه ۵۰ میلیون تومانی

خرید بسته اینترنت از

my.mci.ir و *۱۰۰*۲#

دارای مجوز از سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی شماره پروانه ۱۰۰/۱۱۰۰

عصر برق ۹
ASR-E-BARQ
ASRB Journal
فصل‌نامه علمی ترویجی
انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران
شاخه خراسان
سال پنجم • شماره ۹ • تابستان ۱۳۹۷

به نام دوست

فهرست مطالب

یادداشت مدیرمسوول	۲
مطالعات بارزدایی زیر فرکانس برای یک شبکه قدرت بزرگ به هم پیوسته به کمک...	۳
الگوریتم جدید برای ردیابی اهداف راداری با مانور بالا در مختصات قطبی مبتنی بر...	۱۱
طراحی و مشخصه‌سازی نانوربات‌های زیستی	۱۹
مروری بر رویکردهای کنترل ازدحام در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم	۲۴
کاربرد رویتگرها در عملیات پزشکی با کمک ربات‌ها	۲۹
تحلیل تئوری اطلاعاتی آشکارسازی و تخمین در شبکه ... (چکیده رساله دکتری)	۳۶
توسعه و تحلیل پایداری رده های خاص سیستم های ... (چکیده رساله دکتری)	۳۷
پیاده‌سازی سخت‌افزاری پردازنده فازی با استفاده از تکنولوژی ... (چکیده رساله دکتری)	۳۷
پایشگری و ارزیابی امنیت سیستم قدرت بر پایه شناسایی ... (چکیده رساله دکتری)	۳۸
آنالیز فنی و اقتصادی سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه با استفاده از نرم‌افزار...	۳۹
استفاده از الگوریتم خفاش به‌منظور کاهش محتوای هارمونیکی کل در اینورتر ...	۴۵
تولید هم‌زمان برق و تصفیه فاضلاب	۵۴

صاحب امتیاز: انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران
مدیر مسوول: دکتر حبیب رجبی مشهدی
سردبیر: دکتر جواد ساده

شورای سیاست‌گذاری:
دکتر ایمان احدی اخلاقی، مهندس حسن اروجی، مهندس محمدعلی چمنیان، دکتر حبیب رجبی مشهدی، دکتر مصطفی رجبی مشهدی، دکتر جواد ساده، دکتر مهرداد شکوه صارمی، مهندس علی کارگزار، دکتر مهدی علومی بایگی، دکتر مصطفی عیدیانی، دکتر محمد منفرد، دکتر محمد مولوی کاخکی، مهندس مجید مهدیزاده، مهندس غلامرضا یزدانی شواکند

شورای نویسندگان:
دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی، دکتر سید هاشم اورعی میرزمانی، دکتر حمید تولیت، دکتر سید حسین حسینی، دکتر حبیب رجبی مشهدی، دکتر مصطفی رجبی مشهدی، دکتر جواد ساده، دکتر مهرداد شکوه صارمی، دکتر امیررضا عطاری، دکتر حسن غفوری‌فرد، دکتر گئورگ قره‌پتیان، دکتر رضا لطفی، دکتر خلیل مافی‌نژاد، دکتر محمد مولوی کاخکی

مدیر اجرایی:
مهندس غلامرضا یزدانی شواکند

روابط عمومی:
مهندس فریده سعادت، مهندس سمیراء شمس، مهندس فرزانه رحیمی

مدیر برنامه‌ریزی:
دکتر مصطفی رجبی مشهدی

صفحه آرایی و امورگرافیک:
امواج برتر(۰۵۱-۳۸۹۴۰۱۲۰)
لیتوگرافی: آفاق (۰۵۱-۳۷۶۰۰۲۷۰)
چاپ : زبرجد (۰۵۱-۳۱۶۶۶۶)
صحافی : حافظ (۰۵۱-۳۳۹۲۹۱۱۱)

نشانی:
مشهد، پردیس دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی دفتر گروه مهندسی برق
تلفن دبیرخانه نشریه: ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۷
نمابر: ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۸
وب سایت انجمن: www.kiaeee.ir
پست الکترونیک: asrebarq@gmail.com

فراخوان مقاله

• از مطالب و نوشته‌های شما استقبال می‌کنیم:
- «عصر برق» در استفاده، ویرایش و کوتاه کردن مطالب ارسالی آزاد بوده و مطالب ارسالی شما نزد ما به یادگار می‌ماند.
- نظرات و عقاید نویسندگان مطالب لزوما دیدگاه «عصر برق» نیست.
- استفاده از مطالب «عصر برق» با ذکر منبع آزاد است.
- ترتیب آثار چاپ شده بر حسب ملاحظات فنی و رعایت تناسب بوده و به معنای درجه‌بندی نیست.
- مقاله های ارسالی از طریق پست الکترونیک و یا سایت نشریه حتما به دو صورت PDF و Word باشد.
- ترجمه‌ها همراه با نسخه اصلی ارسال شود.
- مسوولیت حقوقی آثار ارسالی بر عهده نویسندگان مقاله‌ها می‌باشد.

مردمـی کردن صنعـت برق

یادداشت مدیرمسوول

صنعـت برق اگرچه از بدو تولد همواره با چالش‌های مختلفی به لحاظ مسایل مربوط به فن‌آوری، اقتصاد و آثار صنعت بر محیط زیست مواجه بوده است اما همواره با اقبال تقاضا نیز روبرو بوده اسـت. نوآوری‌های مختلف در هـر دوره‌ای تقاضای جدیدی را برای مصرف الکتریسیته ایجاد کرده است. به‌عنوان مثال در دوره کنونی با برقی شـدن حمل و نقل و توسـعه خودروهای برقی و حمل و نقل عمومی تقاضا برای الکتریسیته به‌ویژه در کشورهای صنعتی در حال افزایش اسـت. در کشـورهای در حال توسـعه نیز افزایش مصرف برق به دلایلی مانند رشـد اقتصادی و رشـد جمعیت مشـهود است. این افزایش مصرف طبیعی است که نیاز به سرمایه‌گذاری در تولید، انتقال و توزیع برق را به دنبال دارد. در کشـورهایی مانند کشـور ما که صنعت برق تا حد زیادی به دولت و سیاسـت‌گذاری‌های دولتی وابسـته اسـت، مدیریت و راهبری صنعت را پیچیده می‌سـازد. تامیـن نقدینگی و بودجه برای توسـعه از یک سو و نوسـازی و نگهداری شبکه موجود از سـوی دیگر موجب می شود تامین منابع مالی مهم‌ترین دغدغه فکری مسوولان صنعت برق کشور باشد.

پایین بودن تعرفه برق نیز چالش اساسـی دیگری در کشورهای در حال توسـعه و با اقتصاد دولتی اسـت. سیاست‌مداران به‌طور معمـول به دوره‌های کوتاه مدت دوران خود توجه داشـته و به دنبال افزایش قیمت‌ها که معمولاً نارضایتی مردم و اعتراض‌های اجتماعی و سیاسـی را دامن می‌زند، نیسـتند. در این شـرایط صنعت برق فشـار زیـادی را متحمل می‌شـود. عدم تخصیص بودجـه کافی از سـوی دولت و پایین بـودن درآمدها و افزایش تقاضا برای برق همچون دو اهرم فشار بر بدنه صنعت برق وارد می شوند. تابستان گذشـته به وضوح نتایج این فشار بر صنعت برق به‌صورت خاموشی‌هایی توزیع شده در سر تا سر کشور حس شد. بدیهی است اگر به درمان اساسی این مساله پرداخته نشود، سال‌های آتی با بحران‌های جدی مواجه خواهیم بود.

واضح اسـت که این مسـاله مهم‌ترین مساله روی میز مسوولان صنعت برق کشور است. مساله بسیار جدی و دارای ابعاد وسیعی است و نیازمند سیاست‌ورزی حرفه‌ای در حوزه انرژی و در ابعاد کلان می‌باشـد. برای حل این مساله کلان، گرچه باید در کوتاه مـدت به دنبال جذب بودجه مورد نیاز از دولت، تنظیم و تعدیل قیمت‌هـا و به‌ویـژه در ایـام اوج مصرف، اسـتفاده از روش‌های مدیریـت مصرف بـا تکنیک‌های متفـاوت و ارتقـای بهره‌وری تجهیزات موجود تولید و انتقال بود، اما این راه حل‌ها در نهایت مانند مسـکن می باشد و مسـاله را به‌طور عمیق و پایه‌ای حل نمی‌کنـد. آنچه باید به طور جدی به دنبال آن بود، تغییر نگرش نسبت به صنعت است که بایستی از یک صنعت وابسته به دولت به صنعت مردمی که در همه ابعاد متکی به مردم باشـد، تغییر یابـد. برای این تغییر بزرگ بایسـتی نهادهای سیاسـت‌گذار به تدریـج و قدم به قدم شـرایط را برای این تغییـر فراهم کنند. این مهم با شـکل کنونی که نیروگاه‌هـا به بخش خصوصی و یا بهتر خصولتی(نیمه خصوصی-نیمه دولتی) واگذار شـده است، اتفاق نمی‌افتد. این نوشـته کوتاه درصدد حل این مساله بزرگ نیست اما پرواضح است که اگر امروزه به‌طور جدی به دنبال این نباشـیم که بخش خصوصی واقعی در صنعت برق شـکل گیرد، با هزینه‌های سـنگین و بزرگتری در آینـده روبرو خواهیم بود. پرداختن به مسـاله خصوصی‌سازی در صنعت برق به‌طور عمیق و حل مشـکلات فرا روی آن و به میدان آمدن مردم و براسـاس شـرایط مساوی امری بسـیار با اهمیت است. به گمان نویسنده که بیشتر مطالعات او در حوزه اقتصاد برق قرار دارد یک فرصت مناسـب که می‌تواند تمرین خوبی بـرای مردمی کردن اقتصاد برق باشـد توجه جدی به انرژی‌های نو و تجدیدپذیر می‌باشـد. در بیشـتر کشـورهای دنیا از زاویه‌های مختلف محیط زیستی، اقتصـادی، تمرکززدایی و تولیـد پراکنده، تـاب‌آوری و امنیت فیزیکی و سایبری، اشـتغال و حتی در چهارچوب‌های سیاسی به دنبال توسـعه بخش انرژی‌های نو می‌باشند. در کشور ما نیز انرژی‌های نو از سـال ها پیش مورد اهتمام قرار گرفته اسـت و دسـتاوردهای به نسبت خوبی در چند سـال اخیر بدست آمده اسـت. اما به نظر می‌رسد سیاسـت‌های معاونت‌های مختلف در وزارت نیرو در پیشـبرد انرژی‌های تجدیدپذیر هماهنگ نیست. به‌عـلاوه وزارت نیـرو و دولت از همه پتانسـیل‌های موجود در جهت توسعه انرژی‌های نو استفاده نمی‌کند. اعطای وام کم‌بهره، اطلاع‌رسـانی به مردم از طریق رسـانه‌های جمعی، ساده سازی امـور اجرایی و برداشـتن موانع سـرمایه‌گذاری و کمک کردن به مردم از طریق در اختیار گذاشـتن مشـورت‌های تخصصی و اطلاعات مورد نیاز از جمله این موارد است. مردمی کردن اقتصاد برق یک گام بزرگ برای حل مشکلات اساسی صنعت برق است و به‌عنـوان یک نقطه خوب و موثر می‌تـوان از انرژی‌های نو به این مهم پرداخت. امید که مسـوولان صنعت برق کشور توسعه انرژی‌های نو را در ایران مانند سایر کشورهای دنیا به طور جدی دنبال کنند.

حبیب رجبی مشهدی
مدیر مسوول

***

مطالعات بارزدایی زیر فرکانس
برای یک شبکه قدرت بزرگ به هم پیوسته به کمک شبیه‌سازی‌های دینامیکی

فرزان رشیدی/ استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه هرمزگان/ rashidi @ hormozgan.ac.ir

چکیده

مصرف روزافزون انرژی الکتریکی به همراه مسایل اقتصادی و زیست محیطی ناشی از گسترش سیستم‌های قدرت، سبب شده است که شبکه‌های قدرت با بیشترین ظرفیت و بسیار نزدیک به حاشیه پایداری خود مورد بهره‌برداری قرار گیرند. این امر موجب کاهش حاشیه امنیت سیستم‌های قدرت در مقابل انواع ناپایداری‌ها شده و احتمال فروپاشی شبکه را در اثر بروز حوادث مختلف تقویت نموده است. از این‌رو حفاظت از شبکه‌های قدرت برای حفظ پایداری در مقابله با پیشامدهای مختلف از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. یکی از موارد ناپایداری سیستم‌های قدرت که می‌تواند منجر به فروپاشی‌های متعدد شبکه نیز گردد، برهم خوردن ناگهانی تعادل بین توان اکتیو تولیدی و مصرفی و درنتیجه فروپاشی فرکانسی شبکه می‌باشد. در این میان طرح حفاظتی حذف بار برای مقابله با ناپایداری فرکانسی می‌تواند ابزاری موثر و کارآمد برای جلوگیری از بروز چنین حوادثی باشد. در این مقاله، یک روش کاربردی مبتنی بر افت فرکانس، برای تعیین مقدار بارزدایی زیر فرکانس می‌شود. سپس به کمک نرم‌افزار PSS/E عملکرد آن بر روی شبکه جنوب شرق ایران شبیه‌سازی شده و به کمک نرم افزار MATLAB داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، آنالیز خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی می‌تواند به نحو بسیار موثری از فروپاشی کامل شبکه در صورت بروز حوادث ترکیبی و اغتشاشات ساده، متوسط و شدید جلوگیری کند.

کلمات کلیدی: بارزدایی زیر فرکانس، افت فرکانس، عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف، شبکه قدرت، حاشیه پایداری

Under Frequency Load Shedding Studies of a Large Interconnected Power Grid Based on Dynamics Simulations

Farzan Rashidi /Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran/ rashidi@hormozgan.ac.ir

ABSTRACT

The increasing consumption of electrical energy along with economic and environmental issues arising from the development of power systems cause to operation of power networks with full capacity and close to stability margin. This would reduce the safety margin against various instabilities and possible collapse of power system in the network. The protection of power systems to maintain stability in the face of various events is very important. One of the instability of power systems, which can lead to network collapses, the sudden disruption of the balance between production and consumption that is leads to collapse of the grid frequency. Among, load shedding can be an effective way to prevent the frequency instability. In this paper is proposed a practical approach based on the frequency drop to determine total load shedding (TLS). The performance of proposed method is implemented on Iran South East network using PSS/E and the obtained data are analyzed by MATLAB software. The simulation results show that the proposed scheme could be a very effective way to prevent the network collapse in case of simple, moderate and severe disturbances.

Keywords: **Under frequency load shedding, stability margin, frequency drop and imbalance.**

۱- مقدمه

در شـرایط کارکرد نرمال سیسـتم‌های قدرت، توان تولیدی توسـط ژنراتورها برابر با توان مصرفی بارها و تلفات شـبکه اسـت. در صورت بـروز یک پیشـامد در شـبکه، تعادل بیـن توان تولیـدی و مصرفی به‌هم‌خورده و در صورت کمبود تولید، فرکانس شـبکه به سرعت افت می‌کند. بسـته به شـدت اغتشاش و پیشـامد رخداده، افت فرکانس شـبکه می‌تواند باعث اختلال در عملکرد تمام اجزای سیستم قدرت به‌خصـوص ژنراتورهـا و توربین‌های بخار شـده و در نهایت منجر به فروپاشـی کل شـبکه شـود[۱]. در صورتی‌که اغتشـاش و پیشامد رخداده شـدید نباشـد، گاورنر تغییرات فرکانس را اندازه‌گیری کرده و با تغییـر توان مکانیکی ورودی، تـوان الکتریکی خروجی را تنظیم و بـا افت فرکانس مقابله می‌کند. در صـورت افزایش ناگهانی بار، بار اضافه شـده به شبکه توسـط ذخیره چرخان جبران می‌شود. ذخیره چرخان در واقع بخشـی از ظرفیت ژنراتورهای متصل به شبکه است که استفاده نشده است. حال چنانچه تمام ژنراتورهای متصل به شبکه در بیشـترین ظرفیت نامی‌خود کار کنند ذخیره چرخان شـبکه صفر شـده و گاورنـر نمی‌تواند اضافه بار شـبکه را جبران کـرده و از افت فرکانس جلوگیری کند. در پیشامدها و اغتشاشات شدیدتر مثل قطع ژنراتـور و یا قطع خطوط ارتباطی مهم شـبکه، عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف بوجود آمده و افت فرکانس بسـیار سـریع و شدید خواهد بود و برای جبران آن به گاورنرهایی با پاسـخ سریع نیاز است. برای جلوگیری از افت فرکانس و فروپاشـی شـبکه ناشـی از حوادث و اغتشاشـات شـدید و ناگهانی، ابزارها و اقدامات اصلاحی گوناگونی وجود دارد که ساده‌ترین، سریع‌ترین و موثرترین آن‌ها، حذف خودکار بخشـی از بار شـبکه (بارزدایی) اسـت[۲]. پس از اینکه با بارزدایی زیرفرکانس، از فروپاشی شبکه جلوگیری شد و فرکانس شبکه کنترل گردید، بارهای قطع شده را می‌توان به تدریج به شبکه متصل کرد.

فرکانـس آغـاز حذف، میزان حـذف بار و فرکانس در هـر مرحله، از مشـخصات مهم طرح بارزدایی فرکانسی اسـت که با توجه به میزان حساسیت تجهیزات سیستم (به‌خصوص توربین‌های بخار) به تغییرات فرکانس و نیز با توجه به مشـخصات و ساختار شبکه باید طرح شود. همچنین بارزدایی فرکانسـی باید بـا در نظر گرفتن دینامیک توربین و ژنراتورهـای سیسـتم به‌گونه‌ای صورت گیرد که در برابر نوسـانات طبیعی فرکانس، فعال نشـده و در عین حال از حساسیت کافی برای حفظ شبکه برخوردار باشد[۳].

روش‌های مختلفی برای بارزدایی فرکانسـی معرفی شـده اسـت که مرسوم‌ترین آن‌ها روش حذف بار متداول است. در این طرح هرگاه در اثر خروج یک یا چند نیروگاه، فرکانس شبکه بیشتر از حد معینی افت کند، رله‌های فرکانسـی که از قبل بـر روی تعداد معینی از فیدرهای سیسـتم نصب شده‌اند، در چندین مرحله و با تاخیرهای زمانی ثابت، مقادیر مشـخصی از بار سیستم را به‌نحوی قطع می‌کنند که فرکانس شبکه هرگز به مرز خطرآفرین نرسد[۴].

برای افزایش انعطاف‌پذیری روش بارزدایی فرکانسی متداول، بسیاری از مقالات علاوه بر فرکانس شبکه از نرخ افت فرکانس نیز به‌عنوان یک معیار در تصمیم‌گیری میزان بارزدایی استفاده کرده‌اند. به‌عبارت دیگر به روش معمولی بارزدایی فرکانسـی، شـاخص نرخ تغییرات فرکانس $(\frac{df}{dt})$ را اضافه نموده‌اند تا برای اندازه‌گیری شـدت اغتشاش در لحظه بروز آن استفاده کنند. سپس با روش‌های متفاوتی، آستانه فرکانسی، تعداد مراحل، فرکانس هر مرحله و تاخیر زمانی آن مرحله را مشخص کرده‌اند. هرچند لحاظ کردن نرخ تغییرات فرکانس $(\frac{df}{dt})$ به‌عنوان یک شـاخص کمکی در طرح بارزدایی فرکانسـی متداول، بیشتر به‌منظور مشـخص کردن بزرگی اغتشاش و تشـخیص آن از نوسانات طبیعی سیستم قدرت صورت می‌گیرد[۵]، ولی به دلایلی همچون پیچیدگی محاسـبه دقیق $(\frac{df}{dt})$، همچنین زمان‌بر بودن محاسـبه مقدار مشتق فرکانس با اسـتفاده از پردازشگرها و روش‌های فیلتر کردن موجود در رله‌های دیجیتالی از دیدگاه سیسـتم قدرت، در حال حاضر این‌گونه طرح‌ها نمی‌تواند جنبه کاربردی و عملی داشـته باشـند[۶]. در ادامه بدون توجه به جنبه‌های کاربردی روش‌های بارزدایی مبتنی بر مشتق فرکانس، تعدادی از آن‌ها مورد بررسی قرار داده شده‌اند.

در[۷] با اسـتفاده از نرخ تغییرات فرکانس و مدل پاسـخ فرکانسـی سیسـتم، مقدار بار حذف شـده مورد نیاز جهت بازگرداندن سیستم به شـرایط مطلوب محاسبه شده اسـت. یکی از مشکلات این روش، پیچیدگی محاسـبه مشـخصه‌های مدل و همچنین تغییرات آن‌ها با تغییر نقطه کار سیستم می‌باشد. در[۸] استفاده از الگوریتم حذف بار متمرکز برای بارزدایی فرکانسی پیشنهاد شده است. پارامترهای مورد نیاز الگوریتم بیان شده عبارتند از فرکانس و آهنگ تغییرات فرکانس ژنراتورهـای سیسـتم. هرچند نتایج حاصل از شبیه‌سـازی‌ها نشـان می‌دهند الگوریتم حذف بار متمرکز پیشنهادی می‌تواند در هنگام بروز حوادث متوسـط و شدید، با حذف بار از نقاط ضعیف سیستم حاشیه پایداری ولتاژ بیشتری را برای شبکه فراهم نماید ولی با توجه به اینکه در روش بالا تاثیر و اهمیت ولتاژ باس‌ها در مقدار و محل بارزدایی در نظر گرفته نشده است، از این‌رو این طرح نمی‌تواند یک طرح مقاوم در مواجه با حوادث ترکیبی که منجر به فروپاشی شبکه می‌شوند، باشد. در [۹] روش جدیدی برای بارزدایی بر اساس تغییرات فرکانس و ولتاژ به‌ویژه در نواحی اطراف ژنراتورهای خارج شده از شبکه پیشنهاد شده اسـت. هرچند بر اساس نتایج عددی ارایه شـده در مقاله بیان شده، روش پیشـنهادی منجر به کاهش بار خطوط و بهبـود پروفیل ولتاژ سیسـتم شده است. با این حال نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده در[۱۰] نشان می‌دهند بارزدایی در نواحی نزدیک به ژنراتورهای قطع شـده، بر حسـب لزوم منجـر به کاهش بار کل خطوط شـبکه نمی‌شـود و بعضـا حذف بار در نقـاط دارای بیشـترین فاصله از این ژنراتورها می‌تواند منجر به ایجاد حاشیه پایداری بیشتری برای شبکه شود.

در[۱۱] برای پیشـامدهای بسـیار شـدید که با نرخ تغییرات بسیار بزرگ فرکانس مواجهه هسـتند، پیشنهاد شـده است که از مشخصه $\frac{df}{dt}$ f برای تعیین مقدار بارزدایی استفاده شود. در حالی‌که در [۱۲] برای حوادثی که با $\frac{df}{dt}$ بزرگ همراه هسـتند علاوه بر پیشنهاد حذف بار متناسـب با مقدار مشـتق فرکانس، تاکید شـده است که رله‌ها از تنظیمات فرکانسی بالاتری استفاده کنند تا بارزدایی با مشکل مواجه نشود.

در[۱۳] اسـتفاده از آهنگ تغییرات فرکانس به نحوی پیشنهاد شده اسـت که زمان عملکرد رله‌های فرکانسـی تابعی از $(\frac{df}{dt})$ باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های ارایه شده نشان می‌دهد که چنانچه فقط زمان تاخیر تابعی از نرخ تغییرات فرکانس باشد، این روش تفاوت چندانی با روش حذف بار متداول نخواهد داشت.

در[۱۴] نیـز مقایسـه‌ای بیـن روش بارزدایـی فرکانسـی متداول با روش مبتنـی بر نـرخ تغییرات فرکانس $(\frac{df}{dt})$ جهت قطع بار بیشـتر در پیشـامدهای شـدید انجام شـده اسـت. نتایج عـددی حاصل از شبیه‌سـازی‌ها حاکی از آن اسـت که برای حوادث بزرگ استفاده از روش مبتنی بر نرخ تغییرات فرکانس می‌تواند مانع از فروپاشی شبکه شود.

در[۱۵] از یـک روش ترکیبی برای حفاظت سیسـتم قدرت در برابر

حوادث کوچک و بزرگ استفاده شده است. طرح بارزدایی ارایه شده در مقاله بیان شده، ترکیبی از روش‌های متمرکز و پخش شده می‌باشد. بدین معنی که برای حوادث کوچک که ($\frac{df}{dt}$) آن‌ها کوچک می‌باشد، استفاده از روش حذف بار متداول پیشنهاد شده و برای حوادث بزرگ که ($\frac{df}{dt}$) آن‌ها از حد مشخصی بیشتر می‌باشد یک سیستم متمرکز طراحی شده که از یک طرف مانع از عملکرد رله‌های حذف بار متداول شده و از طرف دیگر خود الگوریتم به‌طور مستقل بارهایی را از شبکه به‌گونه‌ای قطع می‌کند که مقدار آن‌ها بیشتر از روش متداول باشد. از اشکالات این روش علاوه بر محاسبه مشخصه‌های شبکه با یک روش به نسبت پیچیده، لزوم انجام دوباره این محاسبات به هنگام تغییرات ساختار شبکه و یا گسترش آن است. در[۱۶] برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ و فروپاشی شبکه در نواحی آسیب دیده تحت حوادث و اغتشاشات شدید، از یک روش ترکیبی حذف بار برای اولویت دادن به مکان‌های دارای ولتاژ پایین‌تر استفاده شده و نتیجه آن با طرح حذف بار متداول مقایسه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده آن است که روش معرفی شده می‌تواند حاشیه توان راکتیو سیستم را افزایش داده و درنتیجه از فروپاشی شبکه جلوگیری نماید. در [۱۷] با هدف نجات شبکه در برابر حوادث ترکیبی و شدید و بهبود توام پایداری فرکانسی و ولتاژی سیستم پس از بروز این‌گونه حوادث، از یک روش حذف بار ترکیبی خطی استفاده شده است. در روش پیشنهادی به‌جای استفاده از یک روش مستقل برای رله‌های حذف بار فرکانسی و روش مستقل دیگر برای رله‌های حذف بار ولتاژی، با استفاده از یک نمودار دوبعدی فرکانس-شاخص ولتاژ، مقادیر فرکانس با شاخص ولتاژ در محل رله ترکیب شده، سپس با توجه به وضعیت ترکیبی از یک خط به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار در نمودار شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس استفاده می‌شود. این خط نمودار را به دو ناحیه تقسیم می‌کند که ناحیه بالای خط حالت عادی و ناحیه زیرخط محدوده عملکرد رله را نشان می‌دهد. سپس مکان‌های حذف بار بسته به محل وقوع اغتشاش و ابعاد ولتاژی آن تعیین می‌شوند.

با توجه به اینکه روش پیشنهادی در[۱۷]، به بارهایی که افت ولتاژ بیشتری دارند، فرکانس‌های بالاتری برای بارزدایی اختصاص می‌دهد و درنتیجه سریع‌تر نیز قطع می‌شوند، از این‌رو در مواقع بروز حوادث متوسط یا کوچک که پس از وقوع حادثه افت ولتاژ بارها کم است، فرکانس‌های حذف بار کاهش یافته و بارزدایی با تاخیر انجام می‌شود که این خود می‌تواند منجر به ناپایداری بیشتر شبکه شود. برای رفع مشکل بیان‌شده پیشنهاد شده است در نمودار دو بعدی شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس، به‌جای یک خط از یک منحنی سهموی به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری حذف بار استفاده شود[۱۸]. هر چند استفاده از منحنی سهموی به‌جای خط، می‌تواند در هنگام بروز حوادثی که افت ولتاژ چندان شدید نبوده و افت فرکانس غالب است، باعث بهبود سرعت بارزدایی شود، ولی انتخاب مناسب معادله سهمی می‌تواند کارایی این روش را با چالش‌هایی همراه سازد.

در تعدادی دیگر از مقالات نیز از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر حاشیه پایداری استاتیک شبکه، جهت تعیین محل و مقدار بارزدایی استفاده شده است. در این‌گونه روش‌ها، مکان‌های حذف بار و محل‌های نصب رله‌های فرکانسی با توجه به حاشیه پایداری استاتیکی توان راکتیو شبکه در مناطق مختلف آن پس از وقوع پیشامد و قطع بار، بهینه می‌شود. هدف از انجام این کار نیز بهبود شاخص‌های پایداری ولتاژ شبکه است تا با قطع بار در مکان‌های مناسب از بروز اضافه بار در خطوط انتقال و درنتیجه ناپایداری شبکه جلوگیری شود[۱۹]. در بهینه‌سازی محل حذف بار، تابع هدف می‌تواند شامل هزینه قطع بار، تعادل ولتاژ و حاشیه پایداری استاتیک شبکه پس از حذف بار و یا تعادل شبکه و توان عبوری از خطوط آن باشد. این ملاحظات کمک می‌کند که بارهای با اولویت بالاتر دیرتر قطع شوند و یا محل حذف بار به‌گونه‌ای باشد که به‌ازای حوادث مختلف، پس از حذف بار، پخش بار استاتیک شبکه دارای شرایط متعادلی از نظر ولتاژ باس‌ها و توان خطوط ارتباطی باشد. مزیت بهینه‌سازی مکان حذف بار برای کل حوادث آن است که از نصب پراکنده رله‌ها در کل شبکه جلوگیری می‌کند[۲۰]. اشکال عمده طرح‌های بیان شده نیز آن است که بهینه‌سازی محل‌های رله‌گذاری فقط یکبار و برای تمامی‌پیشامدهای پیش‌بینی شده در شبکه انجام می‌شود، در حالی‌که مکان‌های مناسب قطع بار در حوادث مختلف متفاوت بوده و از این‌رو محل‌های بدست آمده از این الگوریتم‌ها بهترین مکان حذف بار برای هر حادثه نمی‌باشد[۲۱].

از آنجا که در روش‌های بارزدایی مبتنی بر بهینه‌سازی حاشیه پایداری شبکه، تابع هدف و قیود مساله بیشتر غیرخطی هستند، در بسیاری از مقالات از الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک [۲۱]، الگوریتم مورچگان [۲۲] و الگوریتم پرندگان [۲۳] جهت تعیین محل بارزدایی استفاده شده است. در تعدادی دیگر از مقالات نیز برای ساده‌سازی مساله بهینه‌سازی از روش‌های خطی‌سازی تابع هدف و قیود استفاده کرده‌اند[۲۴].

با توجه به اینکه طرح‌ها و به‌خصوص رله‌هایی که بتوانند ایده‌ها و معیارهای بیان شده در مراجع بالا را استفاده کنند یا اصلا ساخته نشده‌اند و یا اینکه به‌صورت صنعتی در دسترس نمی‌باشند، در این مقاله از روش معمول بارزدایی مبتنی بر افت فرکانس برای جلوگیری از فروپاشی کامل شبکه جنوب شرق ایران در صورت بروز هرگونه اغتشاشی استفاده شده است. از مزایای روش پیشنهادی علاوه بر کاربردی بودن آن، قابلیت جلوگیری از فروپاشی کامل شبکه‌های بزرگ به‌هم پیوسته در هنگام مواجهه با حوادث ترکیبی و اغتشاشات ساده، متوسط و شدید می‌باشد.

در بخش دو، روش پیشنهادی بارزدایی زیر فرکانس مبتنی بر افت فرکانس بیان شده است. در بخش چهار نیز چگونگی پیاده‌سازی طرح پیشنهادی بر روی شبکه جنوب شرق ایران ارایه شده و در بخش پنج نیز با انجام شبیه‌سازی‌هایی کارایی طرح پیشنهادی، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- روش قدم به قدم طراحی بارزدایی زیر فرکانس مبتنی بر افت فرکانس

بارزدایی زیر فرکانسی یکی از معمول‌ترین روش‌هایی است که برای جلوگیری از افت فرکانس و ناپایداری سیستم پس از اغتشاش‌هایی که منجر به عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف می‌شوند بکار می‌رود.

فرکانس آغاز حذف، میزان حذف بار و فرکانس در هر مرحله و درصد کلی حذف بار وابسته به مشخصات شبکه بوده و برای هر سیستم قدرت مقداری متفاوت است. از طرفی دیگر به‌دلیل ماهیت دینامیک بار، همیشه شاهد نوسان در فرکانس شبکه خواهیم بود. در ادامه روش قدم به قدم طراحی بارزدایی زیر فرکانس برای یک شبکه قدرت بزرگ و به‌هم پیوسته ارایه می‌شود. از مزایای این روش، لحاظ کردن دینامیک توربین و ژنراتورهای شبکه و درنتیجه جلوگیری از عملکرد رله‌ها در برابر نوسانات طبیعی سیستم می‌باشد. مضاف بر این، طرح پیشنهادی از حساسیت کافی برای حفظ پایداری شبکه نیز برخوردار

است.

۲-۱-قدم نخست: تعیین بیشترین مقدار عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرف

در ابتدا باید مشخص شود که به‌ازای چه مقدار عدم‌تعادل (imbalance) بین توان مکانیکی و مصرف مایل هستیم که از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری کنیم. از نظر تئوری، طرح بارزدایی زیر فرکانس را می‌توان به‌گونه‌ای ارایه کرد که به‌ازای هر مقدار عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرفی از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری کند. با این‌حال طراحی بارزدایی زیر فرکانس به‌ازای عدم‌تعادل بیش از ۵۰ درصد بین توان مکانیکی و مصرف، از نظر عملی توصیه نمی‌شود چرا که ممکن است به‌ازای اغتشاشات و پیشامدهای کوچک، بارزدایی انجام شده بیش از مقدار مورد نیاز شده و علاوه بر اینکه مقدار انرژی تغذیه نشده را افزایش می‌دهد، ممکن است باعث افزایش فرکانس شبکه و در نتیجه صدمه به سایر ژنراتورها شود[۱۴]. به‌طور معمول جلوگیری از فروپاشی شبکه به‌ازای عدم تعادل ۳۳ تا ۵۰ درصد، مقدار مناسبی است. عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$imbalance = \frac{P_{mech} - P_{load}}{P_{load}} \qquad (۱)$$

مثلا چنانچه بخواهیم به‌کمک بارزدایی زیر فرکانس از فروپاشی کامل شبکه در صورت قطع کامل نیروگاهی که ۳۰ درصد از بار شبکه را تامین می‌کند جلوگیری کنیم مقدار عدم‌تعادل برابر ۳۰ درصد خواهد بود یا اینکه بخواهیم بارزدایی زیر فرکانس را برای قطع دو یا چند نیروگاه که ۴۵درصد از بار شبکه را تامین می‌کنند طراحی کنیم مقدار عدم‌تعادل برابر ۵۰ درصد خواهد شد. لازم به‌ذکر است که هر چند ممکن است قطع کامل یک یا چند نیروگاه یک پیشامد محتمل نباشد ولی باید دقت کرد که بارزدایی زیر فرکانس یک سیستم دفاعی در برابر پیشامدهای با احتمال کم و تاثیرات مخرب زیاد است (مثلا قطع کامل یک نیروگاه گازی به‌دلیل قطع ناگهانی سیستم گازرسانی به نیروگاه).

۲-۲-قدم دوم: محاسبه مقدار باری که باید به‌صورت خودکار قطع شود تا از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری گردد

در این مرحله مقدار باری را که باید به‌صورت خودکار قطع شود تا از فروپاشی کامل شبکه به‌دلیل عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرفی جلوگیری شود باید محاسبه کرد. به‌دلیل کمبود تولید در شبکه، فرکانس شبکه افت کرده و چنانچه افت فرکانس زیاد باشد و به زیر فرکانس بحرانی ($f_{critical}$) برسد، رله‌های حفاظتی ژنراتور باعث قطع ژنراتورهای شبکه شده تا از صدمه به آن‌ها جلوگیری گردد. این موضوع خود عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرفی را افزایش داده و فروپاشی شبکه را محتمل‌تر می‌کند. برای جلوگیری از این امر، مقدار بارزدایی انجام شده باید به‌گونه‌ای باشد که فرکانس شبکه همواره بزرگ‌تر از فرکانس بحرانی شود. فرکانس بحرانی در شبکه‌های مختلف متفاوت بوده و به تنظیمات رله‌های زیر فرکانس ژنراتورها بستگی دارد مقدار این فرکانس برای شبکه‌های ۵۰ هرتز معمولا ۴۷,۵ هرتز است.

به‌دلیل رفتار دینامیکی موتورهای القایی، توان اکتیو مصرفی این موتورها با افت فرکانس کاهش می‌یابد. ضریب کاهش بار شبکه به‌دلیل افت فرکانس (d) وابستگی بین بار و فرکانس را مشخص کرده و به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود[۱۱]:

$$\frac{\Delta P_{load}}{P_{load\,0}} = d \cdot \frac{\Delta f}{f_0} \qquad (۲)$$

به‌عنوان مثال، d=1.2 به این معنی است که یک درصد تغییر در فرکانس باعث ۱,۲ درصد تغییر در بار شبکه خواهد شد. با توجه به اینکه در نظر نگرفتن این پارامتر به هنگام طراحی بارزدایی زیر فرکانس باعث بارزدایی بیش از حد نیاز (اضافه بارزدایی) خواهد شد، در نظر گرفتن این پارامتر در محاسبه مقدار بارزدایی ضروری است.

برای اینکه فرکانس شبکه به‌ازای عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرف مشخص شده در قدم نخست (imbalance)، به کمتر از فرکانس بحرانی ($f_{critical}$) افت نکند، مقدار بارزدایی مورد نیاز باید از رابطه زیر محاسبه شود[۹]:

$$TLS = \frac{imbalance - d(1 - \frac{f_{critical}}{50})}{1 - d(1 - \frac{f_{critical}}{50})} \qquad (۳)$$

با توجه به رابطه فوق چنانچه بخواهیم به‌ازای ۵۰ درصد عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرف (imbalance=0.5) در شبکه‌ای با d=1.2 و $f_{critical}$ = 47.5Hz از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری کنیم باید ۴۶/۸۱ درصد بار شبکه را به‌صورت خودکار قطع کنیم (TLS=0.4681).

۲-۳-قدم سوم: تعیین تعداد مراحل قطع بار و مقدار باری که در هر مرحله باید قطع شود

تمام مقدار بارزدایی محاسبه شده در قدم دوم را می‌توان در یک مرحله و به‌صورت یکجا انجام داد. عیب این کار این است که به‌ازای اغتشاشات و پیشامدهای سبک، بارزدایی انجام شده بیش از مقدار مورد نیاز خواهد شد (اضافه بارزدایی رخ خواهد داد). به همین دلیل لازم است که بارزدایی مورد نیاز در چندین مرحله انجام شود. از طرف دیگر، چنانچه تعداد مراحل بارزدایی خیلی زیاد باشد ممکن است به‌ازای اغتشاشات و پیشامدهای شدید، بازیابی فرکانس به کندی انجام شده و پایداری شبکه به مخاطره افتد. برای جلوگیری از اضافه بارزدایی و همچنین به مخاطره افتادن پایداری شبکه معمولا بارزدایی در ۳ تا ۶ مرحله انجام می‌شود[۱۵].

مقدار بارزدایی مورد نیاز در هر مرحله به تعداد مراحل بارزدایی و کل بارزدایی مورد نیاز (TLS) بستگی دارد. بارزدایی کم در مراحل اولیه و زیادتر در مراحل بعدی برای اغتشاشات و پیشامدهای سبک مناسب بوده در حالی‌که بارزدایی زیاد در مراحل اولیه و کم‌تر در مراحل بعدی برای اغتشاشات و پیشامدهای شدید مناسب‌تر است. روش میانه این است که بارزدایی مورد نیاز به‌صورت یکسان بین تمام مراحل تقسیم شود. به‌عنوان مثال چنانچه تعداد مراحل بارزدایی ۵ مرحله و کل بارزدایی مورد نیاز ۴۶,۸۱ درصد باشد، در هر مرحله ۹,۳۶ درصد از بار شبکه به‌صورت خودکار قطع شود.

۲-۴-قدم چهارم: تعیین فرکانس و تاخیر زمانی هر مرحله از بارزدایی

فرکانسی را که در هر مرحله، بارزدایی باید در آن انجام شود می‌توان با توجه به تعداد مراحل بارزدایی و فرکانس بحرانی شبکه مشخص کرد. به‌عنوان مثال چنانچه تعداد مراحل بارزدایی ۵ و فرکانس بحرانی شبکه ۴۷,۵ هرتز باشد با در نظر گرفتن ۰,۶ هرتز به‌عنوان حاشیه اطمینان بین فرکانس بحرانی و فرکانس مرحله پنجم، فرکانس بارزدایی مرحله پنجم برابر ۴۸,۱ هرتز خواهد شد. برای مراحل بعدی بارزدایی می‌توان از فرکانس ۰,۳ هرتز به‌عنوان حاشیه اطمینان

اســتفاده کرد. بدین‌ترتیب، فرکانس بارزدایی مراحل چهار، ســه، دو و یــک، بــه ترتیب برابــر ۴۸,۴ هرتز، ۴۸,۷ هرتــز، ۴۹ هرتز و ۴۹,۳ هرتز خواهد شــد. دلیل اینکه حاشیه اطمینان بین فرکانس بارزدایی مرحله پنجم و فرکانس بحرانی شبکه (یعنی ۰,۶ هرتز) بیش از فاصله اطمینان بین مراحل مختلف بارزدایی (یعنی ۰,۳ هرتز) در نظر گرفته شــده این است که اطمینان حاصل شــود که فرکانس شبکه در هیچ شــرایطی به فرکانس بحرانی و یا کمتر از آن افت نمی‌کند چرا که در صورت کاهش فرکانس شبکه به فرکانس بحرانی، حفاظت ژنراتورهای شــبکه باعث قطع ژنراتورها شــده و عدم‌تعادل بیــن توان مکانیکی و مصرف را بیشتر خواهد کرد.

بــرای تعیین تاخیر زمانــی هر مرحله، باید در نظر داشــت که تاخیر زمانی طولانی ممکن اســت باعث نوســانات تــوان و تاخیر در بازیابی فرکانس شبکه شود. به‌همین دلیل بارزدایی بدون تاخیر در مقایسه با بارزدایی با تاخیر زمانی مناسب‌تر است.

برای درک بهتر موضوع یک پست که دارای ۱۰ فیدر است را در نظر می‌گیریــم و فــرض می‌کنیم بار هر فیدر ۲ مــگاوات بوده و در طرح بارزدایی زیر فرکانس لازم باشــد که ۵۰ درصد از بار این پســت در ۵ مرحله به‌شرح زیر قطع شود:

فیدر نخســت در فرکانس ۴۹,۳هرتز، فیدر دوم در فرکانس ۴۹هرتز، فیــدر ســوم در فرکانــس ۴۸,۷هرتــز، فیــدر چهــارم در فرکانــس ۴۸,۴هرتــز و فیــدر پنجــم در فرکانــس ۴۸هرتز. چنانچه شــدت پیشامد به‌صورتی باشــد که فرکانس به ۴۸,۹ هرتز افت کند رله‌های فرکانســی فیــدر نخســت و دوم بــا فاصله بســیار کمــی از یکدیگر (در حــد چند میلی‌ثانیه که بســتگی به نرخ افــت فرکانس دارد) این افــت فرکانس را حس کرده و باید فیدر نخســت و دوم را قطع کنند. چــون تاخیر زمانی بین این دو مرحله خیلی کم در نظر گرفته شــده اســت (بدون تاخیــر زمانی)، این دو فیدر تقریبــا هم‌زمان یا با فاصله زمانی بســیار کمی از هــم (در حد چند میلی ثانیه) قطع می‌شــوند. بنابراین چنانچه پیشــامد به قدری شــدید باشــد که فرکانس از حد تنظیم رله‌های زیرفرکانسی کمتر شود این رله‌ها فعال شده و مستقل از ســایر رله‌ها وقتی کــه تاخیر زمانی آن‌ها کــه معمولا در حد صفر تا چند صد میلی‌ثانیه اســت ســپری شــد فیدرهای مربوطه را قطع می‌کنند. منظور از تاخیر زمانی در اینجا تاخیر زمانی است که توسط کاربر در رله اعمال می‌شــود و مســتقل از زمان پردازش رله و ارسال سیگنال به بریکرها است. بنابراین در شبیه‌سازی‌ها، باید تاخیر زمانی عملکــرد بریکر و زمان مورد نیاز برای تصمیم‌گیری رله در نظر گرفته شود [۱۷].

۲-۵-قدم پنجم: توزیع بارزدایی بر روی پست‌ها و فیدرهای شبکه

بارزدایی مورد نیاز باید بر روی پست‌ها و فیدرهای شبکه، توزیع شود. فیدرهایی که بارهای اســتراتژیک و مهــم را تغذیه می‌کنند را باید از طرح بارزدایی خارج کرد تا تغذیه پیوســته و مداوم آن‌ها دچار اشکال نشــود. همچنین باید بار فیدرهای انتخاب شــده بــرای بارزدایی زیر فرکانس را در فصول مختلف ســال بررســی نمود تا اطمینان حاصل شــود که تغییرات بار فیدرهای شــبکه در فصول مختلف سال، باعث تغییــرات قابل ملاحظه‌ای در کل بار مورد نیاز برای بارزدایی شــبکه نمی‌شوند.

۳- بررســی طــرح بارزدایــی بــا اســتفاده از نــرم افزارهای شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت

برای اطمینان از موثر بودن طرح بارزدایی زیر فرکانس پیشنهادی، باید آن را به کمک شبیه‌ســازی‌های حوزه زمان ارزیابی کرد. بدین منظور شــبکه مورد مطالعه باید با دقت مناســبی مدل شــده و از مدل‌های مناســب بار، سیستم تحریک ژنراتور، گاورنر، پایدارساز سیستم قدرت و غیره بهره گرفت[۱].

۴- طراحــی بارزدایــی زیر فرکانس مبتنی بــر افت فرکانس برای یک شبکه واقعی

با توجه به مطالب بیان شده در گام دوم، در این بخش، طرح بارزدایی زیر فرکانس بر روی یک شبکه واقعی شبکه پیاده‌سازی می شود.

سیســتم مورد مطالعه، شــبکه تولید و انتقال جنوب شرق ایران است که ناحیه بســیار وسیعی از ایران را پوشش می‌دهد. شکل (۱) نمودار تک‌خطی این شــبکه را نشان می‌دهد. در این شبکه فرض شده است که ۴۰ درصد بار شــبکه به‌دلیل اســتفاده وسیع از کولرهای گازی در فصل تابستان بصورت موتور القایی بوده و ۶۰ درصد بقیه به‌صورت بار وابســته به ولتاژ و فرکانس است. سایر اجزای شــبکه نظیر ژنراتورها به‌همراه سیستم تحریک، گاورنر، پایدارساز سیستم قدرت و غیره نیز به‌نحو مناسبی مدل شده‌اند.

در طرح بارزدایی زیر فرکانس برای شــبکه جنوب شــرق، هدف این اســت که به ازای ۵۰ درصد عدم‌تعــادل بین توان مکانیکی و مصرفی، از فروپاشــی کامل شبکه جلوگیری گردد. فرکانس بحرانی شبکه برابر ۴۷,۵ هرتز و ضریب کاهش بار به‌دلیل افت فرکانس برابر ۱,۲ در نظر گرفته شده است. با استفاده از مراحل یک تا پنج بیان شده در بخش دو، طرح ارایه شده بصورت جدول (۱) خواهد بود.

جدول ۱: طرح پیشنهادی بارزدایی فرکانس مبتنی بر افت فرکانس برای شبکه جنوب شرق

Stage	Frequency Threshold (Hz)	Percentage of Shed Load
1	49.3	9.4
2	49	9.4
3	48.7	9.4
4	48.4	9.4
5	48.1	9.4

با توجه به این جدول مشــخص اســت که بارزدایــی زیر فرکانس در ۵ مرحلــه انجــام شــده و در هر مرحلــه ۹,۴ درصد بار اولیه شــبکه قطع می‌شــود تا از فروپاشــی کامل شــبکه به‌ازای بیشینه ۵۰ درصد عــدم تعادل بین تــوان مکانیکی و مصرفی جلوگیری شــود. فرکانس مراحل یک تا پنج نیز با توجه به معیار بیان شده در بخش دو برابر با ۴۹,۳، ۴۹، ۴۸,۷، ۴۸,۴ و ۴۸,۱ هرتــز خواهد بود. جدول (۲) نتیجه شبیه‌ســازی شبکه را به‌ازای پیشامدها و اغتشاشات سبک، متوسط و شدید نشان می‌دهد.

جدول ۲: بارزدایی‌های انجام شده به‌ازای عدم تعادل‌های گوناگون بین توان مکانیکی و مصرفی

Imbalance%	Activated Stage
5	NIL
10	Stage 1
15	Stage 1
20	Stage 2
25	Stage 2
30	Stage 3
35	Stage 3
40	Stage 4
50	Stage 5

شکل ۱: نمودار تک خطی شبکه جنوب شرق (مربوط به سال ۱۳۸۸)

شکل ۲: نمودار فرکانس شبکه به‌ازای عدم تعادل‌های مختلف بین تولید و مصرف

شکل ۳: نمودار بار شبکه به‌ازای عدم تعادل‌های مختلف بین تولید و مصرف

با توجه به این جدول، به ازای ۵ درصد عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصـــرف، هیچ یـــک از مراحل پنج‌گانه بارزدایی زیـــر فرکانس فعال نشـــده و بدون قطع بـــار، فرکانس به محدوده مجاز بـــر می‌گردد و یا بـــه‌ازای ۲۵ درصد عدم تعادل، برای جلوگیری از فروپاشـــی شـــبکه، مرحله دو طرح بارزدایی فعال شـــده و حدود ۱۸٫۸ درصد بار شـــبکه قطع شـــده و پس از آن، فرکانس بـــه محدوده مجاز خود برمی‌گردد. در شـــکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب، نمودار فرکانس و بار شبکه به‌ازای عـــدم تعادل‌های مختلف بین بار و تولید نشـــان داده شـــده اســـت. با توجه به این شـــکل‌ها مشخص اســـت که طرح بارزدایی زیر فرکانس طراحی شده به خوبی توانســـته است از فروپاشی کامل شبکه به‌ازای پیشامدهای سبک، متوسط و شدید جلوگیری کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقالـــه روش قدم به قدم طرح بارزدایی زیر فرکانس برای یک شبکه قدرت بزرگ به‌هم پیوسته ارایه شده و بر روی یک شبکه واقعی نیز تست شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که این طرح قادر است به ازای حداکثـــر تا ۵۰ درصد عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرف، از فروپاشـــی کل شبکه جلوگیری کرده و به‌عنوان یک طرح دفاعی موثر در صورت بروز حوادث و پیشامدهای ناخواسته مد نظر قرار گیرد.

۶- مراجع

[1] A. Kulkarni, W. Gao, and J. Ning, "Study of power system load shedding scheme based on dynamic simulation," in Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, 2010, pp. 1-7.

[2] N. Sapari, H. Mokhlis, J. A. Laghari, A. Bakar, and M. Dahalan, "Application of load shedding schemes for distribution network connected with distributed generation: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 858-867, 2018.

[3] X. Shan and T. Zhe, "A load shedding method based on the power vacancy sensitivity analysis," in CICED 2010 Proceedings, ed, 2010.

[4] J. Wang, H. Zhang, and Y. Zhou, "Intelligent under frequency and under voltage load shedding method based on the active participation of smart appliances," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, pp. 353-361, 2017.

[5] N. M. Sapari, H. B. MOKHLIS, J. A. Laghari, A. B. AB HALIM, H. Mohamad, and M. R. M. Dahalan, "Load shedding scheme based on frequency and voltage stability for an islanding operation of a distribution network connected to mini-hydro generation," Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 25, pp. 1852-1863, 2017.

[6] M. Marzband, M. M. Moghaddam, M. F. Akorede, and G. Khomeyrani, "Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids," Electric Power Systems Research, vol. 140, pp. 78-86, 2016.

[7] B. Delfino, S. Massucco, A. Morini, P. Scalera, and F. Silvestro, "Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes," in Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, 2001, pp. 307-312.

[8] T. Shekari, A. Gholami, F. Aminifar, and M. Sanaye-Pasand, "An adaptive wide-area load shedding scheme incorporating power system real-time limitations," IEEE Systems Journal, vol. 12, pp. 759-76, 2018.

[9] H. Seyedi, M. Sanaye-Pasand, and M. Dadashzadeh, "Design and simulation of an adaptive load shedding algorithm using a real network," in Power India Conference, 2006 IEEE, 2006, p. 5 pp.

[10] W. Gu, W. Liu, J. Zhu, B. Zhao, Z. Wu, Z. Luo, et al., "Adaptive decentralized under-frequency load shedding for islanded smart distribution networks," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, pp. 886-895, 2014.

[11] U. Sultana, A. B. Khairuddin, M. Aman, A. Mokhtar, and N. Zareen, "A review of optimum DG placement based on minimization of power losses and voltage stability enhancement of distribution system," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 63, pp. 363-378, 2016.

[12]T. Jiang, L. Bai, H. Jia, H. Yuan, and F. Li, "Identification of voltage stability critical injection region in bulk power systems based on the relative gain of voltage coupling," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, pp. 1495-1503, 2016.

[13]M. Abedini, M. Sanaye-Pasand, and S. Azizi, "Adaptive load shedding scheme to preserve the power system stability following large disturbances," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 8, pp. 2124-2133, 2014.

[14] G. Isazadeh, A. Khodabakhshian, and E. Gholipour, "New intelligent controlled islanding scheme in large interconnected power systems," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, pp. 2686-2696, 2015.

[15] M. Sanaye Pasand and H. Seyedi, "Centralized adaptive load shedding methods to enhance power system voltage stability margins," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 3, pp. 669-679, 2008.

[16] P. Le Roux and R. Bansal, "Transient Stability by means of Generator Tripping, Under Frequency Load Shedding and a Hybrid Control Scheme," International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 19, 2018.

[17] H. Seyedi and M. Sanaye-Pasand, "New centralised adaptive load-shedding algorithms to mitigate power system blackouts," IET generation, transmission & distribution, vol. 3, pp. 99-114, 2009.

[18] G. Verbic and F. Gubina, "A new concept of voltage-collapse protection based on local phasors," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, pp. 576-581, 2004.

[19] K. Mehrabi, S. Afsharnia, and S. Golshannavaz, "Toward a wide-area load shedding scheme: Adaptive determination of frequency threshold and shed load values," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 28, p. e2470, 2018.

[20] J. Jallad, S. Mekhilef, H. Mokhlis, and J. A. Laghari, "Improved UFLS with consideration of power deficit during shedding process and flexible load selection," IET Renewable Power Generation, vol. 12, pp. 565-575, 2018.

[21] Y.-Y. Hong and S.-F. Wei, "Multiobjective underfrequency load shedding in an autonomous system using hierarchical genetic algorithms," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 1355-1362, 2010.

[22] W. Nakawiro and I. Erlich, "Optimal load shedding for voltage stability enhancement by ant colony optimization," in Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP'09. 15th International Conference on, 2009, pp. 1-6.

[23] G. Isazadeh, R.-A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Modeling and optimization of an adaptive dynamic load shedding using the ANFIS-PSO algorithm," Simulation, vol. 88, pp. 181-196, 2012.

[24] T. Shekari, F. Aminifar, and M. Sanaye-Pasand, "An analytical adaptive load shedding scheme against severe combinational disturbances," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, pp. 4135-4143, 2016.

❋❋❋

الگوریتم جدید برای ردیابی اهداف راداری با مانور بالا در مختصات قطبی مبتنی بر روش نویز معادل

علی کارساز/ استادیار گروه برق/ موسسه آموزش عالی خراسان/ karsaz@khorasan.ac.ir

چکیده

روشی جدید بر اساس تبدیل ماتریس کواریانس خطا از دستگاه مختصات قطبی به کارتزین برای مساله ردیابی اهداف با مانور بالا ارایه گردیده است. با استفاده از این تبدیل، فیلتر کالمن خطی استاندارد می‌تواند برای دسته مسایلی که ردیابی اهداف با مانور در مختصات قطبی و بر اساس دریافت پارامترهای فاصله و سمت انجام می‌گیرد ومعادله مشاهده آن‌ها غیرخطی است، بکار گرفته شود. این مقاله سعی دارد رابطه‌ای بین کواریانس نویز اندازه‌گیری شده در دستگاه مختصات قطبی و کواریانس نویز اندازه‌گیری شده در مختصات کارتزین برقرار کند. افزایش دقت تخمین پارامترهای هدف، و نیز سادگی پیاده سازی از جمله مزایای این تبدیل در مقایسه با روش‌های فیلتر کالمن توسعه یافته و فیلتر کالمن بی‌بو است. اجرای برنامه ردیابی هدف با در نظر گرفتن بازه وسیعی از سناریوهای هدف بر اساس روش تکرار مونت کارلو برتری روش پیشنهادی را نسبت به دو روش مرسوم نشان می دهد.

کلمات کلیدی: ردیابی اهداف با مانور، روش نویز معادل، تبدیل مختصاتی نویز اندازه‌گیری، فیلتر کالمن EKF، فیلتر کالمن UKF

A new Modified Algorithm for Target Tracking in Polar Coordinates Based on Equivalent Noise Methodology

Ali Karsaz/Assistant Professor of Electrical Engineering/Khorasan Institute of Higher Education/ karsaz@khorasan.ac.ir

Abstract

An innovation technique is presented to transform the maneuvering target tracking problems from Polar coordinates to Cartesian coordinates, therefore a standard linear Kalman filter can be easily applied to them. Extended Kalman filter and unscented Kalman filter are two conventional methodologies for nonlinear estimation. In this paper a new relation between measurement noise covariance in sensor coordinates and the measurement noise covariance in Cartesian coordinates for Kalman filter implementation is proposed. In addition the proposed technique is based on the well-known equivalent noise approaches. The simplicity of implementation and target tracking improvement with computation effort reduction, are three important advantages of the new approach comparing with extended Kalman filter and unscented Kalman filter. Simulation results show this modified filter can predict target parameters more effectively and accurately than EKF and UKF.

Keywords: High maneuvering target tracking, Equivalent noise method, Measurement noise transform, UKF, EKF.

۱- مقدمه

برای ردیابی صحیح اهداف راداری با مانور MTT[1] روش‌های زیادی در مقالات مختلف ارایه شده است [۱]-[۴]. فیلتر کالمن یک روش شناخته شده برای تخمین حالت سیستم‌های دینامیک خطی با معیار کمترین مربعات خطا می‌باشد که در سال ۱۹۶۰ توسط آقای کالمن معرفی گردید[۵]. در توسعه فیلتر کالمن خطی برای حل سیستم‌های غیرخطی در طول چند دهه گذشته روش‌های گوناگونی معرفی گردیده است، که متداول‌ترین آن‌ها فیلتر کالمن توسعه یافته[2] (EKF) و در دو دهه اخیر فیلتر کالمن بی‌بو[3] (UKF) پیشنهاد شده است. فیلتر EKF با تقریب خطی توابع غیرخطی، به‌طور گسترده‌ای برای تخمین ردیابی سیستم‌های غیرخطی بکار می‌رود[۶-۸]. فیلتر EKF که بر پایه خطی‌سازی درجه اول بنا شده است[۸]، در مواجهه با مسایل MTT دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. در فیلتر EKF در مرحله خطی‌سازی نیاز به محاسبه ماتریس ژاکوبین بوده که در ردیابی اهداف با مانور بالا در برخی از سناریوها به علت تغییرات ناگهانی در شتاب هدف، محاسبه ماتریس ژاکوبین[4] با مشکلات گوناگونی روبه‌رو است. به‌علت استفاده از تقریب مرتبه نخست در الگوریتم EKF در برخی از موارد محاسبه ماتریس کواریانس ژاکوبین که خود مبتنی بر تخمین مولفه‌های بردار حالت مرحله قبل است، با خطاهای زیادی روبه‌رو است که واگرایی فیلتر را در بر دارد. علاوه بر این حجم بالای محاسباتی در این الگوریتم با توجه به نیاز بلادرنگ[5] در ردیابی هدف و اهمیت فوق‌العاده زمان در محاسبات، یکی از معضلات این روش می‌باشد[۹].

فیلتر کالمن‌بی‌بو با در نظر گرفتن یک مجموعه کمینه از بردارهای موسوم به بردار سیگمای[6] حالات سیستم که توسط جولیر و اولمان [۹]-[۱۱] معرفی گردید، جایگزین خوبی برای فیلتر کالمن توسعه یافته و یک روش موثر در حل معادلات غیرخطی محسوب می‌شود. UKF حالات و کواریانس خطای تخمین سیستم غیرخطی را با دقت بیشتری نسبت به EKF بدست می‌آورد که البته مساله حجم بالای محاسبات و پیچیدگی پیاده‌سازی حتی بیشتر نسبت به روش EKF همچنان باقی می‌ماند[۱۰]-[۱۴].

در این مقاله، یک شیوه جدید برای تبدیل ماتریس کواریانس نویز اندازه‌گیری شده از مختصات قطبی به کارتزین، ارایه می‌شود. توضیح مختصری از مساله MTT در بخش (۲) آمده است. اصول کارکرد فیلتر کالمن اعم از خطی یا غیرخطی و بررسی اجمالی از الگوریتم‌های EKF و UKF در بخش‌های (۳)، (۴) و (۵) بیان می‌شود. در بخش (۶) فیلتر کالمن تصحیح شده پیشنهادی جهت برطرف نمودن مشکلات دو روش غیرخطی بیان شده ارایه شده است. عملکرد مناسب فیلتر پیشنهادی به‌ویژه برای اهداف با دینامیک نویزی بالا در بخش نتایج شبیه‌سازی بخش(۶) ذکر گردیده است و با نتایج بدست آمده با روش‌های بالا مقایسه شده است.

۲- مساله ردیابی اهداف با مانور

مدل رایج در شبیه‌سازی سیستم‌های عدم قطعیت زمان گسسته، فضای حالت به شکل مدل‌های استاندارد بیزین[7] و فیشر است [۱۳]. مدل بیزین زمان گسسته برای سیستم‌های خطی عدم قطعیت به شکل زیر است:

$$X(n+1)=F(n)X(n)+G(n)w(n) \qquad (۱)$$
$$z(n)=H(n)X(n)+v(n)$$

در این مدل‌سازی فضای حالت برای ممان‌های متغیرهای تصادفی روابط زیر برقرار است.

$$E\{v(n_1)v^T(n_2)\}=\begin{cases}R(n_1) & n_1=n_2\\ 0 & n_1\neq n_2\end{cases}$$
$$E\{w(n_1)w^T(n_2)\}=\begin{cases}Q(n_1) & n_1=n_2\\ 0 & n_1\neq n_2\end{cases}$$
$$E\{X(0)X^T(0)\}=\psi,\ E\{X(0)\}=0$$
$$E\{w(0)\}=0,\ E\{v(0)\}=0$$
$$E\{v(.)w(.)^T\}=0$$

که در آن X(n) بردار حالات سیستم، Z(n) بردار مشاهدات، X(o) شرایط اولیه بردار حالت می‌باشد. F(n) ماتریس گذار حالت، G(n) ماتریس نویز سیستم است و w(n) اغتشاش ورودی یا دینامیک سیستم، سفید و با کواریانس Q(n) در نظر گرفته می‌شود. H(n) ماتریس اندازه‌گیری و V(n) نویز اندازه‌گیری بوده که به شکل گوسی با ماتریس کواریانس R(n) فرض می‌شود. مشاهده می‌شود که در مدل بیزین، هر یک از عدم قطعیت‌های سیستم به شکل یک فرایند اتفاقی[8] با ممان‌های مشخص[9] بیان می‌شود. در بسیاری از کاربردها اغتشاش ورودی W(.) می‌تواند کاملا ناشناخته[10] در نظر گرفته شود، به این‌گونه سیستم‌ها در مراجع ریاضی مدل‌های عدم قطعیت فیشر[11] گفته می‌شود[۱۳]. در مساله MTT برای یک هدف دو بعدی، مدل مشاهدات در مختصات کارتزین به شکل زیر است:

$$Z_c(n)=H(n)X_c(n)+V_c(n) \qquad (۲)$$

که اندیس c در رابطه (۲) بیانگر مدل‌سازی در مختصات کارتزین است. هر کدام از مقادیر رابطه بالا در رابطه (۳)آمده است.

$$X_c(n)=\begin{bmatrix}x(n) & v_x(n) & y(n) & v_y(n)\end{bmatrix}^T$$
$$V_c(n)=\begin{bmatrix}V_x(n)\\ V_y(n)\end{bmatrix} \qquad Z_c(n)=\begin{bmatrix}Z_x(n)\\ Z_y(n)\end{bmatrix} \qquad (۳)$$
$$F=\begin{bmatrix}1 & T & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & T\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},\ G=\begin{bmatrix}T^2/2 & T & 0 & 0\\ 0 & 0 & T^2/2 & T\end{bmatrix}^T,\ H=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

$X_c(n)$ ماتریس حالات در مختصات کارتزین شامل موقعیت هدف در راستای محور x، $v_x(n)$ سرعت هدف در راستای محور x و y(n) و $v_y(n)$ به ترتیب موقعیت و سرعت در راستای محور y می‌باشد. به این ترتیب مدل ارایه شده (۱) با توجه به بردار حالت تعریف شده (۳) یک مدل سرعت ثابت است. ماتریس کواریانس خطای اندازه‌گیری شده در مدل کارتزین به شکل زیر می‌باشد.

$$R_c=E\left\{V_c(n)V_c^T(n)\right\} \qquad (۴)$$

با توجه به روابط (۱) و (۲) که روابطی خطی هستند یک فیلتر کالمن استاندارد به شکل زیر قابل پیاده‌سازی است[۲]:

$$\hat{X}(n+1|n+1)=$$
$$F(n)\hat{X}(n|n)+K(n+1)[z(n+1)-H(n+1)F(n)\hat{X}(n|n)]$$
$$K(n+1)=\Sigma(n+1|n+1)H^T(n+1)R^{-1}(n+1) \qquad (۵)$$
$$\Sigma(n+1|n+1))=$$

$$\Sigma(n+1|n)-\Sigma(n+1|n)H^T(n+1)[R(n+1)$$
$$+H(n+1)\Sigma(n+1|n)H(n+1)^T]^{-1}H(n+1)\Sigma(n+1|n)\ \ \Sigma(n+1|n)$$
$$=F(n)\Sigma(n|n)F^T(n)+G(n)Q(n)G^T(n)\Sigma(0|0)=0,\ \hat{X}(0|0)=0$$

در رابطــه (۵)، k(n+1) بهعنــوان بهره فیلتر کالمــن و Σ(n+1|n+1) بهعنوان ماتریس کواریانس تخمین در نظر گرفته شــده فیلتر کالمن با اســتفاده از روابط بازگشتی سعی در بدست آوردن بهترین تخمین در هر لحظه با توجه به تخمین مرحله قبل و مشاهده جدید می‌کند. نکته قابل توجه در ردیابی اهداف راداری این اســت که رادار بهعنوان سنسور اندازه‌گیری پارامترهای هدف، فاصله تا هدف (R) و زاویه دید هدف (θ) را نسبت به شمال جغرافیایی و در هر مرحله نمونه‌برداری در اختیار قرار می‌دهد، حال آنکه فرمول (۱) و (۲) شبیه‌ســازی رادار در مختصات کارتزین است و فیلترکالمن استاندارد نیز بر اساس رابطه (۱) که یک رابطه خطی اســت عمل می‌کند. شکل (۱) برای توضیح اصــول کارکرد فیلترکالمن در دو مختصات کارتزین و قطبی ترســیم شده است.

متحرک در صفحه دو بعدی X و Y از نقطه B در حال حرکت اســت (مســیر آبی) مشــاهده‌گر یا رادار در مبدا مختصــات در نقطه A قرار داشته و هدف متحرک p را با فاصله R و تحت زاویه θ در نقطه شروع مشــاهده می‌کند (مســیر قرمز). در واقع آنچه رادار از هدف مشاهده می‌کنــد فاصله قرارگیری هــدف و زاویه دیــد آن از نقطه قرارگیری رادرا اســت. طبیعتا به‌علت وجود خطای مشاهده در مختصات قطبی، مختصات و یا مســیر واقعی هدف در دســترس نبوده تنها مشاهدات رادار که همان مسیر قرمز است در اختیار قرار دارد بنابراین بکارگیری یک فیلترکالمن در مختصات کارتزین با استفاده از مشاهدات راداری در مختصات قطبی یا بردار در هر لحظه و یافتن بهترین تخمین برای بردار حالت $x(n)$ یا $\hat{x}(n)$ می‌باشــد (مسیر ســبز). دینامیک واقعی رادار بهعنــوان سنســور اندازه‌گیری پارامترهای هــدف در مختصات قطبی یا مختصات سنســور[۱۲] شــامل فاصله قرارگیــری هدف و زاویه قرارگیری آن نسبت به رادار، بهعنوان بردار مشاهده سیستم به شکل زیر بیان می‌شود.

$$\begin{bmatrix} Z_R(n) \\ Z_\theta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(n) \\ \Theta(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_R(n) \\ V_\theta(n) \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

$V_R(n)$ و $V_\theta(n)$ به‌ترتیــب عنوان خطاهــای اندازه‌گیری موقعیت و ســمت هدف به صورت نویزهای ســفید با توزیع گوسی بوده از این‌رو مقادیر ثابتــی از انحراف معیار ($\delta_R(n)$، $\delta_\theta(n)$) و واریانس معرفی می‌گردند. بنابراین $V_R(n)$ و $V_\theta(n)$ در هر لحظه مقادیری نامشخص با خصوصیات آماری معین داشــته که بیشتر در به‌صورت تقریبی در کاتالوگ‌هــای رادار ذکــر می‌شــود و در اختیار کاربر می‌باشــند و با توجه به تســت‌های به عمل آمده از رادار در شــرایط استاندارد تست، محاســبه شــده و در کاتالوگ رادار ذکر می‌شود. $Z_R(n)$ و $Z_\theta(n)$ مشــاهدات رادار بوده که در هر لحظــه از زمان با خطاهای $V_R(n)$ و $V_\theta(n)$ در اختیار می‌باشــند بنابراین $V_R(n)$ و $V_\theta(n)$ به شــکل فرایندهای گوســی با میانگین صفر و انحراف معیارهای δ_R، δ_θ در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود.

$$V_\theta(n):N(0,\delta_\theta(n)\quad V_R(n):N(0,\delta_R(n)$$

$$R_p=E\left\{V_p(n)V_p^T(n)\right\}=\begin{bmatrix} \delta_R^2(n) & \delta_{R\theta}(n) \\ \delta_{\theta R}(n) & \delta_\theta^2(n) \end{bmatrix}$$

$$V_p(n)=\begin{bmatrix} V_R(n) \\ V_\theta(n) \end{bmatrix} \qquad (۷)$$

در رابطــه بالا $\delta_{R\theta}$ کواریانــس خطای مشترک R و θ اســت که در صورت ناهمبســته بودن می‌توان آن را صفر فرض نمود. R_p ماتریس کواریانس خطا در مختصات قطبی می‌باشد. روابط بین $R(n)$ و $\theta(n)$ در مختصــات قطبی و بــردار حالت سیســتم $X_c(n)$ در مختصات کارتزین به شکل زیر است:

$$R(n)=\sqrt{x^2(n)+y^2(n)} \qquad (۸)$$

$$\theta(n)=\tan^{-1}\left(\frac{y(n)}{x(n)}\right) \qquad (۹)$$

$$X(n)=R(n)\cos\theta(n) \qquad (۱۰)$$

$$n)=R(n)\sin\theta(n) \qquad (۱۱)$$

شکل ۱: اصول کار فیلتر کالمن در مساله ردیابی هدف دینامیک خطی در مختصات کارتزین و مشاهدات غیرخطی در مختصات قطبی

بـا جایگـذاری (۷)، (۸) و (۹) در رابطـه (۶) مـی تـوان رابطه بین مشـاهدات یا اندازه‌گیری‌ها در مختصات قطبی و حالات سیسـتم در مختصات کارتزین را به شکل زیر بدست آورد:

$$\begin{bmatrix} Z_R(n) \\ Z_\theta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{x^2(n)+y^2(n)} \\ \tan^{-1}(\frac{y(n)}{x(n)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_R(n) \\ V_\theta(n) \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

چنانچه مشـاهده می‌شـود، رابطـه (۱۲) یک رابطـه غیرخطی بین مشاهدات در مختصات سنسور و حالات سیستم در مختصات کارتزین بوده که به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$Z_p(n) = h(X_c(n) \ + V_p(n) \quad (۱۳)$$

h نیزمعـرف تابع غیرخطی و Z_p بردار مشـاهدات در مختصات قطبی می‌باشد.

بـا توجه به غیرخطی بودن رابطه (۱۳)، فیلتر کالمن اسـتانداردکه بر اسـاس مدل خطی دینامیک حرکت هدف و مشـاهدات تحقق یافته اسـت، کارایی ندارد. برای رفع این مشـکل می‌توان از روش‌های حل معادلات غیر خطی نظیر EKF و UKF اسـتفاده نمود. در ادامه ضمن اشـاره مختصر به اصول کار فیلتر کلمن، روابط مورد اسـتفاده در هر یک از روش‌های غیر خطی فوق را بیان نموده، به معرفی روش تبدیلی مورد نظر در ایـن مقاله پرداخته و ضعف‌ها و پیچیدگی‌های حاکم بر روش‌های غیر خطی را بررسی می نمائیم.

۳- اصول کار فیلترهای خطی و غیر خطی مبتنی بر کالمن

تئوری فیلترکالمن، که توسـط آقای کالمن در سال ۱۹۶۰ به سختی به عنوان تز دکتری پذیرفته شـد[۵] و جهت چاپ در مجلات معتبر آن دوره بـا عدم اسـتقبال مواجه گردید، در عمـل یکی از موفقترین روش‌های تخمین و پیش‌بینی محسـوب گردید فیلتر کالمن در سال ۱۹۹۴ به عنـوان موفقترین یا کارآمدترین تئوری از میان تئوری‌های متنـوع کنترلی در انجمن برق و الکترونیک[۱۳] برگزیده شـد. دو دلیل عمده موفقیت فیلترکالمن در کاربردهای وسیع آن از ناوبری، هدایت و رهگیری اهداف راداری گرفته تا پردازش سـیگنال‌های دیجیتال و رفع نویز را می‌توان به شکل زیر دانست:

۳-۱- عدم نیاز به مدل دقیق از دینامیک سیستم

در مـدل دینامیکی حرکت هدف رابطـه (۱) که از آن به عنوان مدل اسـتاندارد بیزین یاد می‌شـود چنانچه اشـاره گردیـد می‌توان عدم قطعیت‌های ناشـی از فرآیند را توسـط W نمایش داد در صورتی که عدم قطعیت مدل یا دینامیک از خطاهای سنسـور اندازه‌گیر بیشـتر باشـد فیلتر کالمن با توازنی کـه بین تخمین یک مرحله رو به جلو و مشاهدات بوجود می‌آورد می‌تواند به یک تخیمن معقول دست یابد.

۳-۲- عدم محدودیت در پیاده‌سازی سخت افزاری

معمـولا از فیلتر کالمن به عنوان یک رویت‌گر بهینه، به عنوان دوگان کنترل بهینه یاد می‌شـود به لحاظ پیاده‌سازی و در بکارگیری عملی بـرای یک کنترل‌کننده بهینه که محصول آن یک بهره فیدبک حالت اسـت نمی‌توان این بهره را بـدون محدودیت افزایش داد این موضوع به محدودیت‌های فیزیکی عملگرهای سیسـتم بـاز می‌گردد. ولیکن در مـورد فیلتر کالمن بهره فیلتر یعنـی k(n) را به هر میزان می‌توان دسـت‌کاری نمود در برخی از روش‌های اصـلاح گام همگرایی حتی این بهره فیلتر به میزان چند برابر مقدار محاسـبه شـده بازتنظیم[۱۴] می‌شود. اسـاس کار فیلترکالمن استاندارد که توسط آقای کالمن در سـال ۱۹۶۵ میلادی مطـرح گردید برای سیسـتم دینامیکی (۱) را می‌توان در رابطه خلاصه شده زیر دید:

$$\hat{X}(n+1|n+1) = \hat{X}(n+1|n) + K(n+1)[Z(n+1) - \hat{Z}(n+1|n)] \quad (۱۴)$$

در واقع در این رابطه که اساس کار کلیه فیلترهای خطی و غیرخطی کالمن مانند EKF و UKF و .... نیز محسـوب می‌شـود مبتنی بر در اختیار داشـتن $\hat{X}(n+1|n)$ به‌عنوان پیش‌بینی یک مرحله رو به جلوی بردار حالت سیستم، در اختیار بودن $\hat{Z}(n+1|n)$ به‌عنوان پیش‌بینی یک مرحله رو به جلوی بردار مشـاهده رادار در لحظه n+1 و نیز امکان به‌روز رسانی K(n+1) به‌عنوان بهره فیلتر کالمن می‌باشد (شـکل ۱). در حالت سیسـتم خطی محاسـبه دو شـبه مشاهده[۱۵] $\hat{X}(n+1|n)$ و $\hat{Z}(n+1|n)$ بـه راحتـی از دینامیک هدف به شکل زیر قابل دسترسی و محاسبه هستند:

$$\hat{X}(n+1|n) = F(n)\hat{X}(n|n) \quad (۱۵)$$

$$\hat{Z}(n+1|n) = H(n+1)F(n)\hat{X}(n|n) \quad (۱۶)$$

چنانچه در شـکل (۱) مشخص است، تخمین یک مرحله رو به جلوی بردار حالت را می‌توان به نوعی امتداد مسـیر پیش‌بینی شده حرکت هدف در لحظه n، برای لحظه n+1 دانسـت. همچنین در فیلتر کالمن اسـتاندارد، اثبات می‌شـود که ماتریس بهره فیلترکالمن به شکل زیر است:

$$K(n+1)=P_{xz}(n|n)\,P_{zz}(n|n)^{-1} \quad (۱۷)$$

در ایـن رابطه $P_{xz}(n|n)$ را ماتریس کواریانس مشـترک بین تخمین بردار حالت و تخمین بردار مشـاهده و $P_{xz}(n|n)$ را به‌عنوان ماتریس کواریانـس تخمین بردار مشـاهده می‌شناسـیم. در حالت تخمین و پیش‌بینی در یک سیسـتم مشـاهده راداری بـا دینامیک خطی در مختصـات کارتزین ماننـد رابطه (۱) و یا معادله مشـاهده غیرخطی ماننـد رابطه (۱۳) همچنان تخمین‌های یـک مرحله رو به جلو برای $\hat{X}(n+1|n)$ بر اسـاس رابطـه (۱۵) و $\hat{Z}(n+1|n)$ به‌صورت زیر قابل دسترس می‌باشند[۱۶]:

$$\hat{Z}(n+1|n) = h[\hat{X}(n+1|n)] = h[F(n)\hat{X}(n|n)] \quad (۱۸)$$

در واقع اسـاس کار فیلترکالمن استاندارد در حالت خطی یا غیرخطی به این صورت می‌باشـد که با تخمین ضریب بهره K(n+1) مناسـب، بینش به مشـاهده $\hat{X}(n+1|n)$ یا تخمین قبلی[۱۶] از مسـیر حرکت هدف و باقیمانده مشـاهده $\delta_z(n+1|n) = Z(n+1) - \hat{Z}(n+1|n)$ ایجـاد توازن نموده به تخمین بعـدی[۱۷] یا نهایی برای $\hat{X}(n+1|n)$ دسـت یابد البته این برقـراری توازن بین این دو نـوع از اطلاعات از تخمین هدف بر اسـاس میزان کواریانس‌هـای این دو یعنی $P_{zz}(n|n)$ و $P_{xz}(n|n)$ در رابطـه بهره کالمن صـورت می‌پذیرد. فیلتر کالمن توسـعه‌یافته تلاش می‌کند مساله محاسـبه ضریب بهره کالمن را در مدل‌هـای غیرخطـی، با خطی‌سـازی روابط و تبدیـل آن‌ها به مدل استاندارد بیزین مرتفع سـازد. حال آنکه فیلتر کالمن بی‌بو مبتنی بر استفاده از مفهوم بردارهای سیگما، جهت محاسبه ماتریس کواریانس مشترک بین تخمین بردار حالت و تخمین بردار مشاهده و $P_{zz}(n|n)$، و ماتریس کواریانس تخمین بردار مشاهده نظیر $P_{zz}(n|n)$ است[۱۶].

۴- فیلتر کالمن توسعه‌یافته

چنانچه بیان شـد یکی از مشکلات استفاده از فیلتر کالمن استاندارد محدودیت کار در مواجهه با مسـایل غیرخطی است. از این‌رو در دهه هشتاد میلادی، روش فیلتر کالمن توسعه‌یافته به‌عنوان یک روش حل مسایل غیرخطی مورد توجه قرار گرفت[۷]. این روش با توجه به بسط

سری تیلور تابع غیرخطی h(0) حول نقطه کار و با صرف‌نظر نمودن از جملات درجه دوم و بالاتر در این بسط، به خطی‌سازی رابطه غیرخطی می‌پردازد بر این اساس می‌توان گفت، خطی‌سازی حول نقطه میانگین و کوواریانس فعلی تخمین حالات هدف، با استفاده از بسط تیلور صورت می‌پذیرد. خطی‌سازی تابع h(0) در رابطه (۱۳) در این روش منجر به معادله رویت‌گر به شکل زیر می‌شود:

$$Z_p(n) = H_j(n)X(n) + V_e(n) \qquad (۱۹)$$

این رابطه با استفاده از بسط تیلور رابطه غیر خطی (۱۳) و صرف نظر کردن از جملات درجه دوم و بالاتر به شکل زیر خواهد بود:

$$Z_p(n) = \begin{bmatrix} \frac{\hat{x}(n-1)}{\sqrt{\hat{x}(n-1)^2+\hat{y}(n-1)^2}} & \frac{\hat{y}(n-1)}{\sqrt{\hat{x}(n-1)^2+\hat{y}(n-1)^2}} \\ \frac{-\hat{y}(n-1)}{\hat{x}(n-1)^2+\hat{y}(n-1)^2} & \frac{\hat{x}(n-1)}{\hat{x}(n-1)^2+\hat{y}(n-1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n) \\ v_x(n) \\ y(n) \\ v_y(n) \end{bmatrix} + V_p(n) \qquad (۲۰)$$

در روش EKF، $\hat{x}(n-1)$ و $\hat{y}(n-1)$ با توجه به مقادیر تخمین شده قبلی مولفه‌های بردار حالت موجود می‌باشددر واقع طبق رابطه (۲۰) ماتریس ژاکوبین که در جایگاه ماتریس مشاهده قرار دارد در هر مرحله بر اساس تخمین بردار بدست آمده حالت از مرحله قبل، تخمین شده می‌شود که این خود باعث افزایش خطای رهگیری می‌شود. محاسبه ماتریس ژاکوبین همراه با خطا بوده و در سناریوهایی که زاویه قرارگیری هدف نزدیک ۹۰ درجه است، ماتریس ژاکوبین صورت پذیرفته در رابطه (۲۰) تقریب خوبی از معادله غیرخطی تانژانت معکوس در رابطه (۹) نبوده و نیاز به در نظر گرفتن مشتقات مراتب بالاتر در بسط سری تیلور بوده امری که در رابطه ماتریس ژاکوبین دیده نمی‌شود.

۵- فیلتر کالمن بی‌بو

جولیر و اولمان [۱۰]-[۱۱]UKF را بر اساس یک روش ابتکاری که جانشین EKF در حل مسایل غیرخطی می‌شود، پیشنهاد دادند. در این نگرش جهت محاسبه ممان‌های $Z_p(n)$ در رابطه غیرخطی (۱۳) از روی ممان‌های $X_c(n)$ ، ابتدا تعداد 2L+1 بردار سیگما ($\chi_i(n)$ برای i=0,…,2L) برای بردار $X_c(n)$ در نظر گرفته می‌شود. بردارهای سیگما برای یک فرآیند تصادفی در روش UKF معرف خصوصیات آماری حول میانگین آن متغیر یا فرآیند تصادفی بوده که ممان‌های آماری نظیر میانگین و واریانس به شکل مجموع وزن یافته این بردارهای سیگما قابل محاسبه هستند. L بعد بردار حالات X(n) است. فرمول بندی فیلتر UKF به شکل زیر است:

$$\bar{X}(0) = E\{X(0)\}$$
$$P(0) = E\left\{\left(X(0)-\hat{X}(0)\right)\left(X(0)-\hat{X}(0)\right)^T\right\} \qquad (۲۱)$$

در رابطه فوق P(o) ماتریس کوواریانس خطای تخمین حالات سیستم در لحظه شروع می‌باشد. محاسبه ماتریس بردارهای سیگما برای هر n به شکل زیر انجام می‌شود:

$$\chi(n/n) = [\hat{X}(n/n) \quad \hat{X}(n/n) \pm \sqrt{(L+\lambda)P(n/n)}_i]$$
$$n = 0,1,\cdots \qquad (۲۲)$$

$$\lambda = \alpha^2(L+\kappa) - L$$

در رابطه (۲۲)، $\chi(n/n)$ را می‌توان ماتریس بردارهای سیگما نامید همچنین $\sqrt{(L+\lambda)P(n/n)}$ را می‌توان به‌عنوان ماتریس انحراف معیار وزن یافته تخمین بردار حالت در نظر گرفت اندیس i اشاره به iامین بردار ستونی ماتریس $\chi(n/n)$ دارد. λ یک ضریب مقیاس[۱۸] و α میزان انحراف بردارهای سیگما از مقدار میانگین را مشخص می‌کند که معمولا $0.001 < \alpha < 1$ انتخاب می‌گردد. κ دومین ضریب مقیاس بوده که معمولا $3-L$ انتخاب می‌شود.

$$\chi_i(n+1/n) = F(n)\chi_i(n/n) \qquad (۲۳)$$
$$z_i(n+1/n) = h(\chi_i(n+1/n)), i = 0,1,\cdots,2L$$

در فرمول فوق بردار $\chi_i(n/n)$ ، iامین بردار ستونی ماتریس $\chi(n/n)$ است.

$$\hat{X}(n+1/n) = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \chi_i(n/n) \qquad (۲۴)$$
$$\bar{P}(n+1/n) = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)}\left[\chi_i(n+1|n) - \hat{X}(n)\right]\left[\chi_i(n+1|n) - \hat{X}(n)\right]^T + GQG^T$$
$$\hat{Z}_p(n+1) = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m z_i(n+1|n)$$

و در نهایت برای دستیابی به یک تخمین مناسب از حالت سیستم داریم

$$\hat{X}(n+1/n+1) = \hat{X}(n+1/n) + \kappa(n+1)[Z_p(n+1) - \hat{Z}_p(n+1)] \qquad (۲۵)$$

چنانچه از (۲۳) مشخص است تعداد بردارهای Z_i ، $2L+1$ بردار بوده که برای محاسبه یک تخمین مناسب از $\hat{Z}_p$ می توان فرمول زیر را بکار برد.

$$P_{XZ}(n+1) = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)}\left[\chi_i(n+1|n) - \hat{X}(n+1)\right]\left[z_i(n+1|n) - \hat{Z}_p(n+1)\right]^T \qquad (۲۶)$$
$$\kappa(n+1) = P_{XZ}(n+1)P_{ZZ}^{-1}(n+1)$$
$$P(n+1/n+1) = \bar{P}(n+1/n) - \kappa(n+1)P_{ZZ}(n+1)\kappa(n+1)^T$$

$$W_0^m = \lambda(L+\lambda) \qquad (۲۷)$$
$$W_0^C = \lambda(L+\lambda) + (1-\alpha^2+\beta)$$
$$W_i^m = W_i^c = 0.5(L+\lambda) \quad i = 1,\ldots\ldots,2L$$
$$i = 0,\ldots,2L$$

W_i^m, W_i^c وزن‌های ثابت و محاسبه شده بر حسب پارامترهای $\lambda, L, \alpha, \beta$ می‌باشد. به این ترتیب UKF قادر به تخمین حالات سیستم X(n) بوده و از روی آن طبق روابط تبدیل مختصاتی (۸) و (۹) می‌توان کلیه پارامترهای هدف از جمله فاصله هدف و سمت آن را محاسبه نمود. چنانچه اشاره شد یکی از معایب این روش پیچیدگی

محاسبات می‌باشد که بر اساس فرمول‌های (۱۹) تا (۲۲) مشخص است.

۶- فیلتر کالمن تصحیح شده بر اساس روش پیشنهادی

با توجه به مشکلات مشاهده شده در دو روش EKF و UKF که در بخش‌های قبل تشریح شد روش پیشنهادی جدید برای استفاده از فیلترکالمن استاندارد بر اساس تبدیل خطای برد و سمت هدف و تبدیل آن به مختصات کارتزین بنا شده است که حجم محاسبات و خطاهای ممکنه را به کمینه می‌رساند. روش پیشنهادی از این نظر که به جبران‌سازی حالات سیستم در وضعیت مانور هدف نسبت به حالات سیستم در وضعیت بدون مانور با تغییر سطح ماتریس کواریانس نویز اندازه‌گیری می‌پردازد، به دسته روش‌های مبتنی بر تنظیم سطح نویز[۱۹]، یا نویزمعادل[۲۰] تعلق دارد[۱۶]-[۱۷]. روش نویز معادل تلاش می‌کند تاثیر مانور هدف را با بکارگیری یک نویز معادل نامشخص و غیر ایستا به‌جای نویز سفید و ایستای دینامیک سیستم بکارگیری نماید. البته روش‌های مبتنی بر این نگرش که شامل بسیاری از روش‌های فیلتر کالمن تطبیقی[۲۱][۱۸] و متدهای مرسوم بازنشانی ماتریس کواریانس[۲۲] خطا نیز می‌شوند با وجود سادگی بکارگیری در حل مساله، در حالتی‌که هدف دارای مانورهای پیچیده و از مشتقات بالاتر است[۱۹]، نویز مورد نظر کاملا غیر ایستا شده، و فیلتر واگرا می‌شود. این موضوع به‌خصوص در متدهای بازنشانی ماتریس کواریانس خطا به علت مشخص نبودن سطح بازنشانی نویز اندازه‌گیری در مانورهای ناگهانی و سریع هدف مشهودتر است. بر این اساس روش پیشنهادی به یک رابطه بسته و مشخص برای نویز معادل اندازه‌گیری با استفاده از تبدیل بدست آمده می‌رسد که بسیاری از مشکلات روش‌های مرسوم را در بر ندارد.

در روش پیشنهادی باید بردار مشاهدات در مختصات کارتزین و نیز ماتریس کواریانس خطا معادل مربوطه را در این مختصات داشته باشیم. بردار مشاهدات در مختصات کارتزین به راحتی از روی بردار معادل مشاهدات در مختصات قطبی در هر نمونه زمانی مانند n بر اساس تبدیل (۱۰) و (۱۱) بدست می‌آید که به شکل زیر است:

$$Z_x(n) = Z_R(n)\cos(Z_\theta(n)) \qquad (۲۸)$$
$$Z_y(n) = Z_R(n)\sin(Z_\theta(n))$$

با جایگذاری از (۸) در رابطه (۲۸) داریم:

$$Z_x(n) = (R(n)+V_R(n))\cos(\theta(n)+V_\theta(n)) = R(n)\cos(\theta(n)+V_\theta(n)) + V_R(n)\cos(\theta(n)+V_\theta(n))$$
$$Z_y(n) = (R(n)+V_\theta(n))\sin(\theta(n)+V_\theta(n)) = R(n)\sin(\theta(n)+V_\theta(n)) + V_R(n)\sin(\theta(n)+V_\theta(n)) \qquad (۲۹)$$

با بسط (۲۹) بر اساس روابط مثلثاتی می‌توان به روابط زیر دست یافت:

$$\begin{aligned} Z_x(n) &= R(n)\cos(\theta(n))\cos(V_\theta(n)) \\ &-R(n)\sin(\theta(n))\sin(V_\theta(n)) \\ &+V_R(n)\cos(\theta(n))\cos(V_\theta(n)) \\ &-V_R(n))\sin(\theta(n))\sin(V_\theta(n)) \\ Z_y(n) &= R(n)\sin(\theta(n))\cos(V_\theta(n)) \\ &+R(n)\cos(\theta(n))\sin(V_\theta(n)) \\ &+V_R(n)\sin(\theta(n))\cos(V_\theta(n)) \\ &+V_R(n)\cos(\theta(n))\sin(V_\theta(n)) \end{aligned} \qquad (۳۰)$$

برای یک رادار نوعی معمولا مقادیر بر حسب رادیان، مقادیر کوچکی بوده از این‌رو از تقریب‌های زیر می‌توان بهره برد:

$$\begin{aligned} &\cos(V_\theta(n)) \approx 1 \\ &\sin(V_\theta(n)) \approx V_\theta(n) \\ &V_\theta(n)V_R(n) \approx 0 \end{aligned} \qquad (۳۱)$$

با توجه به تقریب‌های رابطه (۳۱) رابطه (۳۰) می‌تواند بازنویسی شود.

$$\begin{aligned} Z_x(n) &= R(n)\cos(\theta(n)) \\ &-R(n)V_\theta(n)\sin(\theta(n)) + V_R(n)\cos(\theta(n)) \\ Z_y(n) &= R(n)\sin(\theta(n)) \\ &+R(n)V_\theta(n)\cos(\theta(n)) + V_R(n)\sin(\theta(n)) \end{aligned} \qquad (۳۲)$$

مطابق (۱۰)، (۱۱) و (۳۲) رابطه (۲) می‌تواند به شکل زیر بازنویسی شود.

$$\begin{aligned} Z_c(n) &= H(n)X_c(n) + M(n)V_P(n) \\ &= H(n)X_c(n) + \tilde{V}_x(n) \end{aligned} \qquad (۳۳)$$

$$M(n) = \begin{bmatrix} \cos(\theta(n) & -R(n)\sin(\theta(n) \\ \sin(\theta(n) & R(n)\cos(\theta(n) \end{bmatrix} \qquad (۳۴)$$

رابطه (۳۳) معادله خطی مشاهدات را نشان می‌دهد. چنانچه قبلا یادآوری کردیم که در پیاده‌سازی فیلترکالمن، ماتریس کواریانس خطا در مختصات کارتزین مورد نیاز می‌باشد. با توجه به اینکه ماتریس $M(n)$ در هر نمونه برداری زمانی n، ثابت و معلوم است. از این‌رو ماتریس جدید نوآوری شده زیر را می‌توان بدست آورد.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_c(n) &= E\left\{\tilde{V}_x(n)\tilde{V}_x^T(n)\right\} \\ &= E\{M(n)V_p(n)V_p{}^T(n)M^T(n)\} \\ &= M(n)E\left\{V_p(n)V_p^T(n)\right\}R_P(n)M^T(n) \\ &= M(n)R_P(n)M^T(n) \end{aligned} \qquad (۳۵)$$

$$E\left\{\begin{bmatrix} \cos(\theta(n) & -R(n)\sin(\theta(n) \\ \sin(\theta(n) & R(n)\cos(\theta(n) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_R(n) \\ V_\theta(n) \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

نکته قابل توجه در رابطه (۳۵) آن است که $R_P(n)$ می‌تواند دارای درایه‌های ثابت باشد حال آنکه $\tilde{R}_C(n)$ وابسته به n است. اگر دو متغیر تصادفی $V_\theta(n)$ و $V_R(n)$ دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و مستقل از یکدیگر باشند، $V_x(n)$ و $V_y(n)$ نیز دارای توزیع گوسی با میانگین صفر خواهند بود[۲۰].

۷- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم ردیابی هدف بامانوردر یک فضای دوبعدی مانند حرکات کشتی و یا یک بالگرد با ارتفاع ثابت شبیه‌سازی شده است.مقادیر مختلف درشبیه‌سازی برای پارامترهای تبدیل بدست آمده در روش پیشنهادی بکارگرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی برتری روش پیشنهادی بر روشEKF و قابل مقایسه بودن این روش با روش UKF در عین رفع پیچیدگی‌های حاکم بر آن را نشان می‌دهد.

درمثال نخست هدف با شتاب در راستای محورهای x و y به ترتیب با مقادیر $a_x(t) = 0.02\ m/s^2$ و $a_y(t) = 0.03\ m/s^2$ درنظرگرفته می‌شود. نمونه‌برداری با نرخ زمانی $T = 0.015\,(sec)$ در نظر گرفته

می‌شود. ماتریس کواریانس خطای سیستم و اندازه‌گیری به‌ترتیب به شکل زیر انتخاب شده‌اند.

$$Q = \begin{bmatrix} ۰.۳ & ۰ \\ ۰ & ۰.۳ \end{bmatrix},\ R = \begin{bmatrix} ۱۰۰\ (m^۲) & ۰ \\ ۰ & ۰.۰۰۰۵\ (rad^۲) \end{bmatrix}$$

شکل‌های (۲) و (۳) مسیر واقعی و تخمین‌های آن با روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش EKF و UKF در طول دو محور x و y را نشان می‌دهد. نمودارهای مورد نظر برای زمان‌هایی از مسیر حرکت بزرگنمایی شده است.

شکل ۲: مسیر واقعی هدف و تخمین آن با روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش EKF و UKF در طول محور x

شکل ۳: مسیر واقعی هدف و تخمین آن با روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش EKF و UKF در طول محور y

شکل‌های (۴) و (۵)با در اختیار داشتن مقادیر x و y در هر لحظه از فرمول‌های (۱۰) و (۱۱) قابل محاسبه است. چنانچه مشاهده می‌گردد روش پیشنهادی دارای تخمین‌های بهتری نسبت به روش‌های EKF و UKF در مختصات قطبی نیز می‌باشد.

شکل ۴: فاصله واقعی هدف (R(0)) و تخمین آن با روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش EKF و UKF

شکل۵: سمت واقعی هدف (θ (0)) و تخمین آن با روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش EKF و UKF

دو پارامتر اساسی در تخمین هدف، پارامترهای کورس[۲۳] و سرعت[۲۴] است که بسیاری از روش‌های تخمین و ردیابی هدف در سنجش این دو پارامتر دارای ضعف می‌باشند این دو پارامتر از روابط زیرمحاسبه می‌شوند:

$$\varphi(n) = \tan^{-1}(v_x(n)/v_y(n))$$
$$S(n) = \sqrt{v_x^2(n) + v_y^2(n)} \qquad (۳۶)$$

$\varphi(.)$ کورس هدف و $S(.)$ سرعت هدف می باشد. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۶) و (۷) آمده است.

شکل ۶: کورس واقعی هدف ($\varphi(.)$) و تخمین آن با روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش EKF و UKF

شکل ۷: سرعت واقعی هدف (S(0)) و تخمین آن با روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش EKF و UKF

در پایان برای دستیابی به نتایج قابل استناد در تمامی سناریوها از روش مونت‌کارلو و با تکرار برنامه در بازه متنوعی از سناریوها استفاده

شـــده است. تعداد سناریوهای در نظر گرفته شده ۱۲۰۰ سناریو بوده که این ســـناریوها در رنج، سمت، سرعت و کورس‌های مختلف هدف اجرا شـــده است. بر این اســـاس نتایج حاصله در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۱: مقایسه نتایج شبیه‌سازی در ۱۲۰۰ مختلف سناریوهای متفاوت هدف اجرا برنامه

خطای تخمین و رهگیری هدف (STD)			
فیلتر کالمن EKF	فیلتر کالمن UKF	فیلترکالمن پیشنهادی	پارامتر تخمینی
9.4537	2.2149	1.6536	$x(0)$
12.5538	3.8505	4.3150	$y(0)$
1.9901	2.5347	2.3022	$R(0)$
0.6996	2.5347	2.3022	$\theta(0)$
37.3001	40.5995	29.3359	$\varphi(0)$
4.5048	2.5600	2.8223	$S(0)$

۸- نتیجه‌گیری

دراین مقاله یک روش جدید مبتنی بر تبدیل پارامترهای اندازه‌گیری شـــده هدف از مختصات قطبی به کارتزین درمســـاله ردیابی اهداف با مانور معرفی گردیده است.با بکارگیری تکنیک ارایه شده فیلترکالمن اســـتاندارد براحتی می تواند در حل مســـاله غیرخطـــی ردیابی هدف در مختصات قطبی پیاده‌ســـازی شـــود. برتری و ســـادگی پیاده‌سازی روش جدیـــد در مقایســـه با روش‌هـــای EKF و UKF در بخش نتایج شبیه‌سازی ارایه شده است.

۹- مراجع

[1] M. Dahmani, A. Meche, M. Keche, and K. Abed-Meraim. An improved fuzzy alpha-beta filter for tracking a highly maneuvering target. Aerospace Science and Technology, 58:298–305, September 2016.

[2] A. Meche, M. Dahmani, M. Keche, and A. Ouamri. Pseudo steady state filters for target tracking with polar measurements. Aerospace Science & Technology,43:14–15, April 2015.

[3] S.Jia,Y. Zhang,G. Wang., “Highly maneuvering target tracking using multi-parameter fusion singer model,” Journal of Syst. Engineering and Electronics, vol., 28, 5, pp. 841-850, 2017.

[4] H. Khaloozadeh, A. Karsaz,“Modified input estimation technique for tracking manoeuvring targets,”IET Radar Sonar Navig., 2009, vol. 3, No. 1, pp. 30–41.

[5] R. E. Kalman, “A new approach to linear filtering and prediction problem,” Trans. of the ASME, Journal of Basic Engineering, 1960.

[6] A. J. Haug,K. R. Ford“An end-point-constrained extended Kalman filter for tracking maneuvering near-radially inbound targets,” 2016 19th International Conference on Information Fusion (FUSION), pp. 312-318, 2016.

[7] J. Korn, S. W. Gully and A. S. Willsky, “Application of the generalized likelihood ratio algorithm to maneuver detection and estimation,” In Proc. 1982 American Control Conference, pp. 792-798.

[8] X. Lin, T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom and S. Maskell, “Comparison of EKF, pseudomeasurement and particle filters for a bearing-only target tracking problem,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 2002.

[9] P. R. Mahapatra and K. Mehrotra, “Mixed coordinate tracking of generalized maneuvering targets using acceleration and jerk models,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., AES-36(3):992–1001, 2000.

[10] S. J. Julier and K. Uhlmann, “Unscented filtering and nonlinear estimation,” In Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting,vol. 92, no. 3, pp. 401 –422, March 2001.

[11] S . J. Julier and J. K. Uhlmann, “A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems,” In Proc. of 11th Int. Symp. On Aerospace/ Defence Sensing, Simulation and Controls., 1997.

[12] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, “Unscented filtering and nonlinear estimation,” In Proc. IEEE, vol. 92, no. 3, pp. 401–422, Mar. 2004.

[13] F. C. Schweppe, Uncertain Dynamic Systems, Prentice-Hall. 1973.

[14] R. V. D. Merwe, “Sigma-point Kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models,” Electrical and computer engineering, Ph.D. dissertation, Oregon Health Sciences Univ., Portland, OR, 2004.

[15] R. V. D. Merwe, J. F. G. de Freitas, A. Doucet and E. A. Wan, “The unscented particle filter,” Technical report, Dept. of Engineering, University of Cambridge, 2000.

[16] E. A. Wan and R. V. D. Merwe, “The unscented Kalman filter for nonlinear estimation,” In Proc. OfIEEE Symposium 2000 (AS-SPCC), Oct. 2000.

[17] X. R. Li and Y. Bar-Shalom, “A recursive multiple model approach to noise identification,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., AES-30(3):671–684, July 1994.

[18] M. E. Hough, “Improved performance of recursive tracking filters using batch initialization and process noise adaptation,” AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 22(5):675–681, 1999.

[19] P. O. Gutman and M. Vegler, “Tracking targets using adaptive Kalman filtering,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., AES-26:691–699, Sept. 1990.

[۲۰] حمیـــد خالوزاده، علی کارســـاز، «تخمین پارامترهای اهـــداف راداری با مانور بالا» مجله مهندسین برق و الکترونیک ایران، ۱۳۸۶.

[21] A. Karsaz, H. Khaloozadeh, “An optimal two-stage algorithm for highly maneuvering targets tracking,” Signal Processing., 2009, vol. 89, pp. 532-547.

[22] Z. Beheshtipour; H. Khaloozadeh, An innovative fuzzy covariance presetting for high maneuvering target tracking problems,” 2009 Chinese Control and Decision Conference, pp. 5623-5628, 2009.

[23] M. H. Bahari, F. N. Moharrami, A. Karsaz, “Tracking a High Maneuver Target Based on Intelligent Matrix Covariance Resetting”, International IEEE Conf. ISPA 2007, To be published.

[24] M. Schimmack; B. Haus, P. Mercorelli “An Extended Kalman Filter as an Observer in a Control Structure for Health Monitoring of a Metal-Polymer Hybrid Soft Actuator,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, issue, 99. pp. 1-1, 2018.

[25]S. Yang and H. Li, “Application of EKF and UKF in Target Tracking Problem”, 2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2016.

پی‌نوشت‌ها

1- Maneuvering target tracking
2 - Extended Kalman filter
3 - Unscented Kalman filter
4- Jacobian matrix
5- Real time
6- Sigma vector
7- Bayesian model
8- Stochastic process
9- Moments
10- Completely Unknown
11- Fisher model
12- sensor coordinates
13- IEEE
14- Preset
15- Pseudo observation
16- Priori estimation
17 - Posteriori estimation
18--Scaling factor
19- Noise level adjustment
20 - Equivalent noise
21 - Adaptive Kalman filter
22- Matrix covariance presetting
23-Course
24 - Speed

***

طراحی و مشخصه‌سازی نانوربات‌های زیستی

راضیه فرازکیش/ گروه مهندسی کامپیوتر/ دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب/ r.farazkish@srbiau.ac.ir

چکیده

نانوربات یک سیستم رباتیک کنترل‌شده در مقیاس نانو (10^{-9}) است. این ریزربات دارای ویژگی‌هایی هم‌چون قابلیت استفاده در فضاهای کوچک با انعطاف‌پذیری بالا، قابلیت تابع‌پذیری بالا و سازگار در شرایط مختلف می‌باشد. تکنولوژی نانورباتیک آن‌چنان سریع درحال پیشرفت است که به‌زودی زندگی انسان‌ها را به‌طور کلی دگرگون خواهد کرد؛ این تغییرات با استفاده از طراحی نانوربات‌های زیستی است که در بدن انسان قرار گرفته و نقش محافظ و یا درمان‌گر را ایفا می‌کنند. این ریزماشین‌های هوشمند قادرند چندین نسخه از خودشان تهیه کنند و جایگزین بافت‌های فرسوده و آسیب‌دیده نمایند. امروزه فناوری طراحی و ساخت نانوربات، به‌دلیل گستردگی کاربردهایی که در حوزه‌های مختلف علمی هم‌چون پزشکی، زیست‌فناوری، مکانیک، الکترونیک، سیستم‌های فیزیکی و سیستم‌های ارتباطی دارد، مورد توجه بسیاری از دانشمندان و صنایع مختلف قرار گرفته است. در حال حاضر، طراحی و ساخت نانوربات زیستی در زمینه پزشکی، سلامت و داروسازی بیش از سایر حوزه‌ها مورد توجه است و طی چند سال گذشته نیز پیشرفت‌های زیادی داشته‌است. اما ساخت این ریزربات‌ها به‌دلیل پیچیدگی‌های بدن انسان به‌طوری که قادر به حرکت در میان سرخرگ‌ها و شریان‌های بدن و بررسی و شناسایی بیماری‌ها باشد، به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. در این مقاله به بررسی طراحی و مشخصه‌سازی نانوربات‌های زیستی می‌پردازیم که به‌طور گسترده برای شناسایی و درمان بسیاری از بیماری‌ها به‌کار می‌روند.

کلمات کلیدی: ادوات نانو، طراحی سیستم‌های نانورباتیک، نانوربات‌های زیستی

Design and Characterization of Bio-nanorobots

Razieh Farazkish/ Department of Computer Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
r.farazkish@srbiau.ac.ir

Abstract:

Nanorabot is a nano-controlled robotic system. This tiny robot has features such as the ability to use in small spaces with high flexibility, high responsiveness and adaptability in a variety of situations. Nanorobotic is so fast-paced that it will soon change human's life; these changes are based on the design of biological nanorobos that are located in the human body and play the role of protector or therapist. This tiny intelligent machines can produce multiple copies of themselves and replace worn and damaged their tissues. Today, the technology of designing and manufacturing nano-robots has attracted many scientists and industries due to the wide range of applications in various fields of science such as medicine, biotechnology, mechanics, electronics, physical systems and communication systems. Nowadays, the design and manufacturing of biological nanorobots in the field of medicine, health and pharmacy is more than other areas and has been making a lot of progress over the past few years. However ,the construction of these tiny robots requires more research because of the complexity of the human body, which is able to move through the arteries of the body and to investigate and identify diseases. In this article,we study the design and characterization of biological nanorobots that are widely used to identify and treat many diseases.

Keywords: Nano devices, Nanorobotic systems design, Bio-nanorobots.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین فناوری‌های روز دنیا دانش نانوفناوری است که گستره وسیعی از علوم مختلف را در برگرفته و توجه بسیاری از محققان را در سراسر دنیا به خود جلب نموده‌است[۷-۱]. نانورباتیک نیز به‌عنوان یکی از شاخه‌های بنیادی فناوری نانو، علم جدیدی است که شامل طراحی، ساخت، کنترل و برنامه‌نویسی نانوربات‌هاست.

منبع تولید انرژی مورد نیاز نانوربات، شامل انرژی جنبشی سیال (هم‌چون خون)، پرتوهای الکترومغناطیسی، تغییرات دمایی و ایجاد تشعشعات مناسب است که در حال حاضر در محیط‌های مختلف زیستی قابل‌استفاده می‌باشد.

نکته مهمی که در نانوربات‌های زیستی وجود دارد، تامین نیروی محرکه آن‌هاست که بیشتر از طریق جریان خون صورت می‌گیرد؛ به‌همین علت باید با رعایت نکات ایمنی برای بیمار انجام شود. سیستم انتقال اطلاعات و کنترل حرکت نانوربات‌ها در بدن نیز باید طوری باشد که به‌راحتی از خارج بدن، قابل بررسی و شناسایی باشد. همین موضوع در بررسی مشکلات درون سلول‌ها نیز قابل تعمیم است؛ بدین معنا که می‌توان نانوماشین‌های ترمیم‌کننده سلول با ابزار و گیرنده‌های خاص در مقیاس مولکولی طراحی نمود تا بتواند با استفاده از جریان خون، به سلول هدف رسیده و مشکلات موجود را شناسایی نماید[۸].

علی‌رغم تلاش‌های صورت‌گرفته، طراحی و ساخت نانوربات‌ها در زمینه‌های مختلف با مشکلات گوناگونی مواجه بوده و ارتباط بین بخش‌های مختلف در یک نانوربات، بسیار سخت و پیچیده است. بنابراین، ساختن نانوربات زیستی که بتواند با شرایط و اهداف مورد نظر، وارد بدن شده و عملکرد موثری داشته باشد برای محققان اهمیت بالایی دارد.

با استفاده از دانش نانوفناوری می‌توان نانوربات‌های زیستی طراحی کرد که قادرند چندین نسخه از خودشان تهیه کنند و دقت بالایی در انجام عملیات خاص و تکرارشونده دارند. در آینده نانوربات‌های هوشمند در مغز و بدن هر انسانی به تعداد زیاد وجود خواهند داشت و انسان را از ابتلا به انواع بیماری‌ها مصون می‌دارند و حتی می‌توانند روند پیر شدن بشر را به تعویق بیاندازند؛ همچنین قادر خواهند بود قدرت جسمانی و حافظه را نیز تقویت نمایند. با استفاده از فناوری نانو دستیابی به انرژی خورشیدی نیز امکان‌پذیر خواهد شد. انرژی خورشیدی قابل تبدیل و استفاده به اشکال مختلف انرژی است و بشر را از منابع دیگر بی‌نیاز می‌کند[۸].

نانوربات‌ها دارای امکانات بالقوه‌ای هستند که با اجتماع و قرارگیری به‌صورت کلونی قادرند به‌طور موشکافانه و دقیق از سیستم موردنظر حفاظت کنند. در واقع با ساختاری اتمی و یا مولکولی، در یک فرآیند شناخته‌شده قرار داده می‌شوند تا چرخه مورد نظر را کامل کنند. فناوری نانورباتیک آن‌قدر سریع درحال پیشرفت است که به‌یقین زندگی انسان‌ها را از اواسط قرن جاری به‌کلی متحول خواهد کرد. این تغییرات شامل از بین رفتن بسیاری از بیماری‌ها، کاهش عوامل و عوارض بسیاری از امراض و حتی تغییر روند انجام جراحی‌ها است [۹].

۲-ارزیابی روند پیشرفت نانوربات در دنیا

طراحی و ساخت نانوربات‌ها در سال‌های اخیر پیشرفت چشم‌گیری داشته‌است؛ ولی به‌دلیل پیچیدگی‌های موجود، هم‌چنان در مراحل تحقیقاتی و آزمایشگاهی قرار دارد. رسیدن به مرحله تجاری‌سازی، مستلزم بررسی‌های بیشتر و انجام آزمایشات فراوانی است که روند رسیدن به بلوغ را کند کرده است. در ادامه روند انجام برخی از این تحقیقات آورده شده‌است.

۲-۱- نانوربات در زمینه پزشکی

در دنیای پیشرفته امروز، بسیاری از علوم به یاری علم پزشکی آمده‌اند تا با بالا بردن توانمندی تجهیزات پزشکی و درمانی، در افزایش سلامتی، طول عمر، تشخیص و درمان بیماری‌ها نقش موثری را ایفا کنند.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های دانشمندان در زمینه درمان، رهایش دارو در مکان و زمان دقیق با بالاترین عملکرد ممکن است. داروهای موجود در بازار، علی‌رغم مبارزه با عوامل بیماری‌زا (ویروس، باکتری و غیره)، سلول‌های سالم و بیمار را با هم درگیر می‌سازد که این موضوع در مورد بیماری‌های خاصی هم‌چون سرطان و یا HIV بیشتر مشاهده می‌شود. علاوه بر این، در برخی بیماری‌ها عملکرد مؤثر دارو در مدت زمان کوتاه، بسیار پایین است و این مساله موجب طولانی شدن مدت بیماری و آسیب رساندن عوامل بیماری به سایر نقاط بدن می‌شود. به همین دلیل، یکی از اهداف محققان، طراحی و ساخت نانوربات‌هایی است که بتواند رهایش دارو را به مکان خاص در بدن، بدون آسیب رساندن به سلول‌های سالم انجام داده و هم‌چنین به مدت طولانی قادر به کنترل و فعالیت درون سلول باشد[۱۰].

در همین راستا، محققان دانشگاه تگزاس، موفق به ساخت نانوربات‌ها شدند که می‌تواند درون سلول قرار گیرد. این نانوربات پیشرفته با داشتن سرعت ۱۸هزار دور بر دقیقه، عنوان سریع‌ترین و کوچک‌ترین نانوربات را به خود اختصاص داده‌است. نانوموتور ساخته شده قادر به رهایش و کنترل دارو از سطح نانوساختار خود و با طول عمر بیشتر از نانوموتورهای پیشین است. موفقیت این پروژه در درمان بیماری‌های مختلف و اثر مستقیم روی سلول‌های بیمار، بسیار قابل‌توجه خواهد بود[۱۰].

چالش‌های گوناگونی در مسیر استفاده از نانوربات‌ها در صنعت پزشکی وجود دارد. با توجه به این‌که بدن انسان از تمامی ربات‌های ساخته شده پیچیده‌تر است، بنابراین ساخت نانوربات‌ها که بتواند در بدن انسان نفوذ کرده و ماموریت‌های خود را به‌طور کامل انجام دهد، مساله بسیار مهمی است.

ساخت مواد کافی جهت آزمایش ایده‌های موجود در ساخت نانوربات، یافتن سیستم مناسب جهت بررسی نتایج آزمایش‌ها اعم از میزان اثربخشی واقعی نانوربات از حرکت تا رسیدن به مقصد، رساندن دارو به نانوربات و تکرار کلیه این مراحل و سپس تاییدیه‌های لازم از جمله سازمان غذا و دارو و انجام آزمایش‌ها روی حیوانات و انسان‌ها موجب می‌شود که ساخت نانوربات‌ها از ۸ تا ۱۰ سال به طول انجامد. با وجود سرعت اندک این حوزه، دانشمندان به تحقق این هدف، خوش‌بین هستند و امیدوارند با فائق آمدن بر مشکلات موجود، نانوربات‌های مناسب این ایده را طراحی و تجاری‌سازی کنند[۱۱].

۲-۲- نانوربات در زیست‌فناوری

با توجه به این‌که DNA ها قابلیت تغییر شکل دنیای محاسباتی را دارند، محققان زیستی در تلاش هستند که از این توانمندی برای تشخیص و درمان بیماری‌ها استفاده کنند. اوریگامی DNA نخستین قدم در ساخت نانوربات‌ها است که قادر به انجام عملیات منطقی خاصی می‌باشد. هر اندازه که ربات‌های DNA بیشتری به بدن تزریق شوند، عملیات پیچیده‌تری در بدن انسان قابل‌انجام خواهد بود. به‌طور مثال، ساخت یک نانوربات تک مولکولی با چرخ‌های کربنی و قابلیت کنترل

دما، یکی از تحقیقاتی است که دانشمندان در نظر دارند از آن برای حمل دارو به سلول‌های مشخص استفاده کنند[۱۰].
یکی دیگر از اهداف متخصصان، استفاده از نانوربات‌های DNA برای درمان بیماری سرطان است؛ به‌طوری‌که بتوانند بدون کوچک‌ترین تماس با سلول‌های سالم، سلول‌های سرطانی را نابود کنند[۱۰].
یک بخش عمده از تحقیقات در حال مطالعه در زمینه زیست‌فناوری، استفاده از ویروس‌ها و باکتری‌های مهندسی‌شده است. در سال‌های اخیر، امکان دستکاری ویروس و باکتری با هدف اولیه تغییر فعالیت آن‌ها از عامل بیماری‌زا به عامل درمان‌کننده، فراهم شده‌است. به این ساختارهای دستکاری‌شده، باکتری یا ویروس مهندسی‌شده گفته می‌شود. این ساختارها، به‌صورت ریزربات‌هایی هستند که می‌توانند در درمان و شناسایی بیماری بسیار مؤثر و قوی باشند. در یک طرح تحقیقاتی، دانشمندان در جستجوی راهی هستند تا بتوانند ربات‌ویروس و ربات‌باکتری را طراحی کنند که سلول‌های توموری و سرطانی را پیدا کرده و آن‌ها را ببلعد؛ بعد از اتمام فرآیند نیز به‌علت نداشتن غذا از بین برود. محققان امیدوار هستند در صورت موفقیت در طراحی و ساخت این نانوربات، از روش مشابه آن در درمان سرطان مغز و گردن نیز بهره ببرند[۱۰].
استفاده از نانوربات‌های مهندسی‌شده نیز در مراکز مختلفی درحال بررسی است. اما کلیه این روش‌ها در مرحله بررسی کلینیکی قرار داشته و برای رسیدن به بازار هدف، مستلزم مطالعات بیشتر است.

۲-۳-نانوربات در بایومکانیک و نانومکانیک

در بخش‌های قبلی پژوهش انجام شده، پیشرفت طراحی و ساخت نانوربات‌ها در زمینه پزشکی و زیست‌فناوری بررسی و ارایه شد. باید اذغان داشت که سرعت طراحی و ساخت نانوربات در زمینه مکانیکی (بایومکانیک و نانومکانیک) کندتر از سایر حوزه‌های تعریف‌شده می‌باشد.
از پروژه‌های موفق در زمینه مکانیکی، ابداع روشی است که در آن از یک دستگاه جوش نانورباتیک به‌عنوان دستگاه جوش نقطه‌ای استفاده می‌شود. این دستگاه از نانولوله‌های کربنی پر شده با مس ساخته شده‌است. این ساختار درون یک میکروسکوپ الکترونی عبوری قرار داده شده که از آن برای گداختن و اتصال نانوساختارها به‌هم استفاده می‌شود. با اعمال ولتاژ و ذوب شدن هسته‌های مسی با ضخامت ۴۰ تا ۸۰ نانومتر، مس از درون نانولوله‌ها جریان یافته و می‌تواند باعث لحیم شدن یک نانولوله به نانولوله دیگری شود. کنترل مکانی و زمانی و استفاده از جریان بسیار کم برای ذوب شدن مس در زمان فرآیند از مزایایی است که در صنعت نیمه‌هادی مورد توجه متخصصان این حوزه قرار گرفته است[۱۲].
یکی دیگر از کاربردهای نانوربات‌ها در زمینه تعمیر مدارها و ابزارهای الکترونیکی است. با پیشرفت صنعت الکترونیک، ابزارهای تعمیر و نگهداری آن‌ها نیز باید پیچیده‌تر و پیشرفته‌تر از گذشته باشد. ساخت نانوموتورهایی که بتواند خراش‌های بسیار کوچک را برطرف کند، از اهداف مهم در این حوزه است. محققان دانشگاه کالیفرنیا با الهام از سیستم دفاعی بدن، نانوموتوری ساخته‌اند که قادر به تشخیص معایب در ابزارهای الکترونیکی بوده و با نانوذرات طلا و پلاتین درون یک سیال وظیفه خودترمیمی را به‌خوبی انجام می‌دهد. از این نانوموتور می‌توان در بخش‌های مختلفی هم‌چون حسگرهای انعطاف‌پذیر و اجزای الکترونیکی که به‌سختی قابل تعمیر هستند، استفاده کرد. البته این طرح در مراحل بررسی بیشتر قرار دارد و طراحان آن به تکمیل طراحی و ساخت این نانوربات امیدوارند[۱۳].
محققان از دانشگاه گرونینگن هلند نیز موفق به ساخت کوچک‌ترین نانوربات الکتریکی جهان در مقیاس نانو شده‌اند. این نانوربات، نخستین مدل مجهز به موتور است که می‌تواند توسط الکترون‌ها، روی یک سطح مسی حرکت به‌سمت جلو داشته باشد. در این نانوربات، برای ثابت ماندن مولکول، از شرایط خلاء و دمای بسیار پایین استفاده می‌شود. ساخت این نانوربات کوچک، قدم بسیار مهمی در راستای ساخت نانوربات‌های پیشرفته‌ای است که می‌توانند در سیستم‌های کنترلی موثر باشند[۱۴].
پروژه‌های گوناگون دیگری در دنیا در زمینه‌های نانومکانیک و بایومکانیک در حال انجام است؛ اما همان‌طور که اشاره شد، علاقه‌مندی و گستردگی پژوهش‌های ساخت نانوربات در زمینه زیست‌فناوری، پزشکی و درمان به مراتب بیشتر از حوزه مکانیکی است.

۳- ساختار نانوربات

همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، مهم‌ترین کاربرد نانوربات‌ها در زمینه پزشکی و زیست‌فناوری است؛ در این بخش به بررسی ساختار و عملکرد نانوربات‌های زیستی می‌پردازیم.
به‌طورکلی، دانش نانورباتیک به مطالعه طراحی، ساخت، برنامه‌نویسی و کنترل نانوربات‌ها می‌پردازد. نانوربات‌ها متشکل از هر ساختار فعال یا غیرفعال است که توانایی تحریک، دریافت، علامت‌دهی، پردازش اطلاعات، هوشمندی و رفتار جمعی را در مقیاس نانو داشته باشد [۱۱]. این توانمندی‌ها می‌تواند به تنهایی و یا به‌صورت ترکیبی توسط یک نانوربات به‌کار گرفته شود. بنابراین، همه نوع تحریک، دریافت و یا پردازش اطلاعات می‌تواند وجود داشته باشد که نانوربات‌ها را قادر به فعل و انفعالات متقابل و تاثیر روی کاربرد مورد نظر در مقیاس نانو کند. برخی از مشخصاتی که در عملکرد یک نانوربات مطلوب است، عبارتند از:

- هوش جمعی: عدم تمرکز و هوش توزیعی.
- رفتار مشارکتی: رفتار تکاملی.
- خودسازندگی و تکرار: انجام عملیات تکرارشونده و قابلیت نگهداری و تعمیر در مقیاس نانو.
- پردازش اطلاعات و برنامه‌نویسی نانو.
- معماری واسط جهان میکرو به نانو: یک معماری که دسترسی سریع به نانوربات‌ها را کنترل کرده و نگهداری آن‌ها را فراهم سازد.

نانوربات‌ها با چشم غیرمسلح قابل‌رویت نیستند؛ در نتیجه دستکاری و کار با آن‌ها دشوار خواهد بود. تکنیک‌هایی مانند Scanning Electron Microscopy(SEM) و یا Atomic Force Microscopy (AFM) برای ایجاد یک واسط قابل‌رویت و قابل لمس به‌کار گرفته می‌شود تا قادر به درک ساختار مولکولی این ادوات در مقیاس نانو شویم. تکنیک‌های واقعیت مجازی نیز، در تحقیقات نانوتکنولوژی و بیوتکنولوژی به‌عنوان روشی برای افزایش دقت و درک بهتر به‌کار می‌روند[۱۵].
یکی از مهم‌ترین چالش‌های گسترش نانوربات‌ها و نانوماشین‌ها، طراحی و ساخت دشوار آن‌ها است که در ادامه به آن می‌پردازیم.

۴- طراحی سیستم‌های نانورباتیک

طراحی سیستم‌های نانورباتیک با علوم گوناگونی مرتبط است. قوانین عملی برای نانوربات‌ها به نوع نانوذراتی که ما درون آن‌ها به‌کار می‌بریم، بستگی دارد. همان‌طورکه پیش‌تر اشاره شد، مهم‌ترین

شکل ۱: روند طراحی نانوربات‌های زیستی [۱۲]

کاربرد نانوربات‌ها در علوم پزشکی است؛ بنابراین روند طراحی را برای نانوربات‌های زیستی درنظر می‌گیریم که این متشکل از المان‌های زیستی مانند پروتئین و DNA خواهند بود. درشکل (۱) روند این طراحی نشان داده شده‌است[۱۲].

همان‌طورکه در شکل (۱) مشاهده می‌شود، طراحی نانوربات‌های زیستی شامل ۴ مرحله است:

مرحله ۱: المان‌های زیستی

گسترش المان‌های نانوزیستی از سیستم‌های زیستی، نخستین مرحله از طراحی و گسترش یک نانوربات زیستی پیشرفته است. DNA، نانولوله‌های کربنی و نانوساختارها، کاندیدهای مناسبی برای مجتمع‌سازی و استقرار المان‌های نانوزیستی هستند.

مرحله ۲: گردآوری (اسمبل کردن) نانوربات‌های زیستی

مرحله بعدی شامل اسمبل کردن المان‌های نانوزیستی پایدار به مجموعه‌های پیچیده است. از آغاز این مرحله یک کتابخانه المان‌های نانوزیستی گسترش می‌یابد که شامل طبقه‌بندی‌های مختلفی مانند تحریک، منبع انرژی، حسگر، سیگنال‌دهی و غیره خواهد بود. در این مرحله، قادر به طراحی و گسترش نانوسیستم‌های زیستی خواهیم بود که مشخصات متحرک را ارتقا داده و می‌تواند به‌سمت مکان‌های مطلوب حرکت نماید.

مرحله ۳: هوش توزیعی، برنامه‌نویسی و کنترل

در این مرحله هریک از نانوربات‌های زیستی منفرد، باید با یکدیگر برای گسترش آتی مجموعه‌های مشابه و یا متفاوت نانوربات‌ها همکاری کنند. این مرحله طراحی، پایه و اساس مفهوم اجتماع نانوزیستی را مطرح می‌کند. هدف این مرحله، کنترل و برنامه‌ریزی مجموعه‌های نانوزیستی است. همچنین، طراحی گروه‌هایی از ربات‌های نانوزیستی که قادر به اجرای کارهای پیچیده، محاسبات و تشریک مساعی در میان گروه‌ها هستند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مرحله ۴: ساخت خودکار و ماشین‌های پردازش اطلاعات

برای انجام عملیات پیچیده مانند دریافت، علامت‌دهی و ذخیره‌سازی، اجتماعی از گروه‌های نانوربات زیستی باید ایجاد شود. این مرحله طراحی، شامل ارایه روش‌های ساخت خودکار از ربات‌های نانوزیستی در بافت زنده و بافت مصنوعی (آزمایشگاه) می‌باشد. توانایی پردازش اطلاعاتی که شامل یادگیری و قابلیت تصمیم‌گیری است، نکته کلیدی در این مرحله خواهد بود. این ویژگی، گروه‌های زیستی را قادر به داشتن توانایی خودنمایی بر اساس محیط مقصد می‌سازد. این گروه‌ها می‌توانند برای جستجوی منابع انرژی فرعی برنامه‌ریزی شده و توانایی انطباق با هر منبعی را داشته باشند. مدیریت انرژی، خودترمیمی و نمو، برخی از مشخصات این گروه‌ها می‌باشد.

۵- روش‌های محاسباتی در طراحی نانوربات‌های زیستی

تکنیک‌های مدل‌سازی مولکولی به‌طور هم‌گام با انجام آزمایش‌های گسترده، پایه طراحی سیستم‌های نانوزیستی را شکل می‌دهند [۱۷-۱۶]. همان‌طورکه در نقشه اصلی طراحی ذکر شد، در ابتدا اجزای نانوزیستی مختلف طراحی شده و سپس عناصر عملیاتی در مجاورت یکدیگر قرار گرفته و قابل کنترل و برنامه‌ریزی خواهند بود. برخی از تکنیک‌های مدل‌سازی مولکولی عبارتند از:

۵-۱-روش‌های میدان نیروی تجربی (ماشین‌های مولکولی)

در این روش، از حرکت الکترون‌ها صرف‌نظر شده و انرژی سیستم بر اساس موقعیت هسته در یک پیکربندی مولکولی خاص محاسبه می‌شود. همچنین، در این روش از تقریب بورن-اوپنهایمر استفاده شده و مدل‌سازی اجزای نانوزیستی و یا ترکیبات آن‌ها به‌وسیله یکی از توابع انرژی انجام می‌پذیرد.

۵-۲-روش کمینه‌سازی انرژی

در این روش، انرژی پتانسیل وابسته به مختصات پیکربندی مولکولی

مطرح شده و نقاط روی سطح فوقانی (سطح انرژی پتانسیل) برای محاسبه مقدار کمینه تابع محاسبه خواهد شد. چنین هندسه‌ای که مطابق کمینه انرژی است، حالت‌های پایدار پیکربندی مولکولی را شکل می‌دهد. با این روش، می‌توانیم تغییر پیکربندی سیستم از یک حالت کمینه به حالت دیگر را تحلیل نماییم. تکنیک‌هایی مانند نیوتن- رافسون و گوسی- نیوتن برای محاسبه مقادیر کمینه به‌کار می‌روند که می‌توانند برای پیش‌بینی ویژگی‌های گوناگون سیستم مورد مطالعه به‌کار روند.

۵-۳- روش‌های شبیه‌سازی دینامیک مولکولی

برای پیش‌بینی کارآیی پویایی (محاسبه نیرو و انرژی) یک المان زیستی، دینامیک مولکولی (MD) به‌کار می‌رود. این روش، قانون حرکت نیوتن را در میان پیکربندی متوالی سیستم برای تخمین پویایی آن به‌کار می‌برد. متغیر دیگر دینامیک مولکولی که در صنعت به‌کار گرفته می‌شود، شبیه‌سازی مونت-کارلو است که از روند تصادفی برای ایجاد پیکربندی مورد نیاز یک سیستم استفاده می‌کند. شبیه‌سازی‌ها بر اساس محاسبه میزان انرژی آزاد که در حین گذر از یک حالت پیکربندی به حالت دیگر رها می‌شود، انجام می‌پذیرد. در MD، سهولت پیکربندی ویژه از یک مولکول زیستی به‌وسیله محدودیت‌های انرژی انجام می‌شود؛ بنابراین، باید گذر از یک حالت داده شده به دیگری حتماً مطلوب باشد، مگر این‌که نیروی جنبشی خارجی وجود داشته باشد که به مولکول برای غلبه بر محدودیت انرژی کمک نماید.

۵-۴- اتصال مولکولی توابع

روش اتصال مولکولی برای طراحی سیستم‌های نانورباتیک بسیار مهم است. این روش برای چسباندن دو مولکول به یکدیگر در فضای سه‌بعدی به‌کار می‌رود. روش اتصال مولکولی برای طراحی محاسباتی مجموعه‌های نانوزیستی استفاده می‌شود که الگوریتم‌هایی مانند اتصال، ژنتیک و فاصله هندسه را به‌کار می‌برد. بسیاری از شرکت‌های تولید دارو نیز، الگوریتم‌های جستجوی ترکیبی منظم را برای اتصال به‌کار می‌برند. این الگوریتم‌ها کاندیدهای اولیه برای تحقیقات فعلی می‌باشند.

۵-۵-اتصال اجزای نانوزیستی در یک نقطه اتصال

به‌طور خاص دو روند برای طراحی رابط‌های اتصال اجزای نانوزیستی وجود دارد؛ یک روش، پایگاه داده مولکولی را جستجو کرده و یک رابط را بر اساس پارامترهای هندسی انتخاب می‌کند؛ CAVEAT یک روال سنتی است که این روش را به‌کار می‌برد. روند دیگر برای طراحی یک رابط از جستجوی اتم به اتم حاصل می‌شود و پارامترهای هندسی که می‌توانند این رابط‌ها را شناسایی کنند، طراحی می‌شوند. سهولت طراحی این رابط‌ها در دنیای واقعی، یکی از چالش‌هایی است که مدل‌های مولکولی با آن مواجه می‌شوند. مقیاس انرژی کمینه که توسط شبیه‌سازی مونت-کارلو به‌کار می‌رود، روش مستحکمی برای انتخاب ساختار پایه رابط‌های نهایی است. الگوریتم ژنتیک نیز برای ایجاد چنین طراحی‌هایی به‌کار می‌رود.

۶- روش‌های آزمایشی در طراحی نانوربات‌های زیستی

همان‌طورکه اشاره شد، مرحله (۱) در روند طراحی ارایه‌شده نیاز به یک کتابخانه از اجزای زیستی دارد که بر اساس پتانسیل آن‌ها، طراحی و گسترش نانوربات‌ها توصیف می‌شود. تکنیک‌های مولکولی متفاوت می‌تواند برای ارزیابی کارآیی و سودمندی اجزای زیستی به‌کار رود [۱۶و۷]. برای گسترش یک نانوربات، به اطلاعاتی از قبیل ساختار اجزای زیستی، درجه تغییر تطابقی هر عنصر و راهنمای محیطی که این تغییرات ساختاری را تحمل کند، نیازمندیم. بر اساس روش‌های محاسباتی که در بخش قبل توضیح داده شد، تکنیک‌های آزمایشی نیز برای به‌دست آوردن این اطلاعات به‌کار می‌رود. برخی از این تکنیک‌ها در ادامه آورده شده‌است:

۶-۱- طیف‌سنجی رنگ‌تابی دورانی (CD)

طیف‌سنجی CD می‌تواند برای به‌دست آوردن ساختار درونی هر مولکول زیستی به‌کار رود. در این تکنیک، اشعه ماورای بنفش قطبی‌شده برای کاوش توسعه شکل‌گیری ساختار ثانویه در راه‌حل‌ها به‌کار می‌رود. این تکنیک، یک روش اثبات‌شده برای تخمین ترکیب ساختاری از عناصر نانورباتیک در هنگام تغییر در موقعیت‌های محیطی را نشان می‌دهد.

۶-۲- انتقال انرژی رزونانسی فورستر (FRET)

این تکنیک، برای افزایش کاوش توسعه تغییرات تطابقی به‌وسیله عناصر نانورباتیک به‌کار می‌رود. در این روش، اجزای نانورباتیک باید طوری مهندسی شوند که cystein در هر دو سر آن‌ها باقی بماند. یک سر جزء زیستی به‌عنوان اهدا کننده مولکول رنگ‌شده و سر دیگر نیز به‌عنوان پذیرنده مولکول رنگ‌شده، برچسب‌گذاری می‌شود. نتیجه سیگنال FRET می‌تواند با لیزر طوری پالایش شود که تغییرات سیگنال، به فضای مابین دو سر یک جزء زیستی وابسته باشد.

۶-۳- رزونانس (تشدید) مغناطیسی هسته‌ای (NMR)

این تکنیک، برای تعیین ساختار سه‌بعدی دقیق اجزای نانورباتیک به‌کار می‌رود. اگرچه طیف‌سنجی CD می‌تواند برای تخمین تغییرات موجود در ترکیبات ساختاری اجزای زیستی به‌کار رود، اما پیکربندی سه‌بعدی دقیق را مشخص نمی‌کند. این اطلاعات می‌تواند توسط طیف‌سنجی NMR و برچسب‌گذاری جزء زیستی با اتم‌های فعال NMR به‌دست آید. به‌علاوه، برای تعیین ساختارهای پایانی اجزا نیز، NMR می‌تواند برای درک جنبش‌شناسی تغییرات ترکیبی مولکول زیستی در زمان واقعی استفاده شود.

۶-۴- انبرک نوری لیزری (LBOT) و فلوئورسانس تک‌مولکولی

LBOT و فلوئورسانس تک‌مولکولی می‌تواند برای تعیین نیروهای به‌کار رفته در عناصر نانورباتیک و تغییر ساختاری که در حین پیدایش این نیروها، بعد از آشکارسازی محرک‌های مختلف رخ می‌دهد، به‌کار رود. LBOT می‌تواند نتایج نیرو و جابه‌جایی را با استفاده از روش Sub-PicoNewton و تقریب یک نانومتری فراهم کند. همچنین اندازه‌گیری‌های فلوئورسانس تک‌مولکولی می‌تواند بر اساس روش FRET، اطلاعات موردنیاز حالت ساختاری هر مولکول در هر نقطه از منحنی جابه‌جایی- نیرو را محاسبه کند.

برای هم‌بستگی اندازه‌گیری‌های نیرو با تغییرات ساختاری، ترکیب روش‌های LBOT و FRET مورد نیاز است.

۷- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین شاخه‌های دانش نانوفناوری که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته، نانورباتیک است که این علم شامل طراحی، کنترل و برنامه‌نویسی ربات‌ها در مقیاس نانو می‌باشد. نانوربات‌ها ماشین‌های کوچکی هستند که برای انجام عملیاتی خاص و تکرارشونده با دقت بسیار بالا طراحی می‌شوند. این ریزماشین‌های هوشمند قادرند چندین نسخه از خودشان تهیه کرده و جایگزین بافت‌های فرسوده و آسیب‌دیده نمایند. در این مقاله به بررسی طراحی و مشخصه‌سازی

ادامه درصفحه ۵۳

مروری بر رویکردهای کنترل ازدحام در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم

شورانگیز شمس شمس آبادفراهانی/گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلام‌شهر/shams@iiau.ac.ir

سیاوش فخیمی درخشان/گروه سیستم‌های تطبیقی/ موسسه تئوری اطلاعات و اتوماسیون آکادمی علوم چک/ fakhimi@utia.cas.cz

چکیده

مساله کنترل ازدحام، یک مساله بسیار مهم در شبکه‌های مخابراتی است و با رشد نیاز به پهنای باند، بار، اندازه و ارتباط شبکه‌ها بایکدیگر، بر اهمیت آن افزوده شده است. این مساله نیاز به طراحی شبکه‌ها با الگوریتم‌های کنترل ازدحام مناسب را به‌خصوص برای شبکه‌های سنسوری بی‌سیم نشان می‌دهد. در این مقاله به بررسی اجمالی روش‌های کنترل ازدحام موجود در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم باتوجه به اطلاع رسانی ازدحام، ردیابی ازدحام و اجتناب از ازدحام می‌پردازیم.

کلمات کلیدی: اجتناب از ازدحام، اطلاع‌رسانی ازدحام، ردیابی ازدحام، شبکه‌های سنسوری بی‌سیم، کنترل ازدحام

Congestion control in wireless sensor networks: a survey

Shoorangiz Shams Shamsabad Farahani/ Assistant professor/ Department of Electrical Engineering, Islamshahr branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran/ shams@iiau.ac.ir.

Siavash Fakhimi Derakhshan/ Research assistant/ Adaptive System Department, Institute of Information Theory and Automation of the Czech Academy of Science / fakhimi@utia.cas.cz

Abstract:

Congestion control is an important issue in telecommunication networks, and with the growing need of bandwidth, load, size and network connections, its importance is increasing. This issue requires the design of networks with appropriate congestion control algorithms, especially for wireless sensor networks. This paper outlines the congestion control methods available in wireless sensor networks in terms of congestion notification, congestion detection, and congestion avoidance.

Keywords: Congestion control, wireless sensor networks, congestion notification, congestion avoidance, congestion detection

۱- مقدمه

امروزه برقراری ارتباط بی‌سیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و شبکه‌های سنسوری بی‌سیم نقش بسیار مهمی درصنعت و زندگی ایفا می‌کنند[۱]. ازدحام یک مساله شایع در شبکه‌های بی‌سیم است و چنانچه در شکل(۱) نشان داده شده است زمانی رخ می‌دهد که بار ورودی از میزان ظرفیت موجود تجاوز کند که منجر می‌شود به سرریز بافر در گره و یا این‌که پهنای باند به دلیل کانال‌های دارای عدم قطعیت کاهش یابد[۲].

نتیجه ایجاد ازدحام، افزایش تاخیر، افزایش نرخ از دست دادن اطلاعات، کاهش گذردهی و افزایش تعداد ارسال‌های مجدد است، بنابراین باید ازدحام را کاهش داد. مطالعات بسیاری برروی روش‌های کنترل ازدحام انتها به انتها در شبکه‌های با سیم انجام گرفته است[۳] که البته برای کاهش ایرادات آنها، روش کنترل ازدحام گام به گام [۴] پیشنهاد شده است که دارای برخورد سریع‌تری با ازدحام است و

بنابراین در شبکه‌های بی‌سیم ترجیح داده می‌شود. یک روش کنترل ازدحام مناسب باید دارای ۳ عملکرد مهم باشد:

- **ردیابی ازدحام**[۱]: ردیابی ازدحام درواقع ایجاد و محل ازدحام را مشخص می کند. ازدحام را می توان با توجه به پارامترهای مختلفی مانند وضعیت کانال، طول صف، نرخ بسته‌ها، زمان سرویس‌دهی بسته، مدت زمان ارسال بسته و تاخیر تعیین نمود[۵].
- **اطلاع رسانی ازدحام**[۲]: پس از مطلع شدن از وقوع ازدحام، گره سنسوری می‌بایست اطلاعات مربوط به ازدحام را به گره مقصد یا همسایه بالادستی گره بدهد. اطلاعات می‌تواند به‌صورت یک بیت واحد یا اطلاعات جامعی از نرخ مجاز، میزان ازدحام و غیره باشد. برای اطلاع‌رسانی ازدحام دو روش ضمنی[۳] و صریح[۴] وجود دارد. در روش ضمنی اطلاعات مربوط به ازدحام در سرآیند بسته اعلام می‌شود، بنابراین نیازی به ارسال بسته مجزای کنترلی نمی‌باشد، در حالی که در روش صریح از یک بسته کنترلی مجزا برای آگاه کردن گره مبدا استفاده می‌شود.
- **اجتناب از ازدحام**[۵]: درواقع اجتناب از ازدحام به کاهش ازدحام در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم می‌پردازد و برای این منظور می‌توان از روش‌های گوناگونی مانند کنترل نرخ، ازدست دادن بسته وقتی بافر گره دچار ازدحام پر است، ارسال ترافیک به قسمت‌های دیگر، روش شایعات مودبانه[۶] و طراحی‌های بهینه بین لایه‌ای استفاده نمود.

شکل ۱: ایجاد ازدحام در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم

۲- مروری بر روش های کنترل ازدحام موجود

کنترل ازدحام در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این قسمت به معرفی اجمالی پروتکل‌های کنترل ازدحام در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم خواهیم پرداخت.

۲-۱-پروتکل ردیابی و اجتناب از ازدحام(CODA)[۷]

این پروتکل [۶]یک روش کنترل ازدحام است که دارای ۳ جزء اصلی ردیابی ازدحام براساس گیرنده[۸]، فشار به عقب حلقه باز گام به گام[۹] و تنظیم چند مبدایی حلقه بسته[۱۰] می‌باشد. در ردیابی ازدحام براساس گیرنده، CODA سعی در ردیابی ازدحام با پایش میزان اشغال بافر دارد و اگر چنانچه میزان اشغال بافر از یک مقدار آستانه بیشتر شود، ازدحام رخ داده است. در این حالت گره به انتشار پیام فشار به عقب می‌پردازد. پیام‌های فشار به عقب به سمت گره مبدا منتشر می‌شوند و به محض دریافت پیام فشار به عقب، گره به تنظیم نرخ خود می‌پردازد و تصمیم به ادامه یا قطع انتشار این پیام بر اساس شرایط شبکه می‌گیرد. در مکانیزم تنظیم چند مبدایی حلقه بسته، وقتی نرخ گره مبدا از یک آستانه‌ای کمتر باشد، گره مبدا با نرخ از پیش تعیین شده‌ای به ارسال اطلاعات می‌پردازد، اما وقتی نرخ گره مبدا از آستانه بیشتر باشد در این حالت گره مبدا دچار ازدحام است و باید یک فیدبک ثابتی از گره مقصد دریافت کند تا نرخ خود را حفظ نماید و در غیر این صورت مجبور به کاهش نرخ خود است، به‌عبارت دیگر وقتی ازدحام شبکه از حد آستانه گذشت، گره مقصد یک سیگنال کنترلی را به همه گره‌های مبدا می‌فرستد تا با یک نظم خاصی یک تاییدیه از گره مقصد دریافت کنند و در غیر این صورت گره‌های مبدا باید نرخ ارسال خود را به‌شدت کاهش دهند. در این روش اطلاع‌رسانی ازدحام صریح است.

۲-۲-پروتکل ترکیب

پروتکل ترکیب[۱۱] [۷] یک مکانیزم کنترل ازدحام است که به ردیابی ازدحام براساس میزان اشغال بافر و نمونه‌برداری از کانال می‌پردازد و از روش اطلاع‌رسانی ازدحام به‌صورت ضمنی استفاده می‌کند. این روش برای کنترل ازدحام از کنترل جریان گام به گام ، محدودسازی نرخ و کنترل دستیابی به رسانه اولویت‌دار[۱۲] استفاده می‌کند. در کنترل جریان گام به گام از ارسال گره‌های سنسوری در زمانی که بافر گیرنده پر است، اجتناب می‌شود. در محدودسازی نرخ به پایش ترافیک ورودی به شبکه توسط گره‌های مختلف می‌پردازد و در کنترل دستیابی به رسانه اولویت دار تضمین می‌شود که گره دچار ازدحام شانس بیشتری برای دستیابی به کانال پیدا کند و بنابراین صف خروجی خود را در اسرع وقت تخلیه کند.

مانند CODA ، Fusion از یک آستانه[۱۳] ایستا[۱۴] برای ردیابی ازدحام استفاده می‌کند. ایراد این روش در این است که تنظیم یک آستانه مناسب در کانال‌های پویا[۱۵] بسیار مشکل است. در هر دو روش CODA و Fusion، گره‌ها از یک پیام همه پخشی[۱۶] برای آگاه‌سازی گره‌های همسایه از وقوع ازدحام استفاده می‌کنند اما هیچ‌گونه تضمینی برای اینکه این پیام به گره‌های مبدا برسد وجود ندارد.

۲-۳-پروتکل چکیدن

پروتکل چکیدن[۱۷][۸]، یک روش خود تنظیم برای توزیع و نگهداری کد در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم است. این روش برای کنترل نرخ از شایعات مودبانه استفاده می‌کند. در این روش، هر گره سعی می‌کند که خلاصه‌ای از اطلاعاتش را به‌صورت متناوب توزیع کند. در هر بار، اگر چنانچه تعداد اطلاعاتی که این گره از گره‌های همسایه دریافت می‌کند، از یک حد آستانه‌ای تجاوز کند، هر گره می‌تواند توزیع اطلاعاتش را«مودبانه» متوقف کند. ازطرف دیگر، اگر گره‌ها کد یا اطلاعات جدیدی دریافت کنند، می‌توانند تناوب توزیع اطلاعات را کوتاه کنند و بنابراین کد جدید را زودتر ارسال کنند. در این روش از ردیابی و اطلاع‌رسانی ازدحام استفاده نمی‌شود و برای کاهش ازدحام از شایعات مودبانه استفاده می‌گردد.

۲-۴-پروتکل سیفون

پروتکل سیفون[۱۸] [۹] از گره‌های مقصد مجازی که قابلیت کار در نرخ‌های زیاد اطلاعات را دارند، استفاده می‌شود. گره‌های مقصد مجازی ترافیک را از ناحیه با بار شدید به سمت خودشان هدایت می‌کنند. در این روش ردیابی ازدحام با شروع از گره[۱۹] یا با شروع از گره مقصد فیزیکی[۲۰] انجام می پذیرد. مزیت این روش در این است که نیازی به ردیابی ازدحام در هر گره ندارد. در این روش اطلاع‌رسانی ازدحام به‌صورت ضمنی است. ارسال مجدد ترافیک در این پروتکل، توسط یک بیت ارسال مجدد در سرآیند[۲۱] لایه شبکه انجام‌پذیر است. دو روش مختلف برای تنظیم بیت ارسال مجدد وجود دارد به‌طوری‌که بیت ارسال مجدد فقط درصورتی‌که ازدحام ردیابی شود فعال می‌شود یا بیت ارسال مجدد همیشه فعال است و اگر یک گره سنسوری، بسته‌ای با بیت ارسال مجدد فعال دریافت کند، ترافیک را به گره مقصد مجازی می‌فرستد.

۲-۵-پروتکل کنترل انتقال سنسور (STCP)[۲۲]

دراین پروتکل[۱۰]،گره‌های میانی به ردیابی ازدحام براساس طول صف می‌پردازند. در این روش، هر بسته دارای یک بیت اطلاع‌رسانی ازدحام است. در ردیابی ازدحام، گره این بیت را برای اطلاع‌رسانی

ازدحام به ایستگاه مبنا[۲۳] تنظیم می‌کند. ایستگاه مبنا، گره مبدا مسیر دچار ازدحام را از وقوع ازدحام مطلع می‌کند. به محض دریافت اطلاع رسانی از گره مقصد، گره مبدأ نرخ خود را تنظیم می‌کند یا از مسیر دیگری برای ارسال اطلاعات استفاده می‌کند.

۲-۶-پروتکل کنترل ازدحام براساس اولویت (PCCP)[۲۴]

این روش[۱۱]، یک مکانیزم کنترل ازدحام براساس اولویت است که به ردیابی ازدحام با توجه به درجه ازدحام می‌پردازد. درجه ازدحام نشان‌دهنده میزان ازدحام در گره سنسوری دچار ازدحام است و به‌صورت نسبت فاصله‌های زمانی بین ورود بسته[۲۵] به زمان سرویس‌دهی بسته تعریف می‌شود. درجه ازدحام، ازدحام را با استفاده از اطلاع‌رسانی ضمنی نشان می‌دهد و از ارسال بسته‌های اضافی برای اطلاع‌رسانی ازدحام اجتناب می‌کند. این روش به گره‌ها براساس میزان درگیر بودن گره، اولویت می‌دهد و به تنظیم نرخ براساس اولویت (PRA)[۲۶] می‌پردازد.

استفاده از فقط زمان سرویس‌دهی زمانی‌که نرخ ورودی برابر یا کمتر از نرخ خروجی در یک کانال با کاربری زیاد می‌باشد، ممکن است غلط‌انداز باشد، بنابراین در PCCP با در نظرگیری نسبت بین زمان سرویس‌دهی بسته و زمان ورود در یک گره خاص که نشان‌دهنده میزان ازدحام است، این مشکل رفع شده است. البته در روش PCCP از میزان کنونی بهره‌وری صف صرفنظر می‌شود که باعث افزایش تاخیرهای صف و سرریزهای متعدد بافر همراه با افزایش ارسال‌های مجدد می‌گردد.

۲-۶-پروتکل مدیریت بافر با وزن کم (LWBM)[۲۷]

دراین روش[۱۲] هر گره، وضعیت بافر خود را به گره‌های همسایه اعلام می‌کند و بدین ترتیب وضعیت بافر تمامی‌گره‌ها به همسایه‌هایشان منتشر می‌شود. یک گره در صورتی به ارسال اطلاعات می‌پردازد که بافر گره گیرنده پر نباشد. بدین ترتیب نرخ ارسال گره‌های سنسوری به مقدار نزدیک مقدار بهینه می‌رسد بدون اینکه ازدحام ایجاد شود. در این روش باتوجه به وضعیت بافرازدحام ردیابی می شود واطلاع رسانی ازدحام در این روش ضمنی است.

۲-۷-پروتکل تطبیق منابع با توجه به توپولوژی (TARA)[۲۷]

پروتکل [۱۳] براساس افزایش ظرفیت شبکه به جای کنترل ترافیک شبکه برای کاهش ازدحام است. در این پروتکل، ظرفیت شبکه به‌صورت حداکثر گذردهی قابل مشاهده گره‌های مقصد که حداکثر نرخ ارسال مجاز اطلاعات است، تعریف می‌شود. تداخل[۲۸] بین گره‌ها منجر به کاهش ظرفیت لینک می‌شود و در حالتی‌که تداخل بین لینک‌ها وجود ندارد، ظرفیت حداکثر است. ازدحام براساس شرایط کنونی بار شبکه و میزان اشغال بافر ردیابی می‌شود و با فعال‌سازی گره‌های پشتیبان[۲۹] به‌طور پویا در زمان‌های ازدحام کاهش پیدا می‌کند. در این روش اطلاع‌رسانی ازدحام ضمنی است. این پروتکل غیرمتمرکز است و از مدل تحلیل ظرفیت برای تعیین توپولوژی لازم استفاده می‌کند.

۲-۸-پروتکل کنترل ازدحام تطبیقی کیفیت سرویس(QoS-ACC)[۳۰]

این روش [۱۴] از دو روش کنترل ازدحام استفاده می‌کند، یکی برای کنترل ازدحام کوتاه‌مدت و دیگری برای کنترل ازدحام بلندمدت. در مورد کنترل ازدحام کوتاه‌مدت، گره‌های فرزند دچار ازدحام، ترافیک زمان حقیقی را به مسیر دیگری متناسب با وزن‌های مسیرها می‌فرستند که وزن مسیرها وابسته است به تاخیر انتها به انتهای مسیر گره‌های فرزند به مقصد. در ازدحام بلندمدت، گره‌های میانی پیام برگشت به عقب را در مسیر بازگشت به مبدا می‌فرستند. اگر پیام برگشت به عقب به مبدا برسد، مبدا ترافیک زمان حقیقی را در مسیری بر اساس وزن تخصیص داده شده به مسیر می‌فرستد و مسیر اولیه با توجه به شرایط شبکه به‌روزرسانی می‌شود. برای ردیابی ازدحام از شاخصی استفاده می‌شود که در واقع نسبت نرخ متوسط سرویس بسته به نرخ متوسط دریافت بسته است و اگر چنانچه کمتر از یک باشد به معنی وجود ازدحام است.در صورتی‌که ازدحام ردیابی شود، اطلاع‌رسانی ازدحام به‌صورت ضمنی انجام می شود.

۲-۹-پروتکل اجتناب از ازدحام براساس یادگیری خودکار (LACAS)[۳۱]

پروتکل [۱۵]یک روش کنترل ازدحام است که به‌طورخاص برای شبکه‌های سنسوری بی‌سیم و برای کاربردهای پزشکی طراحی شده است که در آن هدف اجتناب از ازدحام است و در صورت وقوع آن، کاهش اطلاعات از دست رفته دراثر ازدحام می‌باشد.در این روش سعی می‌شود که نرخ دریافت اطلاعات و نرخ ارسال یکسان باشد تا از ازدحام اجتناب شود. این پروتکل بر اساس یادگیری خودکار است و در آن هر گره از رفتار گذشته درس می‌گیرد و بهترین نرخ اطلاعات را برای اجتناب از وقوع ازدحام در شبکه انتخاب می‌کند و در آن از هیچ مکانیزم ردیابی و اطلاع رسانی ازدحام استفاده نمی‌شود.

۲-۱۰-پروتکل براساس یادگیری اتوماتیک (LABP)[۳۲]

این پروتکل کنترل ازدحام [۱۶] به منابع و ترافیک ارسالی اولویت می‌دهد. در این روش برای ردیابی ازدحام از درجه ازدحام استفاده می‌شود که نسبت زمان سرویس‌دهی به بسته به زمان دریافت بسته است که اگر بیشتر از یک باشد، ازدحام ردیابی می‌شود. گره‌های دارای ازدحام به همسایه‌های خود ازدحام را اطلاع‌رسانی می‌کنند و گره‌های میانی به تنظیم نرخ براساس میزان اشغال بافر می‌پردازند. اطلاع‌رسانی ازدحام در این روش به‌صورت ضمنی است و هرگره براساس یادگیری به تصمیم‌گیری می‌پردازد و با توجه به رفتارهای گذشته به آموزش خود می‌پردازد و به این ترتیب نرخ براساس محیط تنظیم می‌شود.

۲-۱۱-پروتکل مسیر جایگزین درخت سلسله مراتبی[۳۳](HTAP)

این پروتکل که یک الگوریتم کنترل منبع است به‌طور ساده به کاهش ازدحام در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم با ایجاد مسیرهای جایگزین دینامیک به مقصد می پردازد[۱۷]. در این روش از کنترل توپولوژی و نیز از یک آستانه ازدحام تطبیقی برای اجتناب از ازدحام گذرا استفاده می‌شود. کنترل توپولوژی با استفاده از حداقل انرژی انجام می‌شود. بعد از آنکه هر گره، گره‌های قابل مشاهده همسایه را پیدا کرد، به تبادل اطلاعات با آنها می‌پردازد واز اطلاعات گره‌های همسایه‌ای که به سینک نزدیک‌ترند استفاده می‌شود. مسیر جایگزین زمانی ایجاد می‌شود که درگره مشخصی ازدحام ایجاد شده باشد. زمانی‌که میزان اشغال بافر در حد مشخصی باشد، الگوریتم ردیابی ازدحام، نرخ دریافت بسته‌ها را بررسی می‌کند و از نسبت کل نرخ دریافت به حداکثر نرخ ارسال استفاده می‌شود. زمانی‌که این نسبت بزرگ است، سیگنال بازگشت به عقب به گره‌های میانی فرستاده می‌شود تا از مسیر جایگزین استفاده کنند. در این روش اطلاع‌رسانی ازدحام به‌طور ضمنی می‌باشد.

۲-۱۲-پروتکل کنترل ازدحام پیش بین غیرمتمرکز برای شبکه‌های سنسوری بی‌سیم

در [۱۸] روش کنترل ازدحام پیش بین غیرمتمرکز برای شبکه‌های سنسوری بی‌سیم پیشنهاد شده است. در این روش از نرخ تطبیقی و انتخاب بازه عقب گرد تطبیقی استفاده شده است. این روش شروع ازدحام را با توجه به میزان بهره‌وری صف و شرایط کانال ردیابی می‌کند و سپس یک روش کنترل جریان تطبیقی نرخ مناسب را انتخاب می‌کند و عدالت نیز تضمین می‌شود.

۲-۱۳-پروتکل کنترل ازدحام غیرمتمرکز تطبیقی غیرمربعی مقاوم(RDANQCC)[۳۴]

در[۱۹] برخلاف [۱۸] ابتدا مدلی برای شبکه‌های سنسوری بی‌سیم در زمان گسسته با زیر سیستم‌های دارای تاخیر ارایه شده که سیستم کلی از ترکیب آنها بدست آمده است. سپس یک روش کنترل ازدحام مقاوم غیرمتمرکز تطبیقی غیرمربعی ارایه شده است که نسبت به تغییر طول صف و تغییر تاخیر مقاوم است. در این روش از انتخاب تطبیقی بازه عقب‌گرد استفاده شده است. با استفاده از الگوریتم تخمین کانال و میزان بهره‌وری صف، ازدحام ردیابی شده و نرخ مناسبی توسط انتخاب تطبیقی بازه عقب‌گرد اعمال می‌شود. برای حل مساله از نامساوی ماتریسی خطی استفاده می‌شود. این روش از یک الگوریتم کنترل جریان گام به گام[۳۵] جدید استفاده می‌کند و ترافیک را توسط سیگنال‌های به عقب کاهش می‌دهد. در این روش برخلاف[۱۸] سیستم‌های حلقه بسته نسبت به تغییرات طول صف و تأخیر حاصله پایدار مجانبی فراگیر می‌باشند. در این روش برخلاف روش‌های پیشین که در آنها طول صف مطلوب ثابت فرض می‌شد، قابلیت لحاظ نمودن طول صف مطلوب متغیر با ترافیک خروجی نیز وجود دارد. طول صف مطلوب متغیر با ترافیک خروجی به‌عنوان یک درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود که امکان دستیابی به عملکرد بهتر را ایجاد می‌کند.

۲-۱۴-کنترل کننده‌های ازدحام غیرمتمرکز مبتنی بر توابع لیاپانوف

در [۲۰] با در نظرگیری سیستم ارایه شده در [۱۹]، کنترل‌کننده‌های ازدحام غیرمتمرکز مبتنی بر توابع لیاپانوف برای شبکه‌های سنسوری بی‌سیم ارایه شده و در آن سیستم‌های حلقه بسته نسبت به تغییرات طول صف و تاخیر حاصله پایدار مجانبی فراگیر می‌باشند. در این راستا در ابتدا توابع لیاپانوف مشترک مربعی برای تحلیل پایدارسازی و طراحی کنترل‌کننده سیستم مورد نظر استفاده می‌شوند. از آنجایی‌که توابع لیاپانوف مشترک مربعی، محافظه کار می‌باشند، توابع لیاپانوف غیرمشترک مربعی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله شرایط کافی برای پایدارسازی سیستم‌های شبکه‌های سنسوری بی‌سیم مورد بررسی و محاسبه ماتریس‌های بهره فیدبک از حل یکسری نامعادلات ماتریسی خطی (LMI) حاصل می‌گردد که با نرم افزارهای موجود به راحتی قابل حل می‌باشند. در حالیکه در کنترل کننده [۱۹] از نامساوی‌های ماتریسی خطی برگشتی (ILMIs) برای محاسبه ماتریس بهره فیدبک استفاده می‌گردید. نظربه این‌که عامل پیچیدگی روش[۱۹] به دلیل بازگشتی بودن آن است، این مساله در این مقاله مرتفع می‌گردد. از طرفی در[۱۹] نیاز به محاسبه فقط یک ماتریس بهره فیدبک بود، در حالی‌که در این مرجع، از ماتریس‌های متفاوت بهره فیدبک استفاده می‌شود. در مقایسه با [۱۹] که در آن یک کنترل‌کننده برای تمامی زیر سیستم‌ها یا کل سیستم طراحی می‌گردید، در این مقاله، یک کنترل‌کننده مجزا برای هر زیر سیستم طراحی می‌شود و کنترل‌کننده کلی در هر روش از انتخاب مناسب یکی از این کنترل‌کننده‌ها بدست می‌آید.

۲-۱۵-کنترل ازدحام مبتنی بر سلسله مراتب با تنظیم انرژی[۳۶]

در این روش، ابتدا مدل شبکه به یک توپولوژی سلسله مراتبی تبدیل شده که درآن گره‌های همسایه یک گره به سه نوع گره‌های سلسله مراتبی، گره‌های بالادست و گره‌های پایین دست تقسیم می‌شوند[۲۱]. سپس برای اجتناب از ازدحام، هرگره از گره‌های همسایه پایین‌تر سلسله مراتب خود استفاده می‌کند تا داده‌ها را ارسال کند. سپس با توجه به طول صف، ازدحام ردیابی می‌شود و گره‌های بالادست خود را برای یافتن گام بعد برای کاهش ازدحام اطلاع‌رسانی می‌کند. روش مصرف متعادل انرژی، انرژی مصرفی گره‌های سلسله مراتب پایین را با استفاده از گره با بیشترین انرژی باقی مانده متعادل می‌کند و با استفاده از گره‌های سلسله مراتبی مشابه، انرژی باقیمانده تمام گره‌ها در همان سلسله مراتب متعادل می‌شود.

۲-۱۶-پروتکل کنترل نرخ عادلانه مبتنی بر اولویت(PFRC)[۳۷]

پروتکل [۲۲] در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم یک الگوریتم کنترل ازدحام است که با استفاده از مفهوم کنترل میزان عدالت و اولویت ترافیک توزیع عادلانه پهنای باند توسط اولویت‌بندی ترافیک، طول صف و بار گره سنسوری کنترل می‌شود. در این روش توپولوژی درخت در نظر گرفته شده است و ترافیک‌های زمان حقیقی و غیرزمان حقیقی با اولویت‌های مختلف لحاظ شده است. این روش کنترل نرخ عادلانه منجر به بهبود گذردهی می‌شود و از ازدحام اجتناب می‌کند. کنترل نرخ برای توزیع عادلانه پهنای باند با در نظرگیری اولویت کلاس‌های ترافیکی گره‌های مختلف می‌باشد. واحد تنظیم نرخ به ایجاد نرخ با توجه به ورودی‌های واحد ردیابی ازدحام، واحد تنظیم اولویت و واحد کنترل عدالت می‌پردازد.

پروتکل	ردیابی ازدحام	اطلاع‌رسانی ازدحام	کنترل ازدحام	گام به گام/ انتهابه‌انتها
پروتکل ردیابی و اجتناب از ازدحام [۶]	میزان اشغال بافر و بار کانال	صریح	تنظیم نرخ	گام به گام
پروتکل ترکیب [۷]	میزان اشغال بافر و نمونه‌برداری‌از کانال	ضمنی	کنترل جریان‌گام به گام، محدودسازی نرخ، کنترل دستیابی به رسانه اولویت‌دار	گام به گام
پروتکل چکیدن [۸]	-	-	کنترل نرخ از طریق شایعات مودبانه	گام به گام
پروتکل سیفون [۹]	میزان اشغال بافروبار کانال	ضمنی	انتقال ترافیک به سینک‌های مجازی	گام به گام
پروتکل کنترل انتقال سنسور [۱۰]	طول صف	ضمنی	تنظیم نرخ با ارسال اطلاعات از مسیردیگر	انتها به انتها
پروتکل کنترل ازدحام براساس اولویت [۱۱]	درجه ازدحام	ضمنی	تنظیم نرخ با اولویت	گام به گام
پروتکل مدیریت بافر با وزن کم [۱۲]	وضعیت بافر	ضمنی	تنظیم نرخ به مقدار نزدیک بهینه	گام به گام
پروتکل تطبیق منابع با توجه به توپولوژی [۱۳]	میزان اشغال بافر و بار شبکه	ضمنی	فعال سازی گره‌های پشتیبان بطور پویا	گام به گام
پروتکل کنترل ازدحام تطبیقی کیفیت سرویس [۱۴]	نسبت نرخ متوسط سرویس بسته به نرخ متوسط دریافت بسته	ضمنی	انتخاب مسیرهای جایگزین	گام به گام
پروتکل اجتناب از ازدحام براساس یادگیری خودکار [۱۵]	-	-	تنظیم نرخ از طریق یادگیری از رفتارگذشته	گام به گام
پروتکل براساس یادگیری اتوماتیک[۱۶]	درجه ازدحام	ضمنی	تنظیم نرخ براساس محیط	گام به گام
پروتکل مسیر جایگزین درخت سلسله مراتبی [۱۷]	میزان اشغال بافر	ضمنی	سیگنال بازگشت به عقب و استفاده از مسیرجایگزین	گام به گام
پروتکل کنترل ازدحام پیش بین غیرمتمرکز برای شبکه‌های سنسوری بی‌سیم [۱۸]	شرایط کانال وطول صف	ضمنی	کنترل تطبیقی نرخ و انتخاب بازه عقبگرد تطبیقی	گام به گام
پروتکل کنترل ازدحام غیرمتمرکزتطبیقی غیرمربعی مقاوم [۱۹]	شرایط کانال وطول صف	ضمنی	کنترل تطبیقی و مقاوم نرخ با استفاده ازیک ماتریس بهره و انتخاب بازه عقبگرد تطبیقی	گام به گام
کنترل کننده‌های ازدحام غیرمتمرکز مبتنی بر توابع لیاپانوف [۲۰]	شرایط کانال وطول صف	ضمنی	کنترل تطبیقی و مقاوم نرخ با استفاده از ماتریس‌های متفاوت بهره و انتخاب بازه عقبگرد تطبیقی	گام به گام
کنترل ازدحام مبتنی بر سلسله مراتب با تنظیم انرژی [۲۱]	طول صف	ضمنی	میزان اشغال بافر گره دچار ازدحام ونرخ ارسال آن	گام به گام

پروتکل	ردیابی ازدحام	اطلاع‌رسانی ازدحام	کنترل ازدحام	گام به گام/ انتهابه‌انتها
پروتکل کنترل نرخ عادلانه مبتنی بر اولویت [۲۲]	اختلاف نرخ ورودی و خروجی گره	ضمنی	تنظیم نرخ با توجه به اولویت	گام به گام

۳- نتیجه‌گیری

کنترل ازدحام در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم مساله بسیار مهمی است. در این مقاله روش‌های مختلف کنترل ازدحام مورد بررسی قرارگرفت و عملکرد آنها با توجه به ردیابی ازدحام، اطلاع‌رسانی ازدحام و اجتناب از ازدحام بررسی گردید. باتوجه به اهمیت روزافزون شبکه‌های سنسوری بی‌سیم و اهمیت مساله کنترل ازدحام درآنها، نیاز به تحقیقات بیشتر برروی روش‌های کنترل ازدحام می‌باشد که در آن باید به محدودیت انرژی سنسورها وکیفیت سرویس نیز توجه نمود. در ادامه نتایج مقایسه پروتکل‌های مورد بررسی درجدولی ارایه می‌گردند.

۴- تشکروقدردانی

تحقیق فوق برگرفته از طرح پژوهشی می باشد که باحمایت مالی دانشگاه آزاداسلامی واحد اسلامشهر به اجرا درآمده است، بدین وسیله ازآن واحد دانشگاهی، تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

۵- مراجع

[۱] حمیدرضا خدادادی،محمدحسین قزل اياغ،ابوالفضل چمن مطلق «بررسی روش‌های برقراری ارتباط بدون سیم در شبکه‌های نسل آینده» فصل نامه علمی ترویجی عصربرق، جلد ۱ ، شماره ۱، ۱۳۹۲، صفحات ۴۳-۴۷.

[۲] شهرام جمالی، توفان سماپور«کنترل ازدحام مبتنی بر تخمین در شبکه های موردی بی سیم»مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۳ ، شماره۱،۱۳۹۲

[3]S .Jagannathan" ,End to end congestion control in high-speed networks27 ,"th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, pp556,2002–547 ..

[4] Y. Yi and S. Shakkottai, "Hop-by-hop congestion control over a wireless multi-hop networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.15,No.1 pp.133 – 144,2007.

[5] J. D. Rathnayaka and V. M. Potdar, "Wireless sensor network transport protocol: a critical review", Journal of Network and Computer Applications, Vol. 36, No.1, pp.134-146,2013.

[6] C. Y.Wan, S. Eisenman and A. Campbell, "CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks", 1st international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 266–279,2003.

[7] B. Hull, K. Jamieson and H. Balakrishnan, "Mitigating congestion in wireless sensor networks", Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 134–147,2004.

[8] P. Levis , N. Patel , D. Culler, S. Shenker, "Trickle: a self-regulating algorithm for code propagation and maintenance in wireless sensor networks", Proceeding of 1st Sympusiom Networked Systems Design and Implementation ,2001.

[9] C. Y. Wan, S. B. Eisenman, A.T. Campbell, J. Crowcroft, "Siphon: overload traffic management using multi-radio virtual sinks in sensor networks", 3rd international conference on Embedded networked sensor systems ,2005.

[10] Y. G. Iyer, S. Gandham, S. Venkatesan, "STCP: a generic transport layer protocol for wireless sensor networks", 14th International Conference on Computer Communications and Networks, pp.449-454, 2005.

[11] C. Wang, K. Sohraby, V. Lawrence, B. Li, Y. Hu, "Priority-based congestion control in wireless sensor networks", IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, Vol. 1, pp. 22- 31, 2006

[12] S. Chen and N. Yang, "Congestion avoidance based on lightweight buffer management in sensor networks", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 17, No.9, pp. 934-946, 2006.

[13] J. Kang, Y. Zhang and B. Nath," TARA: topology-aware resource adaptation to alleviate congestion in sensor networks", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol.18, No.7, pp. 919-931,2007.

[14] Md. Obaidur Rahman, M. M. Monowar and C. S. Hong,"A Qos Adaptive Congestion Control in Wireless Sensor Network", 10th International Conference on Advanced Communication Technology, Vol.2, pp. 941 – 946,2008.

[15] S. Misra, V. Tiwari and M. S. Obaidat, "LACAS: learning automata-based congestion avoidance scheme for healthcare wireless sensor networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol.27, No.4, pp. 466-479,2009.

[16] R. Hashemzehi, "A learning automata-based protocol for solving congestion problem in wireless sensor network", International Journal of Emerging Trends and Technology in Computer Science, Vol.2, No. 4, pp.396-399,2013.

[17] Sergiou, V. Vassiliou, and A. Paphitis, " Hierarchical Tree Alternative Path (HTAP) Algorithm for Congestion Control in Wireless Sensor Networks," Ad Hoc Netw., Vol. 11, No. 1, pp. 257–272, 2013.

[18] M.Zawodniok, S.Jagannathan, "Predictive Congestion Control Protocol for Wireless Sensor Networks", IEEE Transactions on Wireless Communication, Vol. 6, pp. 3955-3963, 2007.

[19] SSS Farahani, MR Jahed -Motlagh, MA Nekoui and SV Azhari. Robust decentralized adaptive nonquadratic congestion control algorithm for a class of delayed networks. Nonlinear Dynamics, Vol.73, pp. 2291–2311, 2013.

[20] SSS Farahani, MR Jahed -Motlagh and MA Nekoui. Novel congestion control algorithms for a class of delayed networks, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences,Vol. 23,pp. 824 – 840,2015.

[21] W. Chen, Y. Niu, Y. Zou, Congestion control and energy-balanced scheme based on the hierarchy for WSNs, IET Wireless Sensor Systems ,Vol.7,no.1,pp.1-8,2017.

[22] S. K. Swain and P. K. Nanda, Priority based fairness rate control in wireless sensor networks, International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET) ,pp. 2206 – 2210,2017.

پی‌نوشت

1 Congestion Detection
2 Congestion Notification (CN)
3 Implicit
4 Explicit
5 Congestion Avoidance
6 Polite Gossip
7 Congestion Detection and Avoidance (CODA)
8 Receiver based Congestion Detection
9 Open loop hop-by-hop backpressure
10 Closed loop multisource regulation
11 Fusion
12 Prioritized MAC
13 Threshold
14 Static
15 Dynamic
16 Broadcast
17 Trickle
18 Siphon
19 Node-initiated congestion detection
20 Physical sink-initiated congestion detection
21 Header
22 Sensor Transmission Control Protocol (STCP)
23 Base station
24 Priority based Congestion Control (PCCP)
۲5 Packet inter-arrival time
26 Priority based rate adjustment (PRA)
27 Light Weight Buffer Management (LWBM)
28 Topology Aware Resource Adaption (TARA)
29 Interference
30 Backup
31 QoS Adaptive Congestion Control) QoS-ACC(
32 Learning Automata based Congestion Avoidance (LACAS)
33 Learning Automata Based Protocol) LABP(
34 Hierarchical Tree Alternative Path
35 Robust Decentralized Adaptive Non-Quadratic Congestion Control Scheme (RDANQCC)
36 Hop-by-hop flow control algorithm
37 Congestion control and energy-balanced scheme based on the hierarchy for WSNs
38 Priority based Fairness Rate Control

***

کاربرد رویتگرها در عملیات پزشکی با کمک ربات‌ها

بیتا فلاحی/ دانشگاه آلبرتا، کانادا/ fallahi@ualberta.ca
مهدی توکلی افشاری/ استاد تمام دانشگاه آلبرتا، کانادا/ mahdi.tavakoli@ualberta.ca

چکیده

در این مقاله، کاربرد رویتگرها در انجام عملیات پزشکی که با همکاری ربات‌ها انجام می‌شود مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این‌گونه عملیات، همکاری هم‌زمان ربات با پزشک و یا جراح باعث افزایش دقت و بهره‌وری بالاتر عملیات می‌شود. با در نظر گرفتن توانایی رویتگرها در فراهم کردن اطلاعات در مورد ابزار جراحی، بافت مورد جراحی و تراکنش بین این دو، می‌توان رویتگرها را به‌عنوان جایگزینی برای حسگرها در انجام عملیات پزشکی در نظر گرفت. این مقاله بررسی اجمالی در مورد کاربرد رویتگرها در تخمین موقعیت ابزار پزشکی، حرکت و تغییر شکل بافت و همچنین نیروهای تراکنش بین بافت و ابزار را ارایه می‌دهد. از چالش‌های اصلی در طراحی رویتگر در انجام عملیات پزشکی می‌توان به تضمین امنیت و بهره‌وری وعدم دسترسی به مدل دقیق بافت اشاره کرد. با توجه به گستردگی کاربرد ربات‌های پزشکی، مطالعه در این زمینه بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ربات دستیار، تخمین، رویتگر

Application of Observers in Medical Robotics

Bita Fallahi/University of Alberta, Canada/ fallahi@ualberta.ca
Mahdi Tavakoli Afshari/ University of Alberta, Canada/ mahdi.tavakoli@ualberta.ca

Abstract

This paper presents the applications of observers in robot-assisted medical procedures, in which robotic manipulators act in collaboration with surgeons or therapists to improve the efficiency and accuracy of the interventions. Observers can be considered as replacements for sensors to provide the surgeon and/or the robots with information about the tissue, surgical tools, and their interaction. This paper provides an overview of the observation methods for estimating the tool pose, tissue motion, and the interaction forces. Having a good model for the system and guaranteeing the safety and efficiency of the methods are the challenges involved in using the observers in medical procedures. However, the application-driven nature of the medical robotics provides a thriving field of study for using the observers.

Keywords: Robot-assisted, Estimation, Observer

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، ربات‌ها تاثیر چشمگیری در کیفیت زندگی بشر داشته‌اند. نمونه‌های این تأثیر در تولید، پزشکی، حمل و نقل و امور تفریحی قابل مشاهده است. از مزایای اصلی به‌کارگیری ربات‌ها می‌توان به درجه بالای دقت، بهره‌وری، تکرارپذیری و توان بالاتر اشاره کرد. در سال‌های اخیر، کاربرد ربات‌ها در پزشکی افزایش شایان توجهی داشته است. براساس طبقه‌بندی ارایه شده در [۱]، ربات‌های پزشکی را می‌توان به دو دسته سیستم‌های طراحی و تولیدی به کمک رایانه[۱] و ربات‌های جراحی دستیار[۲] تقسیم‌بندی کرد. سیستم‌های طراحی و تولیدی به کمک رایانه در کاربردهای برنامه‌ریزی، طراحی و ارزیابی مورد استفاده قرار می‌گیرند درحالی‌که ربات‌های دستیار ابزار ویژه‌ای هستند که مستقیماً توسط جراح مورد استفاده قرار گرفته و امکان بهره‌وری از توانایی جراح و ربات به‌صورت همزمان و افزایش ایمنی عملیات را فراهم می‌کنند.

از کاربردهای ربات‌های دستیار می‌توان به مواردی از قبیل پرتودرمانی[۳]، جراحی با تهاجم کمتر[۴] و جراحی از راه دور[۵] اشاره کرد. در پرتودرمانی، پرتوهای با انرژی بالا در از بین بردن بافت‌های سرطانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش، پرتوها باید با دقت بالا به بافت سرطانی تابیده شوند. جراحی با تهاجم کمتر روشی است که اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته که از مزایای آن می‌توان به کاهش درد و زمان بهبود اشاره کرد. در این روش، برخلاف روش‌های جراحی معمول چند حفره کوچک در بدن ایجاد می‌کنند که از طریق آن جراح قادر است ابزار جراحی ظریف را وارد بدن کند. در این روش با استفاده از آندوسکوپ جراح قادر به مشاهده ابزار و بافت مورد جراحی است. در جراحی‌های از راه دور جراح و بیمار در دو محل متفاوت حضور دارند و عملیات جراحی با استفاده از ربات‌های راهبر[۶] و رهرو[۷] انجام می‌گیرد. جراح با ربات راهبر در ارتباط است و آن را حرکت می‌دهد. ربات راهبر نیز طوری برنامه‌ریزی شده است که رفتار ربات راهبر را دنبال کند و اطلاعات محیطی را از طریق کانال ارتباطی به جراح منتقل کند. علاوه بر عملیات جراحی، یکی دیگر از کاربردهای ربات‌ها، بهبود عملکرد حسی و حرکتی در تمرینات توان‌بخشی[۸] است. درجه بالای تکرارپذیری و قابلیت اندازه‌گیری عملکرد بیمار از جمله مزایای استفاده از ربات‌ها در تمرینات توان‌بخشی است.

از دیدگاه کنترلی، مساله کنترل ربات‌های دستیار با چالش‌های بسیاری روبرو است. یکی از این چالش‌ها در نظر گرفتن رفتارهای سینماتیکی و دینامیکی ربات‌ها است. به‌علاوه حسگرها و ابزارهای اندازه‌گیری مورد استفاده باید از نظر بالینی قابل استفاده و تأیید شده باشند. روش‌های تصویربرداری عنصر بسیار مهمی در عملیات پزشکی محسوب می‌شوند. تصویربرداری بهنگام[۹]، نه تنها اطلاعات تصویری در مورد عملیات را در اختیار جراح قرار می‌دهد بلکه با ترکیب با روش‌های پردازش تصویر و تبدیل اطلاعات تصویری به مقادیر عددی قابلیت استفاده توسط رایانه را نیز دارند. این ویژگی کاربرد مهمی در دنبال کردن حرکت ابزار یا عضو مورد جراحی دارد. در شرایطی که شیء یا عضو مورد نظر در تمام فریم‌های تصویربرداری قابل مشاهده نباشد ساختارهای پیش‌بین و یا تخمین‌گرها راهکاری مناسب در تخمین موقعیت را فراهم می‌سازند. به‌علاوه در کاربردهایی که شامل تعامل کاربر/ربات و یا ربات/بافت بدن باشد، به منظور تضمین ایمنی و عملکرد سیستم کنترلی، اندازه‌گیری نیروهای تعامل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اینها نمونه‌هایی است که اهمیت اندازه‌گیری در حلقه کنترلی ربات‌ها در کاربردهای پزشکی را نشان می‌دهد.

شکل ۱: کاربردهایی از تخمین‌گرها که در این مقاله در نظر گرفته شده است.

شکل ۲: عملکرد فیلتر کالمن توسعه‌یافته (FKE)

رویتگرها[10] را می‌توان به‌عنوان جایگزینی برای حسگرها در نظر گرفت. رویتگرها گونه ویژه‌ای از تخمین‌گرها هستند که با استفاده از مدل‌های ریاضی سیستم و اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط حسگرها، متغیرهای غیرقابل‌اندازه‌گیری را تخمین می‌زنند. همان‌طور که از نام آن‌ها برمی‌آید، رویتگرها مقدار متغیرهای غیرقابل‌اندازه‌گیری را رویت می‌کنند. همچنین برای حذف نویز و هموار کردن سیگنال‌ها، می‌توان از رویتگرها در تخمین متغیرهای اندازه‌گیری شده نیز استفاده کرد. البته باید توجه داشت که در عملکرد رویتگر و تخمین‌گر تفاوت‌هایی وجود دارد. شرط لازم در استفاده از رویتگر، وجود رابطه‌ای بین متغیرهای اندازه‌گیری شده و متغیرهای اندازه‌گیری نشده است که شرایط رویت‌پذیری[11] نامیده می‌شود. در مقایسه با رویتگر، عملکرد یک تخمین‌گر عمومی مانند عملکرد یک فیلتر است که مستقل از مدل سیستم است. همچنین، متغیر تخمین‌زده شده همان متغیر اندازه‌گیری شده است. به‌عنوان مثال، تخمین حرکت یک عضو با استفاده از تصاویر بدون استفاده از مدل حرکت توسط یک تخمین‌گر قابل انجام است. با اینکه عملکرد رویتگرها و تخمین‌گرها بسیار به هم نزدیک است، این دو روش دارای ویژگی‌های ساختاری متفاوتی هستند و در برخی کاربردها هردو به‌صورت همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کاربرد ربات‌ها در عملیات پزشکی به‌شدت به نوع عملیات وابسته است. در کاربردهای توان‌بخشی که تجهیزات اسکلتی-عضلانی[12] توسط بیمار مورد استفاده قرار می‌گیرد، جایگزینی حسگرها با رویتگرها در کاهش هزینه و وزن تجهیزات مؤثر خواهد بود. همچنین در برخی تجهیزات مانند دستگاه‌های اسکلتی-عضلانی برای دست، فضای کافی برای قرار دادن حسگر وجود نخواهد داشت[۲]. در جراحی‌هایی با تهاجم کمتر که با استفاده از ابزار جراحی ظریف انجام می‌شود، قرار دادن دستگاه‌های اندازه‌گیری بر روی ابزار جراحی عملی نیست. استریلیزه کردن تجهیزات در جراحی‌ها نیز مساله مهمی است که با استفاده از رویتگرها به‌جای حسگرها حذف خواهد شد.

بااین‌حال باید توجه داشت که در کنار تمام مزایای گفته‌شده، طراحی رویتگرها با چالش‌های بسیاری روبرو است. یکی از مهم‌ترین مسایل در امور پزشکی تضمین ایمنی بیمار و پزشک و همچنین دستیابی به عملکرد مطلوب است که باید در طراحی رویتگر مدنظر قرار گیرد. این مساله به‌خصوص در شرایطی که رویتگر به‌همراه کنترل‌گر مورد استفاده قرار می‌گیرد از اهمیت بالاتری برخوردار می‌شود. به‌علاوه، در اختیار داشتن یک مدل مناسب از سیستم در طراحی رویتگر و تضمین عملکرد آن بسیار مؤثر است درحالی‌که پیدا کردن چنین مدلی کار ساده‌ای نیست. در این مقاله، مروری بر کاربرد رویتگرها در عملیات پزشکی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طورکه در شکل (۱) نشان داده‌شده است این بررسی در مورد دو حوزه اصلی ۱) تخمین موقعیت و حرکت و ۲) تخمین نیرو انجام شده است. ساختار مقاله به این صورت است: در بخش ۲ روش‌های متداول در تخمین حرکت در جراحی قلب و پرتودرمانی و نیز موقعیت و جهت‌گیری ابزار جراحی موردبحث قرار می‌گیرد. در بخش ۳ مساله تخمین نیرو در عملیات جراحی و توان‌بخشی مورد بررسی قرار گرفته و در بخش نهایی نتیجه‌گیری ارایه می‌شود.

۲- تخمین موقعیت

در کاربردهای پزشکی، تصویربرداری قبل از عملیات جراحی اطلاعات سودمندی در اختیار جراح قرار می‌دهد. در جراحی‌هایی با تهاجم کمتر، با استفاده از تصویربرداری در حین عملیات که توسط آندوسکوپ و یا اولتراسوند انجام می‌شود، جراح قادر خواهد بود حرکت اعضای داخلی و نیز موقعیت ابزار جراحی را دنبال کند. در عملیات جراحی که با همکاری ربات‌ها انجام می‌شود، لازم است این اطلاعات تصویری با روش‌های پردازش تصویر ترکیب‌شده تا به مقادیر عددی و قابل استفاده توسط رایانه تبدیل شود. در ادامه کاربرد رویتگرها در تخمین موقعیت ابزار پزشکی و حرکت اعضای داخلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱- تخمین حرکت فیزیولوژیکی

حذف هرگونه حرکت ناخواسته در حین انجام عملیات جراحی در افزایش دقت عملیات مؤثر خواهد بود. حتی در شرایطی که بیمار به‌طور کامل ساکن باشد احتمال وجود حرکت فیزیولوژیکی اعضای بدن وجود خواهد داشت. حرکت فیزیولوژیکی را می‌توان به دو نوع پریودیک مانند تپش قلب، تنفس و حرکت ناپریودیک مانند حرکت اعضا بعد از باز کردن حفره بدنی تقسیم‌بندی[۳]، [۴] کرد. در شرایطی که مدل مناسبی از حرکت در دسترس نباشد، تخمین حرکت تنها با استفاده از تصاویر پزشکی و با دنبال کردن نقطه مورد توجه[13] (IOP) بر روی عضو مورد جراحی ممکن خواهد بود. ثبت تصاویر صلب[14] روشی است برای یافتن تبدیل بین تصویر مرجع و تصویر مورد بررسی که شامل یافتن ماتریس انتقال و چرخش برای توصیف حرکت می‌باشد[۵]. در ثبت تصاویر غیرصلب[15] هدف، تعریف ویژگی‌های هندسی مشترک در دو تصویر و یافتن تبدیلی برای کمینه کردن یک تابع فاصله از پیش تعریف‌شده می‌باشد. در[۵]، روش‌های مختلف ثبت تصاویر مورد بررسی قرار گرفته است. از نمونه تخمین حرکت با استفاده از ثبت تصاویر می‌توان به تخمین حرکت مغز با استفاده از تصاویر سه‌بعدی آلتراسوند در عملیات جراحی مغز [۶]-[۸] و نیز تخمین حرکت اعضای داخلی در پرتودرمانی کبد [۹] و بازسازی حرکت بافت در عملیات لاپراسکوپی [۱۰] اشاره کرد. این حرکات غیرپریودیک به‌طور عمومی توسط سیستم‌های طراحی و تولیدی به کمک رایانه بازیابی می‌شوند.

تصاویر پزشکی در تخمین حرکات پریودیک نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. منبع اصلی حرکات پریودیک در بدن تپش قلب و تنفس می‌باشد. در پرتو درمانی که پرتوهای پر انرژی به بافت‌های سرطانی تابیده می‌شوند، حرکات ناشی از تنفس دقت تمرکز این پرتوها را کاهش می‌دهد. همچنین، در جراحی قلب، حرکات ناشی از تپش قلب باعث کاهش دقت جراح می‌شود. یک روش حذف حرکت قلب، متوقف کردن قلب و اتصال بدن به دستگاه قلبی-ریوی[16] است که احتمال رخداد سکته مغزی و اختلالات حافظه‌ای را افزایش می‌دهد [۱۱]. راهکار دیگر استفاده از تثبیت‌کننده بافت است که تنها در عملیات جراحی سطح خارجی قلب قابل استفاده است[۱۲]. حرکات فیزیولوژیکی را نیز می‌توان به‌صورت فعال با استفاده از ربات‌های پزشکی جبران‌سازی کرد. در روش جبران‌سازی فعال، هدف حذف حرکت نسبی بین عضو مورد نظر و ابزار جراحی است به‌صورتی‌که نسبت به هم ثابت دیده شوند [۱۳]. یک روش در پیاده‌سازی این راهکار حرکت دادن بیمار است که در آن احتمال ایجاد ناراحتی برای بیمار وجود خواهد داشت. روش دیگر حرکت دادن ابزار پزشکی به‌صورت هماهنگ با حرکت فیزیولوژیکی است. در هردوی این روش‌ها ابتدا لازم است حرکات فیزیولوژیکی به‌صورت بهنگام از روی تصاویر پزشکی استخراج شود. چالش بزرگ در استخراج این حرکات فیزیولوژیکی از روز تصاویر پزشکی مانند TC، آندوسکوپ و اولتراسوند نرخ پایین به‌روزرسانی تصاویر در مقایسه با فرکانس بالای حرکات است. روش‌های گوناگونی برای تخمین حرکات فیزیولوژیکی با تعقیب

نقطه‌ای روی سطح قلب در تصاویر پزشکی وجود دارد [۱۲]-[۱۶]. ازآنجاکه این‌گونه روش‌ها تنها مبتنی بر اطلاعات تصویری هستند معمولاً بدون قوام و دقت لازم در تخمین حرکت بوده و در شرایط انسداد تصویر توسط ابزار جراحی و یا خون، این روش‌ها قابلیت پیش‌بینی حرکت را نخواهند داشت. به‌علاوه تأخیر ناشی از جمع‌آوری و پردازش تصاویر قابل‌چشم‌پوشی نیست. در چنین شرایطی استفاده از روش‌های پیشبین در جبران خطا مناسب خواهد بود.

با توجه به ماهیت حرکات فیزیولوژیکی، می‌توان از یک مدل شبه‌پریودیک[۱۷] برای تخمین حرکت ناشی از تپش قلب و تنفس استفاده کرد. این حرکت به‌صورت یک سری فوریه متغیر با زمان تعریف می‌شود که ضرایب آن را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی تخمین زد [۱۷]، [۱۸]. فیلتر کالمن توسعه‌یافته[۱۸](FKE) روش تخمینی است که در آن اندازه‌گیری‌ها و مدل ریاضی در تخمین متغیرهای نامعلوم به‌صورت همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش قابلیت روبرویی با نرخ پایین به‌روزرسانی تصاویر را داشته و می‌توان از آن در پیش‌بینی حرکت استفاده کرد. مدل فضای حالت زیر را که بر اساس گام تصادفی[۱۹] است در نظر بگیرید:

$$x(t+\Delta t) = A(\Delta t)x + \mu \qquad (۱)$$

$$z(t) = y\big(x(t)\big) + v \qquad (۲)$$

$$y(x(t)) = c + \sum_{l=1}^{m} r_l \sin\theta_l(t) \qquad (۳)$$

$$A(\Delta t) = \begin{bmatrix} I_{m+1} & & & 0 & \\ & 1 & & & \\ & \Delta t & 1 & & \\ 0 & 2\Delta t & 0 & 1 & \\ & \vdots & & & \ddots \\ & m\Delta t & & & 1 \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

که در آن μ و v نویز گوسی مستقل هستند. بردار $x=[c(t) \quad r_l(t) \quad \omega(t) \quad \theta_l(t)]^T$ و z به ترتیب نشان‌دهنده بردار حالت و اندازه‌گیری نویزی بوده و y(t) خروجی سیستم، یا همان حرکت شبه پریودیک قلب است. در این معادله، $\theta_l(t) = l\int_0^t \omega(\tau)d\tau + \phi_l(t)$ بوده که در آن $\omega(t)$ و $\phi_l(t)$ به‌ترتیب فرکانس ضربان و فاز هارمونیک‌ها و m تعداد هارمونیک‌ها است. چنانچه در شکل (۲) نشان داده شده است، فرآیند تخمین به دو مرحله پیش‌بینی و به‌روزرسانی تقسیم می‌شود. در مرحله پیش‌بینی، در نخستین تکرار، مقادیر اولیه x^+ و p^+ مورد استفاده قرار می‌گیرند تا نخستین پیش‌بینی x^- و p^- انجام شود که در مرحله بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرحله به‌روزرسانی، مقادیر جدید x^+ و p^+ محاسبه شده و دوباره در تکرار بعدی در پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این شکل، ماتریس کوواریانس نویز فرآیند و ماتریس Q کوواریانس نویز مشاهده بوده و با استفاده از

$$H = \left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{x^-} \qquad (۵)$$

قابل محاسبه است. نمونه‌هایی از روش‌های استفاده شده در تخمین حرکت قلب با استفاده از فیلتر کالمن در [۱۹] و [۲۰] ارایه شده است.

شکل ۳: سوزن در فضای سه بعدی. موقعیت و جهتگیری سر سوزن بر اساس موقعیت و جهتگیری دستگاه مختصات متحرک {B} نسبت به دستگاه ثابت {A} تعریف می‌شود.

۲-۲-تخمین موقعیت ابزار جراحی

در جراحی‌های انجام شده با ربات دستیار که در آن ابزار جراحی توسط ربات هدایت می‌شود، دسترسی به موقعیت و جهت‌گیری ابزار جراحی در کنترل ربات بسیار موثر خواهد بود. یکی از روش‌های تصویربرداری متداول و مقرون به‌صرفه، تصویربرداری اولتراسوند است که در عملیات مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله تخمین موقعیت سوزن در عملیاتی همچون brachytherapy، biopsy و neurosurgery مورد بررسی قرار می‌گیرد. در روش‌های نامبرده، سوزن‌های باریک و تو خالی نوک تیز[۲۰] به‌منظور تشخیص و درمان، تزریق دارو و یا نمونه‌برداری وارد بدن بیمار می‌شود. هنگامی‌که سوزن وارد بدن بیمار می‌شود، با توجه به نامتقارن بودن نوک‌تیز سوزن و تاثیر نیروهای تراکنش بین سوزن و بافت بدن، با توجه به جهت نوک‌تیز، سوزن خم شده و روی یک مسیر منحنی شکل سه‌بعدی حرکت می‌کند. مسیر مناسب حرکت سوزن به کاربرد مورد استفاده بستگی دارد. در biopsy، بدون توجه به مسیر طی شده تنها نیاز است سر سوزن به نقطه مورد نظر داخل بدن بیمار برسد. در brachytherapy، که نمونه‌ای از پرتودرمانی داخلی است، مواد رادیواکتیو توسط سوزن وارد بدن شده و در محل‌های مشخصی در اطراف بافت سرطانی جای‌گذاری می‌شوند. در این روش عملکرد مطلوب با حرکت دادن سوزن روی یک خط راست و جایگذاری مواد رادیواکتیو رو مسیر سوزن بدست می‌آید. در برخی موارد به‌منظور جلوگیری از برخورد سوزن با موانع موجود در مسیر مستقیم از قبیل استخوان‌ها و یا رشته‌های عصبی، سوزن باید روی مسیر منحنی از پیش تعیین‌شده‌ای حرکت داده شود. یکی از روش‌های هدایت سوزن روی مسیر مطلوب استفاده از الگوریتم‌های برنامه‌ریزی حرکت[۲۱] است. در این روش‌ها، فرمان‌های لازم برای هدایت سوزن در زمان حال و زمان‌های آینده با استفاده از مدل ریاضی به‌صورت آفلاین انجام شده و جبران‌سازی خطا با به‌روزرسانی مسیر مطلوب انجام می‌شود. راهکار دیگر استفاده از روش‌های کنترلی مبتنی بر حلقه فیدبک است. در این روش‌ها، کنترل‌گر به‌صورت آنلاین فرمان لازم برای هدایت سوزن را محاسبه می‌کند. در [۱۲] چالش‌های موجود در مساله هدایت سوزن مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طورکه در شکل (۳) نشان داده شده است، حرکت سوزن توسط حرکت مبدأ دستگاه مختصات متحرک،{B}که به سر سوزن متصل است، نسبت به دستگاه مختصات ثابت {A} قابل توصیف است. این حرکت با استفاده از یک بردار موقعیت و یک ماتریس چرخش قابل تعریف

خواهد بود. موقعیت سر سوزن با استفاده از تصویربرداری پزشکی قابل ردیابی است. نمونه‌هایی از روش‌های متفاوت برای بازیابی موقعیت در [۲۲]- [۶۲] قابل دستیابی است.

با توجه به وابستگی حرکت سوزن به جهت نوک‌تیز آن، زوایای اویلر که نشان‌دهنده جهت‌گیری سر سوزن هستند [۲۷] تأثیر بسیاری درحرکت سوزن داشته و دستیابی به مقادیر این زوایا در کنترل حرکت سوزن بسیار سودمند خواهد بود. مشکل اساسی در اندازه‌گیری مقادیر این زوایا در این است که با توجه به قطر کم سوزن‌های مورد استفاده و کیفیت پایین تصاویر آلتراسوند، سر سوزن در این تصاویر قابل تشخیص نبوده و امکان اندازه‌گیری جهت‌گیری سر سوزن با استفاده از تصاویر وجود نخواهد داشت. این محدودیت مشوقی برای استفاده از رویتگرها در تخمین جهت‌گیری سر سوزن خواهد بود. در بسیاری روش‌های کنترلی ارایه شده مانند [۲۸]، حسگرهای جهت‌گیری برای اندازه‌گیری کامل و یا جزئی جهت‌گیری سر سوزن مورد استفاده قرار گرفته است. به‌کارگیری چنین حسگرهایی شاید در تحقیقات آزمایشگاهی ممکن باشد ولی در عملیات بالینی عملی نخواهد بود. معادلات سیستماتیکی حرکت صفحه‌ای سوزن را در نظر بگیرید که در آن سوزن در راستای محور z وارد بافت شده و در جهت محور x منحرف می‌شود:

$$\dot{x} = v \sin\beta \tag{۶}$$

$$\dot{\beta} = kv \sin\gamma \tag{۷}$$

$$\dot{\gamma} = -kv \cos\gamma \tan\beta + u \tag{۸}$$

در این معادلات x موقعیت سر سوزن در راستای محور x بوده که توسط تصاویر آلتراسوند قابل‌اندازه‌گیری است. β و γ زوایای اویلر هستند که راه مستقیمی برای اندازه‌گیری آن‌ها وجود ندارد. v سرعت داخل کردن سوزن، u سرعت چرخش سوزن حول محور خود و میزان خمیدگی مسیر سوزن است که مقدار ثابتی فرض می‌شود. با استفاده از تبدیل حالت، $s = [x \quad \sin\beta \quad -\cos\beta \sin\gamma]^T$، معادلات به فرم زیر قابل بازنویسی است

$$\dot{s} = As + B\phi \tag{۹}$$

$$y = Cs \tag{۱۰}$$

که در آن

$$A = \begin{bmatrix} 0 & v & 0 \\ 0 & 0 & -vk \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0 \quad 0] \tag{۱۱}$$

$$\phi = kvs_2 \mp u\sqrt{1 - (s_2^2 + s_3^2)} \tag{۱۲}$$

با فرض معلوم بودن ϕ در [۲۷]یک رویتگر خطی برای این سیستم طراحی شده و با فیدبک حالت مورد استفاده قرار گرفته است. ولی با توجه به تکینگی این سیستم غیرخطی، رویتگر طراحی شده تنها قادر به کنترل انحراف خارج از صفحه سوزن خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر سیستم حلقه بسته تنها در همسایگی صفر همگرا خواهد بود. در [۲۹]، یک رویتگر غیرخطی برای این سیستم در نظر گرفته شده است که دوباره همگرایی را تحت شرایط خاص مورد بررسی قرار داده است. با توجه به مطالعات اندک انجام شده، طراحی رویتگر برای تخمین جهت‌گیری سر سوزن نیازمند تحقیقات گسترده‌تر است

۳- تخمین نیرو

در کاربردهایی که شامل تعامل ربات و انسان است، به‌منظور تامین امنیت و جلوگیری از اعمال نیروی بیش از اندازه بر بیمار، استفاده از روش‌های کنترل نیرو توصیه می‌شود[۳۰]. در جراحی‌های از راه دور و یا عملیاتی که با همکاری ربات‌ها انجام می‌شود، ربات در تماس مستقیم با بافت نرم است. در این حالت تشخیص و اندازه‌گیری نیروهای تماسی از اهمیت بالایی برخوردار است. این مساله در کاربردهای توان‌بخشی که هدف بازسازی ساختار اسکلتی-عضلانی بدن است و ربات در تعامل با بیمار قرار دارد نیز دیده می‌شود. در شرایط تماس مستقیم بین ربات و بافت بدن، استفاده از روش‌های کنترل موقعیت تنها در صورتی مؤثر خواهد بود که مدل کاملاً دقیقی از ربات، بافت بدن و مقدار تمام متغیرهای آن در دسترس باشد. بدیهی است که در عمل چنین چیزی ممکن نیست چرا که بافت بدن ناهمگون بوده و مدل دقیقی برای آن وجود نخواهد داشت. در چنین شرایطی استفاده از روش‌های کنترل نیرو راهکار مناسب‌تری در کنترل ربات‌ها خواهد بود. در جراحی‌های از راه دور که جراح تنها در تعامل با ربات راهبر است، انتقال نیروهای تماسی و نمایش آن‌ها به جراح توسط فیدبک نیرو در ربات راهبر، در افزایش احساس حضور جراح در محیط بسیار مؤثر خواهد بود. روشن است که در چنین کاربردهایی ابتدا لازم است نیروهای تماسی اندازه‌گیری شوند، ولی چنانچه پیش‌تر گفته شد، استفاده از حسگر نیرویی که در تماس مستقیم با بیمار قرار می‌گیرد عملی نیست [۳۱].

علاوه بر عملیات جراحی که با کمک ربات‌ها انجام می‌شود، نمونه‌های متفاوتی از دستگاه‌های اسکلتی-عضلانی وجود دارند که به‌منظور توان‌بخشی قسمت‌های مختلف بدن مانند ستون فقرات [۳۲]، زانو [۳۳]، دست [۳۴] مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دستگاه‌ها به‌منظور افزایش کارایی مفاصل و اندام‌های بدن طراحی شده‌اند که در آن‌ها با اندازه‌گیری زوایای مفاصل و نیروهای وارده از طرف بیمار و کنترل دستگاه، تمرینات توان‌بخشی روی عضو مورد نظر اعمال می‌شود. به‌منظور تضمین ایمنی و جلوگیری از هرگونه آسیب مجدد، لازم است این دستگاه‌ها به‌صورت دقیق کنترل شوند. در اینجا دوباره نمونه دیگری از تعامل ربات و انسان ارایه شد که اندازه‌گیری نیرو در آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

در هردو کاربرد یاد شده، جایگزین کردن حسگرها با روش‌های تخمین، تاثیر چشمگیری در کاهش هزینه و افزایش کاربری دستگاه‌های طراحی‌شده دارند. باید توجه داشت که چالش اصلی این مساله در طراحی رویتگر، استفاده از آن به همراه کنترل‌گر و تضمین پایداری، ایمنی و عملکرد است. در ادامه کاربرد رویتگرها در تخمین نیرو به دو دسته اساسی تقسیم‌بندی شده است. ابتدا نیروهای تراکنش در کاربردهای توان‌بخشی و نیز نیروهای تماسی بین ابزار پزشکی و بافت بدن مورد بررسی قرارگرفته و پس از آن تخمین نیروها در حضور ابزار منعطف[۲۲] مانند سوزن ارایه می‌شود. در این کاربردها عموماً از روش‌های مبتنی بر فیلتر کالمن و رویتگر اغتشاش (DOB)[۲۳] استفاده می‌شود.

۳-۱- ابزار صلب

وظیفه اصلی رویتگر اغتشاش، تخمین اغتشاش و نامعینی‌های مدل‌سازی است[۳۵]. با توجه به دینامیک غیرخطی ربات‌های صلب، لازم است از رویتگر اغتشاش غیرخطی (NDOB)[۲۴]استفاده شود. در طراحی رویتگر اغتشاش، دینامیک‌های غیرخطی به‌عنوان نامعینی‌های جمع‌شونده در نظر گرفته شده و به همراه نیروهای خارجی در یک بردار اغتشاش فشرده می‌شوند. معادلات دینامیکی

ربات صلب را در نظر بگیرید:

$$\hat{M}(q)\ddot{q} + \hat{N}(q,\dot{q}) = \tau + \tau_d \qquad (۱۳)$$

که در آن q و $\dot{q}$ بردارهای موقعیت و سرعت مفاصل هستند. $\hat{M}$ ماتریس اینرسی نامی و $\hat{N}$ نشان‌دهنده مقدار نامی مجموع نیروهای کوریولیس، سانتریفیوژ و جاذبه است. τ و τ_d به ترتیب گشتاور کنترلی و گشتاورهای خارجی می‌باشند. در رویتگر اغتشاش غیرخطی معمولی، با فرض اندازه‌گیری شتاب مفاصل معادله رویتگر به‌صورت

$$\dot{\hat{\tau}}_d = -L\,\hat{\tau}_d + L\{\hat{M}(q)\ddot{q} + \hat{N}(q,\dot{q}) - \tau\} \qquad (۱۴)$$

نوشته می‌شود که در آن L بهره رویتگر است. با توجه به اینکه در بسیاری موارد امکان اندازه‌گیری شتاب مفاصل وجود نداشته و از سوی دیگر به دلیل وجود نویز محاسبه شتاب از روی سرعت عملی نیست، معادلات فوق قابل‌استفاده نخواهند بود. در این حالت می‌توان از رویتگر پیشرفته استفاده کرد [۳۶]. در این ساختار یک متغیر خارجی برای سیستم تعریف می‌شود که مشتق آن تأثیر شتاب در معادله رویتگر را حذف می‌کند. معادلات این رویتگر به‌صورت زیر قابل بازنویسی است.

$$\dot{z} = -L(q,\dot{q})z + L(q,\dot{q})\{\hat{N}(q,\dot{q}) - \tau - p(q,\dot{q})\} \qquad (۱۵)$$

$$\hat{\tau}_d = z + p(q,\dot{q}) \qquad (۱۶)$$

که در آن

$$\frac{d}{dt}p(q,\dot{q}) = L(q,\dot{q})\hat{M}(q)\ddot{q} \qquad (۱۷)$$

دینامیک خطا در معادله بالا دقیقاً معادل دینامیک خطا در معادله (۱۴) است. در [۳۵] روشی سیستماتیک برای طراحی رویتگر اغتشاش غیرخطی و یافتن مقدار مناسب بهره رویتگر ارایه شده است. نمونه‌هایی از کاربرد این روش در تخمین نیروهای تماسی محیطی در [۴۰] -[۳۷]یافت می‌شود. در [۴۱] و [۴۲] نیز از رویتگر اغتشاش در تخمین نیروهای خارجی در کاربردهای توان‌بخشی استفاده شده است. روش‌های مبتنی بر فیلتر کالمن نیز رویکرد دیگری در تخمین نیروهای تراکنش هستند. نمونه‌های متفاوتی از این رویتگرها برای تخمین نیروی دست بیمار[۴۳]، تخمین نیروی برهم‌کنش زمین در پروتز پا [۴۴] و توان‌بخشی اندامهای بالایی بدن [۴۵] دیده می‌شود.

۳-۲- ابزار منعطف

همان طورکه پیش‌تر گفته شد، یکی از ابزارهای منعطف که بسیار در عملیات جراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد سوزن‌های نوک‌تیز است که به علت منعطف بودن و عدم تقارن نیروهای سر سوزن، با داخل شدن به بدن بیمار خم می‌شوند. هرگونه اطلاعاتی در مورد موقعیت و یا نیروهای تراکنش سوزن با بافت بدن در کنترل آن مؤثر خواهد بود. همانطور که در شکل(۴) نشان داده شده است، این نیروها شامل نیروی برش[۲۵]، نیروی سختی بافت[۲۶] و اصطکاک می‌باشد [۴۶]. نیروی برش در سر سوزن باعث شکافتن بافت و حرکت سوزن داخل آن می‌شود که مقدار آن ثابت است. نیروهای اصطکاک در راستای محور سوزن هستند و نیروی بافت به ویژگی‌های آن بستگی دارد. با توجه به اینکه قرار دادن حسگر نیرو روی سوزن از نظر بالینی عملی نیست امکان اندازه‌گیری مستقیم نیروها وجود ندارد. با این حال، با استفاده از حسگرهای نیرو که در ته سوزن نصب شده و در خارج از بدن بیمار قرار می‌گیرد، می‌توان برآیند کل نیروهای وارد بر سوزن را اندازه‌گیری کرد. روش‌های موجود در تخمین نیروهای سوزن عموماً روش‌های یاد شده در قسمت‌های پیشین است. در این روش‌ها تخمین نیرو با استفاده از داده‌های خمش سوزن و نیروهای اندازه‌گیری شده در ته سوزن انجام می‌شود. در [۴۷] از فیلتر کالمن توسعه‌یافته، در [۴۸] از رویتگر اغتشاش و در [۴۹] ترکیبی از رویتگر اغتشاش و روش تخمین کمترین مربعات بازگشتی[۲۷] در تخمین نیروها استفاده شده است.

شکل ۴: نیروهای تراکنش بافت و سوزن. نیروی برش سر سوزن تاثیر کرده و نیروی اصطکاک در راستای محور سوزن. نیروی بافت نیز به سختی بافت بستگی دارد.

۴-نتیجه‌گیری

در این مقاله دسته‌بندی رویتگرها با توجه به کاربرد آن‌ها در ربات‌های پزشکی و مختصری از جزییات این روش‌ها ارایه شد. این دسته‌بندی با توجه به کاربرد رویتگرها در تخمین موقعیت و نیرو در جراحی‌های قلب، جراحی‌های با سوزن، جراحی‌های از راه دور و عملیات توان‌بخشی انجام شده است. بر این اساس گونه‌های مختلفی از فیلتر کالمن و رویتگر اغتشاش را می‌توان در تخمین نیرو و موقعیت به‌کار گرفت. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از رویتگرها در کم کردن هزینه، وزن، ابعاد تجهیزات و نیز ساده کردن برخی عملیات پزشکی مؤثر خواهد بود. باید توجه داشت که کاربرد رویتگرها به شدت به نوع عملیات مورد استفاده بستگی دارد و تمامی روش‌های یاد شده هنوز امکان استفاده بالینی را ندارند چرا که چالش‌های بسیاری در تضمین عملکرد و ایمنی این روش‌ها وجود دارد. با این حال، ماهیت چند رشته‌ای این موضوع، زمینه گسترده‌ای را برای مطالعه و تحقیق فراهم می‌کند.

۵- مراجع

[1] R. Taylor and D. Stoianovici, "Medical robotics in computer-integrated surgery ",IEEE Transactions on Robotics and Automation ,vol ,19 .no ,5 .pp.2003 ,781 – ,765 .

[2] N .Popescu ,D .Popescu ,M .Ivanescu ,D .Popescu ,C. Vladu ,and I .Vladu" ,Force observer-based control for a rehabilitation hand exoskeleton system ",in9 th Asian Control Conference) ASCC .(IEEE ,2013 ,pp.6–1 .

[3] A .Hagemann ,K .Rohr ,H .S .Stiehl ,U .Spetzger ,and J. M .Gilsbach" ,Biomechanical modeling of the human head for physically based ,nonrigid image registration ",IEEE transactions on medical imaging, vol. 18, no. 10, pp. 875–884, 1999.

[4] M. Hu, G. Penney, M. Figl, P. Edwards, F. Bello, R. Casula, D. Rueckert, and D. Hawkes, "Reconstruction of a 3D surface from video that is robust to missing data and outliers: Application to minimally invasive surgery using stereo and mono endoscopes," Medical image analysis, vol. 16, no. 3, pp. 597–611, 2012.

[5] V. Mani et al., "Survey of medical image registration," Journal of Biomedical Engineering and Technology, vol,1 . no ,2 .pp.2013 ,25–8 .

[6] X .Pennec ,P .Cachier ,and N .Ayache" ,Tracking brain deformations in time sequences of3 D us images ",Pattern Recognition Letters, vol. 24, no. 4, pp..2003 ,813–801

[7] M .A .Audette ,K .Siddiqi ,F .P .Ferrie ,and T .M .Peters, "An integrated range-sensing ,segmentation and registration framework for the characterization of intra-surgical brain deformations in image-guided surgery ",Computer Vision and

ISBI .09‘IEEE ,2009 ,pp.1070–1067 .
[24] M .Uherčík ,H .Liebgott ,J .Kybic ,and C .Cachard” ,Needle localization methods in3 D ultrasound data “,in International congress on ultrasonics, 2009, pp. 11–17.
[25] Y. Zhao, C. Cachard, and H. Liebgott, “Automatic needle detection and tracking in 3D ultrasound using an roi-based ransac and kalman method,” Ultrasonic imaging, vol. 35, no. 4, pp. 283–306, 2013.
[26] Y. Zhao, H. Liebgott, and C. Cachard, “Tracking micro tool in a dynamic 3D ultrasound situation using kalman filter and ransac algorithm,” in 9th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI). IEEE, 2012, pp. 1076–1079.
[27] V. Kallem and N. J. Cowan, “Image guidance of flexible tip-steerable needles,” IEEE Transactions on Robotics, vol. 25, no. 1, pp. 191–196, 2009.
[28] D. C. Rucker, J. Das, H. B. Gilbert, P. J. Swaney, M. I. Miga, N. Sarkar, and R. J. Webster, “Sliding mode control of steerable needles,” IEEE Transactions on Robotics, vol. 29, no. 5, pp. 1289–1299, 2013.
[29] B. Fallahi, C. Rossa, R. Sloboda, N. Usmani, and M. Tavakoli, “Partial estimation of needle tip orientation in generalized coordinates in ultrasound image-guided needle insertion,” in IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2016, pp. 1604–1609.
[30] T. Haidegger, B. Benyó, L. Kovács, and Z. Benyó, “Force sensing and force control for surgical robots,” IFAC Proceedings Volumes, vol. 42, no. 12, pp. 401– 406, 2009.
[31] B. Siciliano and O. Khatib, Springer handbook of robotics. Springer, 2016.
[32] S. A. Kolakowsky-Hayner, J. Crew, S. Moran, and A. Shah, “Safety and feasibility of using the ekso™ bionic exoskeleton to aid ambulation after spinal cord injury,” J Spine, vol. 4, p. 003, 2013.
[33] P. Beyl, K. Knaepen, S. Duerinck, M. Van Damme, B. Vanderborght, R. Meeusen, and D. Lefeber, “Safe and compliant guidance by a powered knee exoskeleton for robot-assisted rehabilitation of gait,” Advanced Robotics, vol. 25, no. 5, pp. 513–535, 2011.
[34] P. Heo, G. M. Gu, S.-j. Lee, K. Rhee, and J. Kim, “Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 13, no. 5, pp. 807–824, 2012.
[35] A. Mohammadi, M. Tavakoli, H. Marquez, and F. Hashemzadeh, “Nonlinear disturbance observer design for robotic manipulators,” Control Engineering Practice, vol. 21, no. 3, pp. 253–267, 2013.
[36] W.-H. Chen, D. J. Ballance, P. J. Gawthrop, and J .O‘Reilly, ”A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators“, IEEE Transactions on industrial Electronics ,vol ,47 .no,4 . pp.2000 ,938–932 .
[37] H .Li ,K .Kawashima ,K .Tadano ,S .Ganguly ,and S. Nakano” ,Achieving haptic perception in forceps ‘manipulator using pneumatic artificial muscle “,IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol ,18 .no ,1 .pp.2013 ,85–74 .
[38] W .Liang ,S .Huang ,S .Chen ,and K .K .Tan” ,Force estimation and failure detection based on disturbance observer for an ear surgical device “,ISA transactions, vol. ,66pp.2017 ,484–476 .
[39] S .Emre and O .Kouhei” ,On the explicit robust force control via disturbance observer “,IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 3, pp.1581–1589, 2015.
[40] H. Amini, S. Rezaei, M. Zareinejad, and H. Ghafarirad, ”Enhanced time delayed linear bilateral teleoperation system by external force estimation “,Transactions of the Institute of Measurement and Control ,vol ,35 .no ,5 .pp.2013 ,647–637 .
[41] S .Mohammed ,W .Huo ,J .Huang ,H .Rifaï ,and Y. Amirat” ,Nonlinear disturbance observer-based sliding mode control of a human-driven knee joint orthosis “,Robotics and Autonomous Systems, vol. 75, pp.2016 ,49–41 .
[42] B .Ugurlu ,M .Nishimura ,K .Hyodo ,M .Kawanishi, Image Understanding, vol ,89 .no ,2 .pp.2003 ,251–226 .
[8] M .M .J .Letteboer ,P .W .Willems ,M .A .Viergever, and W .J .Niessen” ,Brain shift estimation in imageguided neurosurgery using-3 d ultrasound “,IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 52, no ,2 .pp.2005 ,276–268 .
[9] S .Vijayan ,S .Klein ,E .F .Hofstad ,F .Lindseth ,B .Ystgaard, and T .Langø” ,Motion tracking in the liver :Validation of a method based on4 d ultrasound using a nonrigid registration technique “,Medical physics, vol. 41, no. 8, 2014.
[10] L. Maier-Hein, P. Mountney, A. Bartoli, H. Elhawary, D. Elson, A. Groch, A. Kolb, M. Rodrigues, J. Sorger, S. Speidel et al., “Optical techniques for 3D surface reconstruction in computer-assisted laparoscopic surgery,” Medical image analysis, vol. 17, no. 8, pp. 974–996, 2013.
[11] G. L. Reed III, D. E. Singer, E. H. Picard, and R. W. DeSanctis” ,Stroke following coronary-artery bypass surgery “,New England Journal of Medicine, vol. 319, no,19 . pp.1988 ,1250–1246 .
[12] T .Ortmaier ,M .Groger ,D .H .Boehm ,V .Falk ,and G. Hirzinger” ,Motion estimation in beating heart surgery “,IEEE Transactions on Biomedical Engineering ,vol ,52 .no ,10 .pp. .2005 ,1740–1729
[13] A .Trejos ,S .Salcudean ,F .Sassani ,and S .Lichtenstein, ”On the feasibility of a moving support for surgery on the beating heart “,in Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention –MICCAI99‘. Springer, 1999, pp. 1088–1097
[14] M. Sauvée, A. Noce, P. Poignet, J. Triboulet, and E. Dombre” ,Three-dimensional heart motion estimation using endoscopic monocular vision system :From artificial landmarks to texture analysis “,Biomedical Signal Processing and Control ,vol ,2 .no ,3 .pp.2007 ,207–199 .
[15] R .Richa ,P .Poignet ,and C .Liu” ,Threedimensional motion tracking for beating heart surgery using a thin-plate spline deformable model “,The International Journal of Robotics Research, vol ,29 .no ,2-3 .pp.2010 ,230–218 .
[16] B .Yang ,W-.K .Wong ,C .Liu ,and P .Poignet3” ,D soft-tissue tracking using spatial-color joint probability distribution and thin-plate spline model “,Patternrecognition ,vol ,47 .no. ,9pp.2014 ,2973–2962 .
[17] A .Thakral ,J .Wallace ,D .Tomlin ,N .Seth ,and N .Thakor, ”Surgical motion adaptive robotic tech nology) smart :(Taking the motion out of physiological motion “,in Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI .2001Springer ,2001 ,pp.325–317 .
[18] S .G .Yuen ,P .M .Novotny ,and R .D .Howe” ,Quasiperiodic predictive filtering for robot-assisted beating heart surgery “,in IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, 2008, pp.3880–3875 .
[19] M .Bowthorpe and M .Tavakoli” ,Physiological organ motion prediction and compensation based on multirate ,delayed, and unregistered measurements in robot-assisted surgery and therapy “,IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 21, no. 2, pp..2016 ,911–900
[20] B .Yang ,C .Liu ,W .Zheng ,and S .Liu” ,Motion prediction via online instantaneous frequency estimation for vision-based beating heart tracking “,Information Fusion, vol. 35, pp. 58–67, 2017.
[21] C. Rossa and M. Tavakoli, “Issues in closed-loop needle steering “,Control Engineering Practice, vol. 62, pp,69–55 . .2017
[22] J-.S .Hong ,T .Dohi ,M .Hasizume ,K .Konishi ,and N .Hata, ”A motion adaptable needle placement instrument based on tumor specific ultrasonic image segmentation “,Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI, pp. 122–.2002 ,129
[23] M .Aboofazeli ,P .Abolmaesumi ,P .Mousavi ,and G. Fichtinger” ,A new scheme for curved needle segmentation in three-dimensional ultrasound images “,in IEEE International Symposium on Biomedical Imaging :From Nano to Macro,

and T .Narikiyo" ,Proof of concept for robotaided upper limb rehabilitation using disturbance observers ",IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 45, no. 1, pp. 110–118, 2015.
[43] C .Mitsantisuk and K .Ohishi" ,Robotics-assisted rehabilitation therapy for the hands and wrists using force sensorless bilateral control with shadow and mirror mode ",in IEEE International Conference on Mechatronics) ICM .(IEEE, ,2015pp.546–541 .
[44] S .A .Fakoorian ,V .Azimi ,M .Moosavi ,H .Richter ,and D. Simon" ,Ground reaction force estimation in prosthetic legs with nonlinear kalman filtering methods ",Journal of Dynamic Systems ,Measurement ,and Control, 2017.
[45] A .U .Pehlivan ,D .P .Losey ,and M .K .O'Malley, "Minimal assist-as-needed controller for upper limb robotic rehabilitation ",IEEE Transactions on Robotics, vol. 32, no. 1, pp. 113–124, 2016.
[46] A. M. Okamura, C. Simone, and M. D. O'leary, "Force modeling for needle insertion into soft tissue," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 51, no. 10, pp. 1707–1716, 2004.
[47] A. Asadian, M. R. Kermani, and R. V. Patel, "A novel force modeling scheme for needle insertion using multiple kalman filters," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 61, no. 2, pp. 429–438, 2012.
[48] A. Maghsoudi and M. Jahed, "A comparison between disturbance observer-based and model-based control of needle in percutaneous applications," in 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON. IEEE, 2012, pp. 2104– 2108.
[49] Y. Fukushima and K. Naemura, "Estimation of the friction force during the needle insertion using the disturbance observer and the recursive least square," ROBOMECH Journal, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2014.

پی‌نوشت‌ها

1Computer-aided design/manufacturing (CAD/CAM) systems
2 Surgical assistants
3 Radiotherapy
4 Minimal invasive surgery
5 Tele-surgery
6 Master
7 Slave
8 Rehabilitation
9 Real-time
10 Observer
11 Observability conditions
12 Exoskeleton
13 Point of interest
14 Rigid image registration
15 Non-rigid image registration
16 Heart-lung machine
17 Quasi-periodic
18 Extended Kalman filter
19 Random walk
20 Beveled-tip
21 Motion planning
22 Flexible
23 Disturbance observer
24 Nonlinear disturbance observer
25 Cutting force
26 Stiffness
27 Recursive least squares

***

رساله دکتری مهندسی برق - مخابرات سیستم

تحلیل تئوری اطلاعاتی آشکارسازی و تخمین در شبکه بی‌سیم از حسگرها

سعید حکیمی
استاد راهنما: دکتر قوشه عابد هدتنی
دانشگاه فردوسی مشهد

در این رساله بعد از مرور مبانی ریاضی و تئوری اطلاعاتی آشکارسازی و تخمین و همچنین تحقیقات پیشین مربوطه اقدامات زیر انجام گردید:

- برای تخمین ناهم‌مکان سیگنال در محیط‌های غیرگوسی یک الگوریتم وفقی بر مبنای کورانتروپی طراحی کردیم که شامل استراتژی‌های پخش‌شدگی تطبیق- ترکیب و ترکیب- تطبیق است.

- برای کانال‌های غیرگوسی، با بکارگیری کرنل گوسی تعمیم‌یافته در معیار کورانتروپی، آشکارساز زیربهینه‌ی ساده و کارآمدی ارایه دادیم که نسبت به دیگر آشکارسازها عملکرد بهتر و در عین حال عمومیت بیشتری دارد.

- از آنجایی که تعیین نوع مدولاسیون سیگنال یکی از مسایل اساسی در مخابرات شبکه‌های حسگر بی‌سیم است، آشکارسازی بهینه شده نوع مدولاسیون دریافتی توسط شبکه را با استفاده از مفاهیم یادگیری تئوری اطلاعاتی توسعه دادیم.

- مدل‌سازی ریاضی مساله بهینه‌سازی توان با توجه به قیود موجود در شبکه حسگر بی‌سیم، به‌عنوان گامی کلیدی و ضروری در مساله مدیریت توان، بررسی و چند تابع هدف مناسب با فرم بسته ارایه گردید. مسایل بهینه‌سازی با توابع هدف بدست آمده در شرایط مختلف کانال مخابراتی تحلیل و نتایج با حالت تخصیص توان یکنواخت مقایسه شدند.

همچنین، راهکارهای ارایه شده را در شرایط مختلف از نظر نویز، نوع مدولاسیون، تعداد حسگرها و... تحلیل عددی و نتایج حاصل را با کارهای پیشین مقایسه کردیم که به خوبی کارایی روش‌های پیشنهادی را تایید می‌نماید.

کلمات کلیدی:
آشکارسازی ناهم مکان، تخمین ناهمکان، دیورژانس تئوری اطلاعاتی، شبکه حسگرهای بی سیم، کانال غیرگوسی، معیار کورانتروپی

***

رساله دکتری مهندسی برق -کنترل

توسعه و تحلیل پایداری رده های خاص سیستم‌های توصیف شده با معادلات دیفرانسیل فازی

داود ناصح
استاتید راهنما: دکتر ناصر پریز- دکتر علی وحیدیان کامیاد
دانشگاه فردوسی مشهد

در این رساله روش‌های کیفی تحلیل پایداری از جمله پایداری عملیاتی (برحسب دو معیار) برای سیستم‌های توصیف شده با معادلات دیفرانسیل فازی ارایه می‌گردند. همچنین، نتایج حاصل به دستگاه معادلات دیفرانسیل فازی در N بعد تعمیم می‌یابند. بدین منظور، ابتدا فضای حالت فازی N بعدی، متر تعمیم یافته در این فضای متریک و توابع شبه لیاپانوف‌برداری را تعریف می‌کنیم، سپس قضایای مقایسه جدیدی با معرفی مفهوم غیرنزولی شبه یکنوا از بالا خواهیم یافت که منجر به دو رویکرد مختلف برای تعمیم به حالت N بعدی می‌گردد. همچنین، روش‌هایی برای کاهش ابعاد معادلات لازم برای بررسی پایداری سیستم‌های N بعدی معرفی می‌گردند. سپس به ارایه و اثبات برخی قضایای پایداری مربوط به رده‌هایی از سیستم‌های دینامیکی توصیف شده با سیستم دیفرانسیل فازی (از جمله سیستم دیفرانسیل فازی ضربه‌ای، سیستم دیفرانسیل فازی هایبرید و ترکیب آن‌ها یعنی سیستم دیفرانسیل فازی هایبرید ضربه‌ای) می‌پردازیم. افزودن ضربه (جهش در حالت‌ها) موجب تطابق بیشتر بین مساله اصلی و مدل‌سازی شده خواهد شد و در پایداری سیستم نیز تاثیر خواهد داشت. همچنین قضایای پایداری سیستم‌های بالا را به N بعد تعمیم خواهیم داد. در نهایت، تاخیر در حالت‌ها را نیز به تمامی سیستم‌های فوق خواهیم افزود و سپس قضایای تعمیم یافته‌تری را برای سیستم‌های تاخیری به اثبات خواهیم رساند.

کلمات کلیدی:
پایداری، تابع شبه لیاپانوف، غیرنزولی شبه یکنوا، سیستم دیفرانسیل فازی ضربه ای، سیستم دیفرانسیل فازی هایبرید، سیستم دیفرانسیل فازی هایبرید ضربه ای، تاخیر زمانی

***

رساله دکتری مهندسی برق - الکترونیک

پیاده‌سازی سخت‌افزاری پردازنده فازی با استفاده از تکنولوژی هیبرید CMOS/Nano

مهدی ترخان
استاد راهنما: دکتر محمد میمندی‌نژاد
دانشگاه فردوسی مشهد

منطق فازی یکی از روش‌های محاسبات نرم است که کاربردهای فراوانی در علوم و فنون مختلف داشته است. برای پیاده‌سازی عملی سیستم‌های فازی، دو روش عمده که عبارت‌اند از: پیاده‌سازی در قالب یک نرم‌افزار برای اجرا توسط یک پردازنده همه‌منظوره و ساخت مدارهای مجتمع اختصاصی آنالوگ و دیجیتال وجود دارد. مدارهای دیجیتال از ساختارهای آنالوگ از نظر قابلیت برنامه‌ریزی و پیکره‌بندی دوباره عملکرد بهتری دارند. بااین‌حال، خود منطق فازی، منطقی آنالوگ بوده و توسط مدارهای آنالوگ به‌راحتی قابل پیاده‌سازی است. قدرت سخت‌افزارهای دیجیتال در حافظه آن‌ها است که می‌تواند توابع عضویت با اشکال دلخواه و همچنین قوانین را با ترکیب‌های متفاوت در خود ذخیره کند. با توجه به کاهش ابعاد ترانزیستورها و مشکلاتی که در سر راه ساخت این قطعات به‌ویژه حافظه‌های فلش قرار دارد، روش‌های نوینی برای پیشبرد این فناوری (حافظه‌ها) پیشنهاد شده‌اند. در این میان حافظه‌های مقاومتی که در آن‌ها از مواد سوییچ‌کننده مقاومتی (ممریستورها) برای ذخیره اطلاعات می‌شود، به‌عنوان یک کاندید بسیار قدرتمند در این عرصه خودنمایی می‌کنند.

در این رساله یک پردازنده فازی قابل برنامه‌ریزی (هم در بخش پایگاه قواعد و هم در بخش فازی‌ساز) توسط مدارهای سیگنال مخلوط که قابلیت پیاده‌سازی توسط تکنولوژی هیبرید CMOS/Nano را دارد پیشنهاد شده است. توابع عضویت در این پردازنده در آرایه کراس‌بار[1] ممریستوری ذخیره می‌شوند. در طراحی پایگاه قواعد از حافظه دیجیتال استفاده شده است. طراحی پیشنهادی اجازه تعریف قوانین فازی با هر ترکیب دلخواه از ورودی‌ها را در اختیار قرار می‌دهد. از طرف دیگر تابع عضویت در سطرهای کراس‌بار ذخیره شده و می‌توان شکل آن‌ها را به‌دلخواه تعریف نمود. همچنین توابع عضویت مجاور هم می‌توانند تا هر درجه‌ای که لازم باشد باهم همپوشانی داشته باشند. درنتیجه یک بخش فازی‌ساز بسیار قدرتمند و قابل انعطاف تشکیل خواهد شد.

یک پردازنده با ۹ قانون، دو ورودی و یک خروجی طراحی و با استفاده از تکنولوژی 350nm مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته است که دارای ویژگی‌هایی به شرح: سرعت عملکرد 10MFLIPS، مصرف توان 3.49mW در ولتاژ تغذیه 3.3 ولت، رزولوشن خروجی معادل ۶ بیت و مساحت اشغال شده معادل $0.614mm^2$ است.

در بخش دیگری از رساله، برای برنامه‌ریزی ممریستورها، مداری جدید ارایه شده است که بجای مقاومت ممریستور، حالت آن را در مقدار مطلوبی که توسط یک سیگنال کنترلی تعیین می‌شود برنامه‌ریزی می‌کند. به این شیوه امکان تنظیم مقاومت ممریستور

1Crossbar

ادامه در صفحه ۳۸

رساله دکتری مهندسی برق - قدرت

پایشگری و ارزیابی امنیت سیستم قدرت بر پایه شناسایی ناحیه ایمن به کمک متغیرهای توصیفگر موثر

سیدداود سیدجوان
استاد راهنما: دکتر حبیب رجبی مشهدی
دانشگاه فردوسی مشهد

امروزه به دلیل افزایش اهمیت انرژی الکتریکی در زندگی بشر و نقشی که صنعت برق در اقتصاد و امنیت ملی عهده‌دار است، مطالعات مربوط به امنیت سیستم قدرت نسبت به گذشته مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. به‌طوری‌که، مهمترین هدف در بهره‌برداری سیستم قدرت تامین توان کافی و بدون قطعی برای مشترکان شبکه می‌باشد. در این راستا، افزایش تقاضا و وابستگی مصرف‌کنندگان به انرژی و همچنین بهره‌برداری سیستم قدرت در نزدیکی بیشترین ظرفیت مجاز به‌دلیل قوانین اقتصادی حاکم بر شبکه، برخی از سیستم‌ها را در دهه‌های اخیر با خاموشی‌های گسترده مواجهه نموده است. از طرف دیگر، کلیه مبادلات اقتصادی در سیستم قدرت تنها بر پایه یک زیرساخت ایمن از رفتار سیستم قابل انجام می‌باشد. بنابراین، در این شرایط و همچنین به‌دلیل گستردگی شبکه قدرت، پیچیدگی‌های ارزیابی امنیت سیستم قدرت افزایش یافته است، به‌گونه‌ای که ابزارها و روش‌های مرسوم پاسخگوی نیازهای بهره‌بردار سیستم قدرت در بهره‌برداری ایمن از سیستم قدرت نخواهند بود.
در این محیط، به‌دلیل وجود اطلاعات زیاد و نهفته در بهره‌برداری سیستم قدرت، افزایش عمق شناخت بهره‌بردار از عملکرد شبکه یک ضرورت به‌نظر می‌رسد. در این رساله، با دستیابی به متغیرهای قابل پایش سیستم قدرت که حاوی اطلاعات بالایی از فضای امنیت سیستم قدرت می‌باشند، می‌توان جهت افزایش عمق شناخت بهره‌بردار از فضای بهره‌برداری سیستم قدرت اقدام نمود. در این حالت، بهره‌بردار سیستم قدرت با پایشگری صرفا تعداد محدودی از این متغیرها، که متغیرهای توصیفگر موثر سیستم قدرت نامیده می‌شوند می‌تواند شبکه را در ناحیه ایمن مورد بهره‌برداری قرار دهد. در این راستا، با استفاده و استخراج موثر از اطلاعات سیستم قدرت به‌کمک روش‌های داده‌کاوی بر پایه شاخص‌های آنتروپی متقابل، متوسط ضریب همبستگی و شاخص شناسایی مرز امنیت سیستم قدرت، میزان اطلاعات نهفته در متغیرهای قابل پایش سیستم قدرت مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در این رساله، با در معرض تنش قرار دادن سیستم قدرت به‌واسطه بارهای شبکه و بدست آوردن توان تولیدی بهینه واحدها با استفاده از پخش بار بهینه، ناحیه امنیت سیستم قدرت در فضایی پارامتری که بیانگر حاشیه بارپذیری شبکه است بدست می‌آید. از معیارهای امنیتی در نظر گرفته شده در این مطالعه، معیار پایداری ولتاژ، قید بیشینه توان تولید و حد بارگذاری خطوط و ترانسفورماتور می‌باشد. ناحیه امنیت بدست آمده در این فضا، اشتراک هر سه ناحیه امنیت متناظر با هر معیار مورد مطالعه است. با حفظ ماهیت نقاط کار سیستم قدرت و نگاشت فضای امنیت شبکه به فضای بهره‌برداری، می‌توان ناحیه امنیت را به‌ازای تمامی متغیرهای قابل پایش در سیستم قدرت درنظر گرفت و با تجزیه و تحلیل اطلاعات نهفته در هر متغیر نسبت به فضای بهره‌برداری ایمن و ناایمن شبکه، ناحیه امنیت را در فضایی با محتوای اطلاعات بالا و با تعداد محدودی از متغیرهای توصیفگر موثر بازسازی نمود. از طرف دیگر، با توجه به اینکه در نظر گرفتن توزیع یکسان تغییرات بار در تمامی فضاهای پارامتری امنیت سیستم قدرت رویکردی محافظه‌کارانه و غیر واقع‌بینانه می‌باشد، در این رساله، با مدل‌سازی همبستگی بین بارها به کمک نظریه مفصل، ناحیه امنیت سیستم قدرت ترسیم می‌گردد و متغیرهای توصیفگر شبکه در این حالت نیز بدست می‌آید. همچنین، مرز امنیت سیستم قدرت به کمک توابع شعاعی پیشنهادی و با استفاده از متغیرهای توصیفگر ناحیه ایمن قابل دستیابی است. با دستیابی به مرز امنیت سیستم قدرت به کمک متغیرهای توصیفگر، بهره‌بردار شبکه همواره قابلیت ردیابی نقطه‌کار در ناحیه امنیت شبکه را خواهد داشت. همچنین در این رساله تاثیر وقوع حوادث ناگهانی و پیش‌آمدهای شبکه برروی فضای امنیت سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، با در نظرگرفتن نامعادله‌هایی از متغیرهای توصیفگر موثر ناحیه ایمن، می‌توان سیستم قدرت را حتی به‌ازای وقوع چنین حوادثی به‌صورت ایمن بهره‌برداری نمود و از روش‌های پیشنهادی در جهت کنترل پیشگیرانه شبکه نیز بهره جست. در این رساله، روش‌های پیشنهادی برروی سیستم‌های قدرت استاندارد ۹ و ۱۱۸ باس IEEE مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی:
قیمت گذاری بلک شولز،تعادل توأمان بازار، قیمت گذاری انرژی قیمت گذاری اختیار

***

ادامه از صفحه ۳۷

در هر مقدار دلخواه وجود دارد. در مدار پیشنهادی از تکنیک پل وتستون[2] برای اندازه‌گیری مقاومت ممریستور در حین برنامه‌ریزی آن استفاده شده است. ممریستور در این مدار، نقش پتانسیومتر را در پل بازی کرده و آن‌قدر مقاومتش با عبور دادن جریان برنامه‌ریزی تغییر می‌کند تا پل به تعادل برسد. در این حالت، رابطه‌ای خطی بین مقاومت ممریستور و دیگر مقاومت‌های درون پل وجود خواهد داشت. در مدار پیشنهادی، دنبال نمودن تغییرات مقاومت ممریستور و برنامه‌ریزی آن هم‌زمان انجام می‌شود. از طرف دیگر به دلیل اندازه‌گیری تفاضلی که در پل انجام می‌شود، این مدار از دقت بالایی نیز برخوردار است. مدار پیشنهادی با تکنولوژی 350nm شبیه‌سازی شده است و دقت ۶ بیتی برای برنامه‌ریزی را از خود نشان می‌دهد. طرح‌واره layout مدار رسم شده و مساحتی معادل $0.0273mm^2$ از فضای چیپ را اشغال می‌کند که می‌تواند برای کاربردهای درون چیپ مناسب باشد.

کلمات کلیدی:
ممریستور، پردازنده فازی، برنامه ریزی ممریستور، کراس بار ممریستوری

***

[2]Wheatstone bridge

آنالیز فنی و اقتصادی سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه با استفاده از نرم‌افزار PVsyst و مطالعه موردی بر روی یک نمونه ۵ کیلوواتی منصوبه

مهدی جمالی/ گروه مهندسی برق /دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس/ mjamalieng@iran.ir

علی توفیقی/ گروه مهندسی برق / دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس/ Tofighi@pardisiau.ac.ir

چکیده

سیســتم‌های خورشیدی که تاکنون در ایران ساخته شــده است به‌طور معمول راندمان مورد انتظار را برآورده نمی‌کند. نداشتن بهره‌وری مناســب در نیروگاه‌های خورشــیدی بیشتر به‌دلیل طراحی نامناسب و اســتفاده نکردن از نرم‌افزارهای موجود در این حوزه است. در این پژوهش یک سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه با ظرفیت ۵ کیلووات واقع در شرکت توزیع نیروی برق تهران (منطقه برق تهرانپارس) از نظر فنی و اقتصادی مورد بررســی قرار گرفته و پارامترهای تأثیرگذار بر میزان تولید نیروگاه مطالعه و راهکارهای عملی جهت افزایش راندمان نیروگاه ارایه شــده اســت. جهت شبیه‌سازی، طراحی و آنالیز فنی نیروگاه از نرم‌فزار PVsyst استفاده شده است. اطلاعات سایت خورشیدی منصوبه نیز از سیستم مانیتورینگ نیروگاه استخراج شده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده و مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: انرژی خورشیدی، فتوولتاییک، بررسی فنی اقتصادی، PVsyst

Technical and Economic Analysis of grid-connected PVsystem Using the Software and a Case Study on a Sample of 5KW Installed

Mahdi Jamali/ Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Pardis Branch/ mjamalieng@iran.ir

Ali Tofighi/ Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Pardis Branch/ Tofighi@pardisiau.ac.ir

Abstract

Solar systems that have been built so far in Iran usually do not meet the expected efficiency. Lack of proper efficiency of solar power plants is mainly due to poor design and non-use of softwares available in this field. In this research, a 5KW grid-connected photovoltaic system located in Tehran Power Distribution Company (TehranPars Electricity Distribution Company) has been investigated technically and economically and has been influenced by factors affecting the amount of power plant production and practical solutions for increasing the plant's efficiency. To simulation, design and technical analysis of PV power plant PVsyst software is used.

Keywords: Photovoltaic, Solar energy, PVsyst, Economic and technical study

۱-مقدمه

کاهش قیمت جهانی تجهیزات نیروگاه خورشیدی به‌خصوص پنل خورشیدی، حمایت‌های تشویقی دولت در قالب خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های خورشیدی با قیمت‌های بسیار جذاب و پتانسیل قابل ملاحظه انرژی خورشیدی در بیشتر مناطق ایران، بستر لازم را برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی در سطح کشور فراهم نموده است. اقبال کشورهای اروپایی از این صنعت علیرغم پتانسیل کم آن‌ها از نظر شدت تابش خورشیدی و تعداد روز آفتابی در مقایسه با ایران، موضوع قابل تأملی است[۱].

حکمت و کلانتر [۲] به بررسی فنی و اقتصادی استفاده از برق فتوولتاییک در شهر بافق با استفاده از نرم‌افزار RETScreen پرداخته‌اند. این پروژه با عمر ۲۵ سال دارای قابلیت سوددهی مالی ۱۸/۸ درصد می‌باشد و با توجه به عمر پروژه در شهر بافق kWh/m^2 ۵/۳۴ در سال این پروژه مقرون به صرفه بوده به طوری که بعد از ۹/۵ سال هزینه کل پروژه بر می‌گردد.

رحمانی‌فر [۳] به بررسی فنی و اقتصادی استفاده از برق فتوولتاییک در صنایع نفتی با استفاده از نرم افزار RETScreen پرداخته و انتشار آلاینده‌های آن را نیز مورد بررسی قرار داده است.

فقیه خراسانی و ایروانی [۴] به تجزیه و تحلیل یک نیروگاه فتوولتاییک در دانشگاه یزد از دو دیدگاه دولت و دانشگاه پرداخته‌اند. از نتایج این پروژه می‌توان به کاهش انتشار گاز کربن دی اکسید به میزان ۸/۱۸ تن در سال و دوره بازگشت ۹/۴ سال از دیدگاه دولت و ۱۶/۶ سال از دیدگاه دانشگاه اشاره نمود.

لانگ و همکارانش [۵] یک تحلیل فنی، اقتصادی از یک سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه که بر روی سقف یکی از صنایع در ایالت Goias کشور برزیل نصب شده، ارایه می‌دهد. در این تحقیق شاخص‌های امکان‌سنجی اقتصادی در طول عمر مفید پروژه به‌منظور آگاهی بخشی به سرمایه‌گذاران این حوزه محاسبه و ارایه شده است.

رودریگس و همکارانش [۶] یک آنالیز فنی- اقتصادی جهت بررسی پتانسیل خودتأمینی برای ۴ ساختمان مختلف (مسکونی، تجاری و هر کدام در دو ابعاد بزرگ و کوچک) در کشورهای آلمان، سوئیس و اتریش انجام داده‌اند. نشان داده شده است که حتی در غیاب قوانین حمایتی استفاده از نیروگاه‌های سقفی PV برای بسیاری از ساختمان‌ها در اروپای مرکزی می‌تواند جذاب و مقرون به صرفه باشد.

هدف این تحقیق بررسی فنی و اقتصادی یک سیستم خورشیدی متصل به شبکه و بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر میزان تولید نیروگاه و ارایه راهکارهای عملی جهت افزایش راندمان نیروگاه و مقایسه آن با مقادیر واقعی بدست آمده از یک سیستم خورشیدی منصوبه است. در این تحقیق ابتدا با استفاده از نرم‌افزار PVsyst یک نیروگاه خورشیدی با مشخصات سایت منصوبه در ساختمان شرکت توزیع نیروی برق تهران (امور برق تهرانپارس) شبیه‌سازی شده است. در بخش بعدی نیروگاه خورشیدی مورد نظر از منظر اقتصادی و با توجه به شرایط و قوانین جاری در سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی و همچنین مفاد قرارداد خرید تضمینی برق مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیروگاه با نتایج واقعی بدست آمده از سیستم مانیتورینگ نصب شده در سایت مقایسه شده و دلایل وجود اختلاف بین آن‌ها به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- انرژی خورشیدی موجود

انرژی خورشیدی، تلفیقی از قدرت تابش خورشید و تعداد ساعات قابل دریافت آن در محل مورد نظر می‌باشد. اندازه این پارامتر متغیر بوده و به موقعیت مکانی، محل و زمان مورد نظر بستگی دارد. این پارامتر مرکب که ساعت‌های تابش نور خورشید و شدت آن را شامل می‌شود، آفتابگیری یا شدت تابش خورشید نامیده شده و بر حسب وات بر متر مربع (w/m^2) بیان می‌شود. واحد معمول‌تر و عملی‌تری به‌صورت کیلووات ساعت بر مترمربع در روز ($day/kWh/m^2$) نیز مورد استفاده واقع می‌شود.

اطلاعات جامع و کاملی از میزان شدت تابش نور خورشید در نواحی مختلف جهان را می‌توان از مرجع [۷] دریافت نمود. جدول(۱) اطلاعات شدت تابش نور خورشید برای شهر تهران را نشان می‌دهد. این ارقام نشان می‌دهند که به‌طور میانگین و در روزهای مختلف هر ماه، حدوداً به چند ساعت از تابش وسط روز خورشید دسترسی داریم.

نرم‌افزارهای بسیاری به منظور ارزیابی و تحلیل سیستم‌های خورشیدی عرضه شده‌اند. هر یک از این نرم‌افزارها نقاط ضعف و قوتی دارند که باعث می‌شود تا جهت تحلیل سیستم‌های خورشیدی از جنبه‌های مختلف، ناچار به استفاده از نرم‌افزارهای گوناگون باشیم. در این مقاله جهت انجام آنالیز سایه‌اندازی نیروگاه خورشیدی از نرم افزارهای Google SketchUp استفاده شده است.

۳- شبیه‌سازی نیروگاه

به‌منظور طراحی، شبیه‌سازی و آنالیز پارامترهای نیروگاه خورشیدی از نرم افزار PVsyst نسخه ۶/۴۳ استفاده شده است.

درآمد یک نیروگاه خورشیدی، حاصل از فروش برق به شبکه و در قالب قرارداد خرید تضمینی است. طبق قرارداد خرید تضمینی، قیمت هر کیلووات ساعت برق در ابتدای هر سال توسط ساتبا تعیین می‌گردد. نرخ‌ها به نحوی تنظیم شده‌اند که با افزایش ظرفیت نیروگاه، مقدار آن کاهش می‌یابد. تعرفه‌های خرید تضمینی در سال ۹۶ در مرجع [۸] قابل مشاهده می‌باشد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار PVsyst مطابق با متن قرارداد خرید تضمینی، نرخ خرید تضمینی در ۱۰ سال دوم در عدد ۰/۷ ضرب می‌شود.

جدول ۱: نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیروگاه با نرم‌افزار PVsyst

	GlobHor kWh/m²	T Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh
January	81.3	2.35	123.4	116.4	589.6	561.8
February	97.7	5.52	132.9	125.7	619.6	589.4
March	141.3	11.31	169.6	160.1	769.7	732.7
April	173.2	15.91	183.5	172.8	805.4	765.7
May	208.2	21.54	201.1	189.1	861.1	818.3
June	222.8	26.59	204.3	191.8	853.9	811.6
July	221.3	29.51	208.4	195.9	860.0	818.0
August	208.7	28.99	214.2	201.8	879.3	837.2
September	173.3	24.32	200.4	189.1	843.1	803.1
October	130.6	18.56	174.0	164.7	756.6	720.1
November	91.8	9.94	137.0	129.5	629.5	599.6
December	74.5	4.34	117.9	111.5	560.1	532.8
Year	1824.7	16.64	2066.8	1948.3	9027.9	8590.3

پارامترهای جدول فوق به ترتیب عبارتنداز:

Months: ماه‌های سال

GlobHor: تابش افقی ماهیانه

T Amb: دمای هوا (°C)

جدول ۲: مقدار تولید در ساعات روز برای ماه‌های مختلف سال در نقطه مورد نظر

	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
January	0	0	0	0	0	0	0	0	1.04	1.88	2.42	2.7	2.77	2.8	2.35	1.66	0.55	0	0	0	0	0	0	0
February	0	0	0	0	0	0	0	0.37	1.4	2.18	2.8	2.99	2.98	3.01	2.51	1.91	0.97	0.01	0	0	0	0	0	0
March	0	0	0	0	0	0	0.02	0.8	1.74	2.55	3.11	3.26	3.16	2.97	2.63	2.02	1.2	0.26	0	0	0	0	0	0
April	0	0	0	0	0	0	0.31	1.17	2.03	2.69	3.1	3.1	3.33	3.21	2.8	2.14	1.33	0.42	0	0	0	0	0	0
May	0	0	0	0	0	0.04	0.52	1.44	2.29	2.89	3.33	3.28	3.18	3.05	2.64	1.98	1.31	0.49	0.05	0	0	0	0	0
June	0	0	0	0	0	0.07	0.48	1.45	2.27	2.89	3.24	3.28	3.28	3.11	2.72	2.21	1.47	0.57	0.09	0	0	0	0	0
July	0	0	0	0	0	0.04	0.4	1.21	2.04	2.73	3.14	3.2	3.29	3.16	2.81	2.22	1.52	0.62	0.09	0	0	0	0	0
August	0	0	0	0	0	0	0.36	1.24	2.15	2.83	3.25	3.42	3.45	3.26	2.83	2.25	1.48	0.56	0.03	0	0	0	0	0
September	0	0	0	0	0	0	0.3	1.34	2.29	3.03	3.47	3.51	3.39	3.17	2.77	2.15	1.24	0.23	0	0	0	0	0	0
October	0	0	0	0	0	0	0.01	1.01	2.05	2.73	3.19	3.31	3.25	2.93	2.45	1.66	0.71	0	0	0	0	0	0	0
November	0	0	0	0	0	0	0	0.8	1.8	2.48	2.82	2.89	2.91	2.64	2.2	1.33	0.19	0	0	0	0	0	0	0
December	0	0	0	0	0	0	0	0.04	1.12	2.05	2.52	2.61	2.64	2.75	2.21	1.28	0.03	0	0	0	0	0	0	0
Year	0	0	0	0	0	0.01	0.2	0.91	1.85	2.58	3.03	3.13	3.14	3	2.58	1.9	1	0.27	0.02	0	0	0	0	0

GlobInc: میزان تابش ماهیانه بر سطح شیبدار

GlobEff: تابش مؤثر

EArray: انرژی مؤثر در خروجی آرایه

E_Grid: انرژی تزریق شده به شبکه

همچنین مقادیر تولید نیروگاه در ضرایبی با عنوان ضرایب مدیریت شبکه ضرب می‌شود. این ضرایب در طول ساعات مختلف شبانه روز و در طی روزهای مختلف سال متغیر بوده و مقادیر آن از سایت مدیریت شبکه قابل دسترسی است[۹]. با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار PVsyst مقدار تولید انرژی نیروگاه ۵ کیلوواتی در نقطه مورد نظر بدست آمده که مقادیر آن به تفکیک ماه‌های مختلف سال در جدول(۲) درج شده است.

با توجه به اینکه نرم‌افزار قابلیت تفکیک تولید را به‌صورت روزانه ندارد، بنابراین مقدار تولید در روزهای مختلف یک ماه را مشابه و برابر در نظر می‌گیریم. مقدار تولید در ماه‌های سال به صورت ساعتی به صورت جدول (۲) است.

با مراجعه به وب سایت مدیریت شبکه [۹] و اخذ ضرایب مربوط به تولید در ساعات مختلف یک روز و ضرب آن در عدد تولید، مقدار تولید تعدیل شده بدست می‌آید. ضرایب مدیریت شبکه برای روز اول تیرماه سال ۹۶ در جدول (۳) درج شده است.

جدول ۳: ضرایب تولید در ساعات مختلف روز اول تیرماه سال ۱۳۹۶

Date	Hour	CPF	Date	Hour	CPF
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱	۱.۳۸۵۸۴۰	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۳	۱.۸۸۳۵۴۴
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۲	۱.۲۲۷۰۵۲	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۴	۲.۰۲۶۲۱۰
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۳	۱.۰۹۴۹۳۴	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۵	۲.۰۸۸۴۵۲
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۴	۰.۹۸۵۸۳۹	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۶	۲.۰۷۴۵۶۸
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۵	۰.۸۹۵۹۵۹	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۷	۱.۹۸۶۰۶۳
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۶	۰.۸۵۴۴۷۳	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۸	۱.۸۰۰۴۷۵
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۷	۰.۸۵۸۲۹۸	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۹	۱.۷۰۷۷۱۸
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۸	۰.۹۰۱۳۷۹	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۲۰	۱.۶۷۵۰۰۶
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۹	۰.۹۹۶۹۸۱	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۲۱	۱.۶۵۵۳۶۳
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۰	۱.۱۷۸۶۴۲	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۲۲	۱.۶۶۴۲۴۹
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۱	۱.۴۲۲۲۹۱	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۲۳	۱.۶۹۳۰۳۶
۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۱۲	۱.۶۶۳۳۶۵	۱۳۹۶/۰۴/۰۱	۲۴	۱.۵۸۸۸۵۰

با در نظر گرفتن نرخ خرید تضمینی معادل ۸۰۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت، مقدار درآمد نیروگاه به ازای هر ساعت از شبانه روز در این روز به خصوص بدست خواهد آمد. با محاسبه این مقادیر برای روزهای مختلف سال مقدار درآمد نیروگاه به تفکیک ماه‌های مختلف سال در جدول (۴) درج شده است. بنابراین درآمد سالیانه یک نیروگاه ۵کیلوواتی در سال با ۸۰,۸۵۶,۰۷۴ ریال می‌باشد.

جدول ۴ : درآمد نیروگاه در یک سال با احتساب ضرایب تولید

ماه	انرژی تزریق شده (kWh)	انرژی تعدیل شده (kWh)	نرخ خرید تضمینی (ریال)	صورتحساب (ریال)
فروردین	۷۶۵.۱۷	۴۲۸.۱۴	۸۰۰۰	۳,۴۲۵,۱۲۰
اردیبهشت	۸۰۴.۱۲	۸۲۸.۶۳	۸۰۰۰	۶,۶۲۹,۰۴۰
خرداد	۸۲۶.۶۸	۱,۲۸۶.۴۶	۸۰۰۰	۱۰,۲۹۱,۶۸۰
تیر	۸۱۸.۹۸	۱,۵۸۳.۵۶	۸۰۰۰	۱۲,۶۶۸,۴۸۰
مرداد	۸۲۵.۸۹	۱,۸۶۵.۲۷	۸۰۰۰	۱۴,۹۲۲,۱۶۰
شهریور	۸۲۶.۴۹	۱,۳۸۸.۷۳	۸۰۰۰	۱۱,۱۰۹,۸۴۰
مهر	۷۲۰.۳۴	۷۴۹.۹۶	۸۰۰۰	۵,۹۹۹,۶۸۰
آبان	۶۲۴.۶۹	۴۵۷.۴۵	۸۰۰۰	۳,۶۵۹,۶۰۰
آذر	۵۳۷.۲۱	۳۵۷.۷۲	۸۰۰۰	۲,۸۶۱,۷۶۰
دی	۵۳۰.۹	۳۵۴.۴۰	۸۰۰۰	۲,۸۳۵,۲۰۰
بهمن	۵۹۵.۲۱	۳۸۲.۷۱	۸۰۰۰	۳,۰۶۱,۶۸۰
اسفند	۶۵۷.۵	۴۲۳.۹۹	۸۰۰۰	۳,۳۹۱,۹۲۰

۴- هزینه‌های احداث نیروگاه خورشیدی ۵ کیلوواتی

به‌طور کلی هزینه‌های احداث نیروگاه خورشیدی به سه دسته تقسیم می‌شود: ۱- هزینه‌های پیش از احداث؛ ۲- هزینه‌های ساخت و راه‌اندازی؛ ۳- هزینه‌های تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری. هزینه‌های پیش از احداث هزینه‌هایی است که به‌طور کلی از لحظه‌ای که تصمیم به احداث نیروگاه گرفته می‌شود آغاز و تا مرحله پیش از ساخت نیروگاه ادامه دارد. جدول (۵) هزینه‌های واقعی تا مرحله قبل از احداث نیروگاه را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که اعداد مندرج در جدول مربوط به سال ۹۶ است.

جدول ۵: هزینه‌های پیش از احداث

ردیف	سرفصل هزینه	واحد	تعداد	قیمت واحد (ریال)	قیمت کل (ریال)
۱	مطالعات امکان سنجی	مجموعه	۱	۵۰,۰۰۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	اخذ مجوزات	مجموعه	۱	۱۰,۰۰۰,۰۰۰	۱۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	طراحی و نظارت	مجموعه	۱	۵۰,۰۰۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰,۰۰۰
	جمع کل				۱۱۰,۰۰۰,۰۰۰

هزینه‌های ساخت و راه اندازی شامل هزینه‌های مربوط به آماده‌سازی، خرید تجهیزات، حمل تجهیزات انبارداری و نگهداری از تجهیزات حین ساخت، هزینه‌های پرسنل نصب و راه‌اندازی شامل دستمزد، غذا، ایاب و ذهاب، هزینه‌های مصالح مورد نیاز و ... می‌باشد. جدول (۶) هزینه‌های ساخت و راه‌اندازی برای یک نیروگاه ۵ کیلوواتی را نشان می‌دهد. با توجه به وارداتی بودن بخش زیادی از تجهیزات، قیمت دلار در زمان نگارش این مقاله ۳۵۷۰۰ ریال است.

جدول ۶: هزینه‌های ساخت و راه‌اندازی

ردیف	نوع جنس یا خدمات	واحد	تعداد	قیمت واحد (ریال)	قیمت کل (ریال)
۱	پنل خورشیدی ۲۵۰ وات	عدد	۲۰	۷,۵۰۰,۰۰۰	۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	اینورتر خورشیدی ۵ کیلووات	دستگاه	۱	۸۰,۰۰۰,۰۰۰	۸۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	سازه و فونداسیون	کیلووات	۵	۷,۰۰۰,۰۰۰	۳۵,۰۰۰,۰۰۰
۴	کابلکشی AC و DC	متر	۵۰	۱۵۰,۰۰۰	۷,۵۰۰,۰۰۰
۵	تابلو AC و DC	مجموعه	۲	۷,۰۰۰,۰۰۰	۱۴,۰۰۰,۰۰۰
۶	حمل و نصب	کیلووات	۵	۲,۵۰۰,۰۰۰	۱۲,۵۰۰,۰۰۰
	جمع کل				۲۹۹,۰۰۰,۰۰۰

به‌طور کلی یک نیروگاه خورشیدی به‌دلیل عدم استفاده از قطعات متحرک و دوار هزینه‌های استهلاک و تعمیر و نگهداری بسیار پایینی دارد. هم‌چنین به دلیل عمر مفید بالای تجهیزات خورشیدی معمولا فارغ از تعمیرات خاصی می‌باشند. نظافت‌های مرتب و دوره‌ای علاوه بر اینکه عمر مفید تجهیزات را افزایش داده و مانع از بروز عیوب ناشی از آن می‌شود، مقدار راندمان نیروگاه را به شدت افزایش می‌دهد. توصیه می‌گردد هر ماه یک‌بار و در مناطق آلوده‌تر مانند مناطق غربی کشور و یا شهرهای بزرگ و صنعتی هر دوهفته یکبار شستشوی پنل‌ها صورت گیرد. در جدول (۷) هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری از یک نیروگاه خورشیدی ۵ کیلوواتی به تفکیک درج شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده، شاخصه‌های اقتصادی به صورت جدول (۱۰) تنظیم و محاسبه گردیده است.

با توجه به عدد بدست آمده برای بازگشت سرمایه و همچنین نرخ بازده داخلی ملاحظه می‌شود که این پروژه در مقایسه با سایر پروژه‌ها دارای جذابیت بیشتری جهت سرمایه‌گذاری است. ضمن اینکه پروژه به دلیل عقد قرارداد خرید تضمینی از ریسک فوق‌العاده پایینی برخوردار است.

جدول۷: هزینه‌های تعمیر و نگهداری یک نیروگاه خورشیدی ۵ کیلوواتی

ردیف	سرفصل هزینه	واحد	تعداد	قیمت واحد (ریال)	قیمت کل (ریال)
۱	نظافت دوره ای	دوره	۶	۵۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
۲	بازرسی دوره ای	دوره	۲	۵,۰۰۰,۰۰۰	۱۰,۰۰۰,۰۰۰
	جمع کل				۱۳,۰۰۰,۰۰۰

جدول ۸: شاخصه‌های اقتصادی احداث یک نیروگاه خورشیدی ۵ کیلوواتی

نرخ تورم	٪۹
نرخ تنزیل	٪۱۵
بازگشت سرمایه	۶/۰۲ سال
ارزش حال خالص	۴۸۳,۳۴۵,۵۳۷
نسبت منافع به مخارج	۲/۱۸
نرخ افزایش قیمت برق	٪۱۰
نرخ بازده داخلی	۲۷/۴۷

۵-بررسی سیستم منصوبه

با مراجعه به نیروگاه منصوبه، مجموع تولید از زمان نصب تا لحظه اندازه‌گیری بر روی صفحه اینورتر نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (۱) مشاهده می‌شود، مقدار توان لحظه‌ای نیروگاه در زمان اندازه‌گیری ۷۵۶ وات، میزان انرژی تولیدی کل روز تا زمان اندازه‌گیری ۱۲/۳۱ کیلووات ساعت و میزان کل انرژی تولیدی از زمان راه‌اندازی نیروگاه تا زمان اندازه‌گیری ۱۷/۰۹۶ مگاوات ساعت می‌باشد.

شکل ۱: اطلاعات تولید درج شده بر روی صفحه اینورتر سایت منصوبه

جهت مقایسه عملکرد نیروگاه خورشیدی منصوبه در ساختمان برق تهرانپارس با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به اطلاعات بیشتری نیاز است. با مراجعه به اطلاعات ثبت شده در سیستم مانیتورینگ نیروگاه خورشیدی وضعیت نیروگاه مشخص گردید. با توجه به این‌که شرکت نصاب نیروگاه از سیستم مانیتورینگ استاندارد جهت ذخیره و نمایش اطلاعات نیروگاه استفاده نکرده و فقط اطلاعات را توسط تجهیزی که خود طراحی و ساخته بود به نمایش می‌گذاشت، از این‌رو امکان دسترسی به اطلاعات ذخیره شده از زمان نصب نیروگاه، از طریق سیستم مانیتورینگ منصوبه مهیا نبود. با توجه به اینکه در این پروژه از اینورترهای SMA مجهز به سیستم بلوتوث استفاده شده بود، با استفاده از نرم‌افزار Sunny Explorer که توسط سازنده تهیه و منتشر شده است با استفاده از یک لپ‌تاپ مجهز به بلوتوث، اطلاعات مورد نیاز از اینورتر بدست آمد.

شکل (۲) مقایسه مقادیر واقعی تولید نیروگاه در سال ۲۰۱۶ را با مقادیر بدست آمده حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود، مقادیر واقعی در بعضی از ماه‌ها با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی مطابقت داشته و در بعضی از ماه‌ها نیز متفاوت می‌باشد. دلایل زیادی می‌تواند سبب بروز این مساله باشد که در زیر به تعدادی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

شکل ۲: نمودار مقایسه مقادیر تولید بدست آمده از سیستم منصوبه و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار

۵-۱-شرایط نصب نامناسب

بـا توجه به محاسـبات انجام گرفته در نرم‌افـزار، بهترین زاویه نصب پنل‌های خورشیدی جهت استحصال ماکزیمم توان در کل طول سال، ۳۳ درجه می‌باشـد. با مراجعه به سـایت و اندازه‌گیری شـیب نصب پنل‌ها مشـخص گردید که این مقدار در رشـته‌های مختلف بین ۴۰ تا ۴۵ و همین مسـاله نیز سـبب کاهش مقدار انرژی تولید شـده در کل طول سـال نسبت به مقادیر حاصل از شبیه‌سازی است. همچنین طراحی نامناسـب سبب بروز سایه‌اندازی ردیف جلویی پنل‌ها بر روی ردیف پشتی پنل‌ها در ساعات پایانی روز و به دنبال آن کاهش میزان انرژی تولید شـده اسـت. علاوه بر این وجود سایه‌اندازی ناشی از یک منبع بزرگ آب در مجاورت نیروگاه در سـاعات اولیه روز و همچنین سـایه‌اندازی ناشی از لبه پشـت‌بام بر روی ردیف جلویی پنل‌ها سبب کاهش انرژی تولید شده گردیده است.

۵-۲-استفاده از تجهیزات نامناسب

مشـاهده گردید کـه در بخش کابل‌کشـی DC به‌جای اسـتفاده از کابل‌های سـولار از کابل‌های معمولی استفاده شـده و همین مساله سبب افزایش تلفات و کاهش میزان انرژی تولید شده است. همچنین اسـتفاده از کانکتورهای بی‌کیفیت جهت اتصال پنل‌های خورشیدی یکی دیگر از دلایل افت تولید نیروگاه به‌شمار می‌رود.

۵-۳-بهره برداری نامناسب

بهره‌برداری مناسـب و شـرایط اسـتفاده از نیروگاه تأثیـر فراوانی بر عملکـرد نیروگاه و بـه تبع آن میزان تولید نیروگاه دارد. در شـهری ماننـد تهـران با وجود هوای آلـوده و ذرات معلق و گـرد و غبارهای موجـود در فضا، عـدم نظافت دوره‌ای و مرتب پنل‌های خورشـیدی سبب افت شدید راندمان خواهد شد (شکل ۳).

شکل ۳: عدم نظافت دوره‌ای پنل‌ها و وجود گرد و غبار و فضله پرندگان برروی آن‌ها

شـکل (۴) مقایسه آمار تولید در سـال ۲۰۱۶ را با سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در زمان اندازه‌گیری، میزان تولید هنوز سال میلادی ۲۰۱۷ به اتمام نرسـیده است، بنابراین بدون در نظر گرفتن ماه دسـامبر همان‌طورکه مشاهده می‌شـود، میانگین تولید در سال ۲۰۱۷ به نسـبت مدت مشـابه در سـال ۲۰۱۶ افزایش داشته است. قابل ذکر اسـت که در این پروژه به‌جای اسـتفاده از کابل‌های سولار از کابل‌های معمولی اسـتفاده شـده که همین مساله موجب افزایش تلفات و کاهش عمر کابل به دلیل قرار گرفتن در معرض شرایط جوی اسـت. علاوه براین به‌دلیل عدم رسـیدگی مناسب و نظافت پنل‌های خورشیدی، گرد و غبار فراوانی بر روی پنل‌های خورشیدی قرار گرفته بود که این مساله نیز در افت عملکرد نیروگاه مؤثر می‌باشد. به عبارت دیگر در صورتی‌که عملکرد سیسـتم تحت شرایط آب و هوایی کاملا مشـابه در دو سال متوالی اندازه‌گیری شـود، قطعاً با کاهش راندمان مواجه خواهیم بود.

جدول ۹: تعداد ساعات آفتابی در ماه‌های مختلف سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	جون
تعداد ساعات آفتابی در سال ۲۰۱۶	۱۹۱,۲	۱۹۰,۲	۲۳۶,۴	۲۴۷,۴	۳۱۲,۴	۳۲۸,۷
تعداد ساعات آفتابی در سال ۲۰۱۷	۱۸۰,۳	۱۸۶,۹	۱۹۸,۹	۲۰۱,۷	۲۹۹,۸	۳۷۱,۴
ماه	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
تعداد ساعات آفتابی در سال ۲۰۱۶	۳۵۶,۸	۳۳۸,۹	۳۰۴	۲۴۸	۱۸۰,۸	--
تعداد ساعات آفتابی در سال ۲۰۱۷	۳۶۵,۶	۳۵۶,۷	۳۲۶,۷	۲۷۵,۴	۲۰۵,۴	--

شکل ۴: مقایسه آمار تولید سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷

در این مورد با مقایسه مقادیر تولید در سال۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ مشاهده می‌شود که انرژی تولید شده به میزان ۲۰۶ کیلووات ساعت افزایش داشته که این مساله به شرایط تابش و تعداد روزهای ابر و باران بستگی دارد.

با مراجعه به مراجع هواشناسی بین المللی از جمله وب سایت مجموعه www.weatheronline.com، تعداد ساعات آفتابی در بازه زمانی ژانویه تا نوامبر برای سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ به‌صورت جدول شماره (۹) است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه با ظرفیت ۵ کیلووات واقع در شرکت توزیع نیروی برق تهران (منطقه برق تهرانپارس) از نظر فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای تأثیرگذار بر میزان تولید نیروگاه مطالعه و راهکارهای عملی جهت افزایش راندمان نیروگاه ارایه شده است. جهت شبیه‌سازی، طراحی و آنالیز فنی نیروگاه از نرم‌فزار PVsyst استفاده شده است. اطلاعات سایت خورشیدی منصوبه نیز از سیستم مانیتورینگ نیروگاه استخراج شده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده و مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است. پس از انجام شبیه‌سازی‌های حاصل از نرم‌افزار پیش‌بینی می‌شد که نیروگاه قادر باشد تا سالانه حدود ۸۵۹۰ کیلووات ساعت انرژی به شبکه تزریق نماید. با مراجعه به سیستم مانیتورینگ نیروگاه خورشیدی منصوبه نتیجه شد که مقدار تولید انرژی نیروگاه کمتر از میزانی است که از شبیه‌سازی‌ها بدست آمده است. با بررسی‌های فنی به عمل آمده از سایت منصوبه مشخص گردید که دلایل زیادی موجب بروز اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده، گردیده است. همچنین یک بررسی اقتصادی به نسبت جامعی از نیروگاه خورشیدی منصوبه انجام گرفته و مشخص شد که با احتساب ضرایب مدیریت شبکه و ضرایب افزایش نرخ خرید تضمینی در سال‌های آتی نرخ بازگشت سرمایه چنین پروژه‌ای در حدود ۳۱٪ بوده و دوره بازگشت سرمایه اولیه پروژه مذکور در حدود ۲/۵ سال می‌باشد.

۷- سپاسگزاری

در اینجا لازم است که مراتب قدردانی و تشکر نسبت به مسوولین محترم شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ (امور برق تهرانپارس) که نهایت همکاری و مساعدت را جهت دسترسی و مطالعه سایت خورشیدی منصوبه مبذول داشتند، به عمل آید.

۸- مراجع

[1] F. F. Rakotomananandro, "Study of Photovoltaic System," the Degree of Master of Science, in the Graduate School of the Ohio State University, 2011.

[۲] واحد حکمت و ولی کلانتر، «بررسی فنی و اقتصادی استفاده از برق فتوولتاییک در شهر بافق با استفاده از نرم‌افزار»RETScreen ششمین همایش علمی تخصصی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، ۱۳۹۳.

[۳] عبدالرضا رحمانی فر، «بررسی فنی و اقتصادی استفاده از برق فتوولتایی در صنایع نفتی با استفاده از نرم افزار RETSCREEN» نشریه انرژی ایران، دوره ۱۴، شماره ۱، ۱۳۹۰.

[۴] احمدرضا فقیه خراسانی و محمدرضا ایروانی، «آنالیز فنی، اقتصادی و زیست محیطی نیروگاه فتوولتاییک دانشگاه یزد» سومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، ۱۳۹۲.

[5] T. Lang, E. Gloerfeld and B. Girod, "A global assessment of economic performance for residential building photovoltaics," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 42, pp. 932-951, 2015.

[6] J. M. Rodrigues, A. J. Alves, E. G. Domingues, "A photovoltaic system installed on the rooftop of an industry: A technical and economical study," 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), IEEE 2015.

[7] www.nasa.gov

[8] www.satba.gov.ir

[9] www.igmc.ir

***

استفاده از الگوریتم خفاش
به‌منظور کاهش محتوای هارمونیکی کل در اینورتر چند سطحی

حمید رادمنش/ استادیار/ دانشکده مهندسی برق/ دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری تهران/ hamid.radmanesh@aut.ac.ir

سید یحیی دهقانی/دانشجوی کارشناسی ارشد/ دانشکده مهندسی برق/ دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان/ sydalask@gmail.com

رضا شریفی/ محقق پسادکتری/ دانشکده مهندسی برق/ دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران/ Reza.sharifi@aut.ac.ir

چکیده

در ایـن مقالـه از روش بهینه‌سـازی جدیدی که با الهام از الگوریتم حرکـت خفاش‌ها مبتنی بر انعکاس صدا ارایه شـده برای پیدا کردن زوایای آتش در اینورترهای چند سطحی منبع ولتاژ به‌منظور کاهش مقدار اعوجاج کلی هارمونیک (THD) استفاده شده است. در روش ارایه شـده زوایا باید طوری محاسـبه شـوند که دامنه ولتاژ فرکانس اصلی مورد نیاز را تولید نموده و در همین حال مقدار THD خروجی پایین باشد. این روش می‌تواند برای اینورتر چند سطحی همراه با هر تعداد از طبقه‌ها به کار رود. در این مقاله از نرم‌افزار MATLAB برای شبیه‌سـازی اینورتر ۷ سـطحی استفاده شده اسـت و زوایای کلیدزنی بهینه به‌صورت آفلاین محاسبه شده و در پایان نتایج بدست آمده روی یک DSTATCOM پیاده شـده اسـت. نتایج بدسـت آمده با نتایج الگوریتم زنبورعسـل که در یکی از مقالات معتبر ارایه شده است مقایسه شده و درستی عملکرد الگوریتم پیشنهادی را تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: الگوریتم خفاش، اینورترهای چند سطحی، محتوای هارمونیکی کل، فرکانس اصلی

Using Bat Algorithm to Reduce Total Harmonic Distortion in Multi-Level Inverter

Hamid Radmanesh/ Assistant Professor/ Department of Electrical Engineering/ Shahid Sattari Aeronautical University of Scienc and Technology/ Tehran Iran
hamid.radmanesh@aut.ac.ir

Seyed Yahya Dehghani/ MSC/ Electrical Engineering Department/ Islamic Azad University/ Hamedan Branch/ Hamedan, Iran/ sydalask@gmail.com

Reza Sharifi/ Post Doc Researcher/ Electrical Engineering Department/ Amirkabir University of Technology/ Tehran, Iran/ Reza.sharifi@aut.ac.ir

Abstract

Abstract: In this paper, a new optimization method is proposed that is inspired by bounce motion algorithm based on sound reflection to find the angles of fire in multi-level inverters of the voltage source to reduce the total harmonic distortion (THD). In the proposed method, the angles must be calculated so that the amplitude of the required main frequency voltage is generated and at the same time the output of the THD is low. This method can be used for multi-level inverters with any number of levels. In this paper, the 7-level inverter and optimum switching angles will be calculated as the plane and finally the results will be presented.

Keywords: Bat Algorithm, Multi-Level Inverters, Total Harmonic Content, Main Frequency

۱- مقدمه

اینورترهای چند سطحی در حدود سه دهه پیش معرفی شده‌اند با این‌وجود باز هم موضوع بسیاری از تحقیقات و مقالات است و این تحقیقات گسترده، سبب به‌وجود آمدن ساختارها و کاربردهای متفاوتی برای آن‌ها شده است.

برای نخستین بار مفهوم اینورترهای چند سطحی با اینورتر سه سطحی آغاز شد، به‌مرور زمان چند ساختار در مورد آن مورد بررسی قرار گرفت و گسترش یافت. مفهوم ابتدایی یک اینورتر چند سطحی، استفاده از چند کلید نیمه‌هادی به‌صورت سری است که ولتاژ DC بین آن‌ها تقسیم می‌شود و از این‌رو سهم هر کلید سطح ولتاژ به نسبت پایین است. ولتاژ DC موردنظر را می‌توان توسط باتری، خازن، توربین‌های بادی و مزارع خورشیدی که آن‌ها نیز به‌صورت سری قرار دارند، تأمین نمود. به این سبب ولتاژ خروجی اینورتر که ناشی از کلیدزنی نیمه‌هادی‌ها است دارای سطح ولتاژ بالایی خواهد بود درحالی‌که کلیدها دارای ولتاژ منبع DC متصل به آن‌ها می‌باشند. بنابراین اینورترهای چند سطحی مشکل سطح ولتاژ بالا را حل می‌کنند.

مبدل‌های چند سطحی علاقه فراوانی را در سال‌های اخیر به خود جذب کرده‌اند و برای چندین کاربرد توان و ولتاژ بالا مانند محرکه‌های الکتریکی [۲-۱]، انرژی‌های تجدیدپذیر [۳] و جبران‌سازها [۵-۴] مطالعه شدند.

با افزایش تعداد سطوح ولتاژ در یک ساختار داده شده، شکل موج به سینوسی نزدیک‌تر و هارمونیک کمتری خواهد داشت[۶]. فرکانس کلیدزنی کم برابر با فرکانس مولفهٔ اصلی مدار باعث کاهش تلفات و افزایش بازده می‌شود. به‌خاطر کاهش فشار ولتاژ روی هر طبقه (کاهش dv/dt)، مشکلات سازگاری مغناطیسی که در محرکه‌های الکتریکی سبب بروز خرابی‌های زیادی می‌شود برطرف می‌شود [۷]. به‌علت تقسیم ولتاژ روی طبقات اینورتر چند سطحی، حذف ترانس ممکن می‌شود[۸]. ساختارهای اصلی اینورتر چند سطحی عبارت‌اند از اینورتر چند سطحی دیود مهارشده[۹]، اینورتر چند سطحی خازن شناور و اینورتر چند سطحی طبقه‌ای با منابع DC مجزا [۱۰].

از مهم‌ترین ساختارهای اینورترهای چند سطحی می‌توان به دیود کلمپ شده، خازن کلمپ شده یا خازن معلق و اینورتر با اینورتر پل H سری یا منابع DC مجزا اشاره نمود. اینورتر چند سطحی دیود مهارشده دارای دیودهای اضافی است. این‌ها نه‌تنها قیمت را افزایش می‌دهند بلکه باعث مشکلات بسته‌بندی و ایجاد اندوکتانس‌های پارازیتی می‌شوند. بنابراین تعداد سطوح ولتاژ آن‌ها ممکن است به ۷ یا ۹ محدود شود. از طرف دیگر اینورتر چند سطحی خازن شناور دارای خازن‌های شناور اضافی و هزینه بالا است. به‌علاوه کنترل بسیار پیچیده است و فرکانس کلیدزنی زیادی نیاز است تا ولتاژ هر خازن متعادل شود. ساختار سوم، مشکلات گفته شده را حل می‌کند. نیاز به دیودها و خازن‌های اضافی از بین می‌رود. همچنین ویژگی‌های زیر نیز قابل بیان هستند:

۱- بسیار مناسب برای کاربردهای توان و ولتاژ بالا است

۲- هر کلید فقط یک‌بار در دوره روشن و خاموش می‌شود و یک‌شکل موج پله‌ای را تولید می‌کند که با افزایش تعداد سطوح به شکل سینوسی شبیه می‌شود.

۳- بسته‌بندی به‌خاطر سادگی ساختار و تعداد مؤلفه‌های کم آسان است[۱۱].

برای کلیدزنی اینورترهای چند سطحی، معمولاً از ۴ نوع کلیدزنی استفاده می‌شود که عبارت‌اند از مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM)، مدولاسیون پهنای پالس هارمونیک انتخابی حذف شده (SHEPWM)، تکنیک شکل موج پله‌ای با هارمونیک بهینه شده (OHSW)[۱۲] و تکنیک مدولاسیون بردار فضایی (SVPWM)[۱۳]. از بین این کلیدزنی‌ها SPWM و SVPWM دارای فرکانس کلیدزنی بالاتری هستند و درنتیجه تلفات کلیدزنی بالا می‌رود. دو روش دیگر فرکانس کلیدزنی پایین‌تری دارند و می‌توان با آن‌ها هارمونیک‌های دلخواهی را حذف کرد.[۱۴] با روش SHEPWM نسبت به OHSW می‌توان هارمونیک‌های بیشتری را حذف کرد اما افزایش فرکانس کلیدزنی و تلفات را نسبت به OHSW به دنبال خواهد داشت. در حقیقت OHSW نوعی از کلیدزنی SHEPWM محسوب می‌شود. برای یافتن زوایای کلید زنی در SHEPWM روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در کل این روش‌ها به دو قسم تقسیم می‌شود: نخست روش‌های کلاسیک حل عددی و دوم روش‌های اکتشافی [۱۴]: روش‌های نخست که مبتنی بر حل عددی هستند، همچون نیوتون-رافسون [۱۵]، گاوس - نیوتن [۱۶] و تئوری Resaltant [۱۸-۱۷] و... می‌باشند که هرکدام دارای معایبی برای حل مسایل SHEPWM می‌باشند و در مرجع[۱۴] بررسی شده‌اند. روش‌های دوم که مبتنی بر بهینه‌سازی یک تابع هدف است، شامل روش‌هایی چون الگوریتم ژنتیک[۱۸]، الگوریتم اجتماع ذرات (PSO)[۱۴] ، الگوریتم قورباغه[۱۷]، الگوریتم زنبورعسل[۱۸] و... می‌باشند. روش جستجوی هارمونی(HS) یکی از روش‌های اکتشافی بر پایه کوک‌کردن ساز نوازندگان است و دارای مزایایی از قبیل شرایط ریاضی کمتر و سرعت زیاد است[۱۹]. این الگوریتم در اینورترهای چند سطحی برای کلید زنیOHSW به‌کاربرده شده است و قابلیت‌های خود را در حل این‌گونه مسایل نشان داده است[۲۰]. الگوریتم‌های حل ابتکاری و هوشمند مساله،که به نظر می‌آید حل مساله بر اساس الگوریتم ژنتیک و یا بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات نتایج بهتری را به دنبال داشته باشد[۲۲-۲۱] اما در این پروژه نیز به‌خاطر مزایای الگوریتم خفاش، از آن برای حل مسایل هارمونیکی استفاده شده و نتایج آن با ژنتیک الگوریتم به‌عنوان مرسوم‌ترین روش اکتشافی مقایسه شده است.

در روش SHEPWM هدف آن است که تا آنجا که ممکن است دامنه هارمونیک‌ها برابر با صفر شود و درصورتی‌که امکان حل معادلات موجود نباشد هارمونیک‌ها تا حد ممکن کمینه شوند. در این روش می‌توان با n معادله تعداد n-۱ هارمونیک از مرتبه‌های پایین را صفر کرد. برای هر M خاص می‌توان از هارمونیک ۵ شروع کرده (هارمونیک ۳ و مضارب آن در سیستم سه فاز حذف می‌شوند) و تا حد ممکن هارمونیک‌های بالاتر را حذف کرد

چندین راه برای تعریف یک مساله SHEPWM وجود دارد که در شکل (۱) کلاس‌بندی آن نشان داده شده است [۲۳].

روشی که در این مقاله ارایه می‌شود بر پایه بهینه‌سازی و روش کمینه نمودن MTHD است. در این استراتژی هدف ایجاد تابع هدفی است که به دنبال کمینه نمودن THD در عوض حذف کامل آن‌ها است و همچنین مؤلفه اصلی فرکانس باید در مقدار مورد نیاز کنترل شود. در این روش تعداد هارمونیک‌هایی موردنظر محدودیتی مانند روش‌های دیگر که برابر با تعداد زوایای کلیدزنی است، ندارد. پس می‌توان گفت هدف در این مقاله محاسبه زوایای آتش به‌نحوی‌که دامنه ولتاژ، فرکانس اصلی موردنیاز را تولید کرده و درعین‌حال تا جای ممکن مقدار اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ خروجی پایین باشد.

شکل ۱: تقسیم‌بندی تکنیک‌های SHEPWM

مشکلی کـه در اســـتفاده از تکنیک‌های SHEPWM وجود دارد این اســت که این روش نیـاز به حل یک ســری معادلات غیرخطی دارد. بـرای حـل ایـن معادلات از روش‌های مختلفی اسـتفاده شـده اسـت کـــه دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشـند. به‌طورکلی می‌توان روش‌های حل این دسته از مسایل را در شکل (۲) مشاهده نمود:

با مرور مقالاتی که در این زمینه انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های ابتـکاری برای حل معادلات پیچیده‌ای رو به افزایش بوده است[۲۴].

در مرجـع [۲۵]، از الگوریتمی به نـام Colonial Competitive برای کاهش هارمونیک در الگوریتم‌های چند سطحی استفاده نموده است.

در مرجع [۲۶] برای حذف هارمونیک‌های منتخب از الگوریتمی به نام memetic استفاده نموده است همچنین در مقاله [۲۷] نیز از الگوریتم bacterial foraging به‌منظور حذف هارمونیک‌های منتخب استفاده نموده اسـت. در مرجع [۲۸] از الگوریتمی بـه نام Parallel به‌منظور کاهش هارمونیک در اینورترهای چند سطحی استفاده نموده است.

در مرجع [۲۹]، در یک اینورتر سه سطحی از الگوریتم ژنتیک به‌منظور حذف هارمونیک‌های منتخب اسـتفاده نموده است. در مراجع [۳۰] از الگوریتم PSO در یک اینورتر چند سـطحی که منابع DC ورودی آن‌ها دارای ولتاژهای متفاوتی اسـت برای کاهش اعوجاج هارمونیکی کل استفاده شده است.

مرجع [۳۱] از الگوریتم زنبورعسـل برای کاهش اعوجاج هارمونیکی کل استفاده نموده است. در مرجع [۳۲] از الگوریتم رقابت استعماری بـرای پیدا نمودن زوایـای کلیدزنی به‌منظور حـذف هارمونیک‌های مرتبه پایین استفاده نموده است.

در مراجع [۳۳] و [۳۴] از الگوریتم قورباغه برای حذف هارمونیک‌های منتخب با ارایه اسـتراتژی جدیدی پرداخته است. در مرجع [۳۵] در یک اینورتر سـیزده سـطحی از الگوریتم BBO/DS به‌منظور کاهش هارمونیک‌ها استفاده نموده است.

در مرجـع [۳۷-۳۶] از الگوریتـم جدیـدی به نـام الگوریتم خفاش اسـتفاده شده اسـت در مرجع [۳۸] از این الگوریتم به‌منظور حذف هارمونیک‌های انتخابی در اینورترهای چند سـطحی که دارای منابع ولتاژ DC ورودی با اندازه‌های مختلف هسـتند اسـتفاده شـده است.

در ایـن مقاله از ایـن الگوریتم به‌منظور کاهش اعوجـاج هارمونیکی کل در یک اینورتر هفت اسـتفاده شـده اسـت. در این مقاله از روش کمینه‌سـازی مقدار اعوجاج کلی هارمونیک (MTHD) ولتاژ خروجی اینورتـر به‌منظور کاهـش هارمونیک در یک اینورتر هفت سـطحی

شکل ۲: روش‌های حل مسایل تکنیک‌های SHEPWM

استفاده می‌شود.

۲- اینورترهای چند سطحی

این اینورترها از ترکیب سری اینورترهای تمام پل با منابع مجزای DC تشکیل شده‌اند. شکل موج خروجی آن‌ها، حاصل جمع شکل موج‌های حاصل از هر اینورتر تمام پل خواهد شد. شکل (۲) ساختار اینورتر پل H سری را نشان می‌دهد[۳۱].

در این روش، به ازای هر طبقه، یک پارامتر θ_i مربوط به زاویه کلیدزنی آن طبقه وجود دارد. در این روش می‌توان با توجه به روابط موجود با انتخاب صحیح این زوایای کلید موجب کاهش محتوای هارمونیکی کل THD شد.

هرکدام از این طبقات از یک منبع ولتاژ ایزوله به‌منظور تولید ولتاژ خروجی خود استفاده می‌کند. ولتاژ خروجی حاصل‌جمع تمام خروجی‌های ولتاژ است. هرکدام از طبقات قادر به تولید سه سطح ولتاژ Vdc+، Vdc-، و صفر است که به‌خوبی در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳: اینورتر هفت سطحی با شکل موج‌های خروجی

برای موج خروجی شکل (۳) می‌توان سری فوریه آن را به‌صورت زیر نوشت:

$$V_{phase}^{\omega t} = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t) \qquad (۱)$$

با حل رابطه (۱) آنالیز سری فوریه بدست می‌آید:

$$V_n = \begin{cases} \frac{2\sqrt{2}}{n\pi}(\cos(n\alpha_1)+\cos(n\alpha_2)+\cos(n\alpha_3) & \text{for odd n} \\ 0 & \text{for even n} \end{cases} \qquad (۲)$$

که مقدار بیشینه رابطه (۲) برابر است با وقتی‌که تمامی زوایای کلید زنی مساوی صفر باشد:

$$V_1(\max) = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \qquad (۳)$$

که مقدار نرمالیزه رابطه (۴) بر اساس این مقدار :

$$V_n^{pu} = \frac{V_n}{V_1(\max)} = \frac{1}{3n}(\cos(n\alpha_1)+\cos(n\alpha_2)+\cos(n\alpha_3) \qquad (۴)$$

مقدار RMS موج شکل (۱) را محاسبه می‌نماییم:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{\pi}\left\{\int_0^{\frac{\pi}{2}} v^2 d\omega t\right\}} = V_{dc}\sqrt{\frac{2}{\pi}((\alpha_2-\alpha_1)+4(\alpha_3-\alpha_2)+9(\frac{\pi}{2}-\alpha_3)} \qquad (۵)$$

که اگر این رابطه را نرمالیزه نماییم، خواهیم داشت:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\pi}{36}((\alpha_2-\alpha_1)+4(\alpha_3-\alpha_2)+9(\frac{\pi}{2}-\alpha_3)} \qquad (۶)$$

در ادامه شاخصی تحت عنوان شاخص مدولاسیون تعریف می‌شود:

$$M = \frac{V_1}{12V_{dc}/\pi} \qquad (۷)$$

که M مقداری بین صفر تا یک اختیار می‌نماید. درصورتی‌که الگوریتم را به معادلات به ازای شاخص مدولاسیون‌های بین صفر تا یک اعمال کنیم، مقدار تابع هدف، درصد هارمونیک‌ها به مؤلفه اصلی، مقدار THD و زوایای جواب که در آن‌ها تابع هدف کمتر از ۰٫۰۱ شده است. با توجه به روابط ارایه شده در [۲۰]، مقدار THD ولتاژ فاز برابر با رابطه زیر خواهد بود:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}}{V_1} = \sqrt{\left[\frac{V}{V_1}\right]^2 - 1} \qquad (۸)$$

با جایگذاری مقادیر معادل V_1 و V_2مبتنی بر تحلیل فوریه در عبارت فوق خواهیم داشت:

$$THD=\sqrt{\left(\left[\frac{\pi}{4}\frac{\left[(\alpha_2-\alpha_1)+4(\alpha_3-\alpha_2)+9(\frac{\pi}{2}-\alpha_3)\right]}{(\cos\alpha_1+\cos\alpha_1+\cos\alpha_3)^2}\right]\right)-1} \quad (۹)$$

رابطه بالا نشـان‌دهنده مقدار THD با توجه به زوایای کلید زنی α_1 و α_2 و α_3 در یک اینورتر هفت سطحی است که از مرجع [۱۶] نتیجه شده است.

روش MTHD می‌توانـد برای حداقل کردن مقدار اعوجاج هارمونیکی کلی ولتاژ خروجی یک اینورتر هفت سـطحی در نظر گرفته استفاده شـود. در اینجا باید زوایای کلیدزنی طوری محاسـبه شـوند که اولاً دامنـه ولتـاژ فرکانس اصلی مـورد نیاز را تولید کـرده و درعین‌حال محتوای هارمونیکی کل تا جای ممکن کاهش یابد.

تابـع هدف همان‌گونه که در رابطه (۱۰) نیز مشـخص اسـت دارای دو ترم اسـت ترم اول، به‌منظور قرار دادن دامنه ولتاژ فرکانس اصلی موردنیاز در مقدار مطلوب اسـت. در صـورت فقدان این ترم اگر تابع هدف تنها شـامل THD باشد ممکن است که مقدار THD که توسط الگوریتم محاسـبه شده کم باشـد اما مقدار V1 از مقدار مطلوب دور می‌شود که مطلوب نیست.

۲-۱- تشکیل تابع هدف

در ایـن مرحله تابع هدف به‌منظور مینیمم کردن THD و قرار دادن مقدار مؤلفه اصلی برابر با مقدار مناسب تعیین می‌شود:

$$Objective\ Function: \min\left\{\left|v_1^{*}-v_1^{pu}\right|+THD\right\} \quad (۱۰)$$

کـه در آن v_1^{*} مقدار ولتـاژ مطلوب برای مؤلفه اصلی اسـت و V_1^{PU} به‌صورت زیر از قرار دادن n=1 در رابطه به دست می‌آید:

$$v_1^{pu}=\frac{1}{3}\left(\cos\alpha_1+\cos\alpha_2+\cos\alpha_3\right) \quad (۱۱)$$

مقدار $\left|v_1^{*}-v_1^{pu}\right|$ در تابع هدف، مقدار جریمه است، این کار به سبب آن اسـت که اگر تابع هدف تنها شـامل THD باشد ممکن که THD بسـیار کم شـود اما مقدار V1 از مقدار مطلوب دور می‌شود که اصلاً خوشایند نیست. در مقالات مختلف توابع جریمه‌های مختلفی تعریف شده است که در اینجا برای آن‌که حساسیت تابع هدف به این جریمه بیشـتر شـود مقدار جریمه را ده برابر می‌کنیم، از این‌رو رابطه (۱۱) به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$Objective\ Function: \min\left\{10*\left|v_1^{*}-v_1^{pu}\right|+THD\right\}$$

البته در تابع هدف تعریف شـده در اینجا و فایل‌های برنامه‌نویسـی تفاوتـی وجود دارد کـه مربوط به حفـظ قید ترتیب انـدازه زوایای کلیدزنی است که این تفاوت با Vt نشان داده شده است.

۳-الگوریتم خفاش

خفاش‌ها جانوران شگفت‌انگیزی هستند. خفاش‌ها از توانایی انعکاس صـدا برخوردارند و هرکدام بسـته به شـرایط از درجـه خاصی برای انعکاس صدا استفاده می‌کنند. خفاش‌ها صداهای بلند تولید می‌کنند و بـه انعکاس آن در اطراف گوش می‌دهند. پالس صدای آن‌ها بسـته به شـرایط متفاوت اسـت و می‌تواند با نوع گونه و استراتژی شکار نیز در ارتباط باشـد. بسیاری از خفاش‌ها از سیگنال‌های متناسب و اندازه با آنچه از جای دیگر دریافت می‌کنند، اسـتفاده می‌کنند. درحالی‌که بیشـتر اوقات از سـیگنال‌ها بـا فرکانس ثابت بـرای انعکاس صدا در محیـط اسـتفاده می‌کنند. پهنای بانـد سـیگنال‌های آن‌ها متفاوت اسـت و به گونه آن‌ها نیز بسـتگی دارد و بیشتر در صورت استفاده از هارمونی‌های بیشتر افزایش می‌یابد[۳۹].

اگر ما برخی از ویژگی‌های مکان‌یابی خفاش‌های کوچک را به‌صورت ایده‌ال شناسایی کنیم، می‌توانیم الگوریتم‌های متفاوتی که برگرفته از خفاش است را ارایه دهیم. اکنون ما به‌سادگی از قواعد مشخص شده و تقریبی استفاده می‌کنیم:

۱- تمام خفاش‌ها از مکان‌یاب برای جهت و مسافت استفاده می‌کنند و همچنین تقریباً تفاوت بین طعمه و غذا و موانع دیگر را می‌دانند.

۲- خفاش‌ها به‌طور تصادفی، با سـرعت v_i در موقعیت x_i با یک فرکانـس ثابـت $f_{\min}$ و طول‌موج‌های مختلـف λ و بلندی صدا A_o به دنبال طعمـه پرواز می‌کنند. آن‌ها به‌طورخودکار می‌توانند طول‌موج یا پالس ساطع‌شـده از خـود را وقتی‌که $r\in[0,1]$ با توجه به نزدیکی به هدف تنظیم کنند.

۳- اگرچه بلندی صدا می‌تواند در بسـیاری روش‌ها متفاوت باشد ، ما فرض می‌کنیم که بلندی صوت از R_o تا $R_{\min}$ متغیر است.

طبق قوانین بیان‌شـده، مکان x_i^t و سـرعت v_i^t بـرای هر خفاش مجازی iام در تکرار t و همچنین فرکانس f_i به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

کـه در آن $\beta\in[0,1]$ یک بردار تصادفی با توزیع یکنواخت اسـت و x^{*} بهترین مکان فعلی است که در تکرار پس از مقایسه با موقعیت خفاش‌های مجـازی انتخاب می‌شـود. معمـولاً فرکانس $f_{\min}=0$ و $f_{\max}=100$ در نظر می‌گیرند. در هر تکرار، در جستجوی محلی یکی از جواب‌ها به‌عنوان بهترین جواب‌ها انتخاب‌شده و موقعیت جدید هر خفاش به‌طور محلی با گام تصادفی به‌صورت زیر به‌روز می‌شود.

$$f_i=f_{\min}+(f_{\max}-f_{\min})\beta \quad (۱۲)$$

$$v_i^t=v_i^{t-1}+(x_i^t-x^{*}) \quad (۱۳)$$

$$x_i^t=x_i^{t-1}+v_i^t \quad (۱۴)$$

که در آن $\varepsilon\in[-1,1]$ یک عدد تصادفی بوده و $A^t=<A_i^t>$ میانگیـن بلندی صدای خفاش‌ها در تکرار t اسـت. همچنین بلندی صدای A_i^t و نرخ پالس ارسـالی r در هر تکـرار به‌صورت زیر به‌روز می‌شود:

$$x_{new}=x_{old}+\in A^t \quad (۱۵)$$

کـه در آن α و γ مقدار ثابت می‌باشـند و برای هر $0<\alpha<1$ و $r>0$ وقتی t به سمت بی‌نهایت می‌رود، خواهیم داشت[۲۰]:

$$A^t=\alpha A_i^t,\ r_i^{t+1}=r_i^{*}[1-\exp(-\gamma t)] \quad (۱۶)$$

با توجه به توضیحات ارایه شـده در مـورد الگوریتم خفاش، می‌توان روال انجام محاسبات را به‌صورت زیر خلاصه نمود.

۱- جمعیت اولیه خفاش‌ها را $i=1,\dots,n, x_i$ ایجاد کنید.

۲- به ازای $i=1,\dots,n$ سرعت v_i فرکانس fi در xi، نرخ پالس ri، و بلندی صدای Ai را ایجاد کنید.

۳- قرار دهید t=۱.

۴- موقعیت‌ها را مقایسه کرده و جواب بهینه را بیابید.

۵- موقعیت‌های جدید موقتی با تنظیم فرکانس و به‌روز کردن سرعت همه خفاش‌ها ایجاد کنید. (معادلات ۱۴-۱۲)

۶- اگر $rand > r_i$ آنگاه یک جواب در میان بهترین جواب‌ها با گام تصادفی انتخاب کرده و با استفاده از معادله (۱۵) یک جواب محلی در اطراف بهترین جواب انتخاب‌شده ایجاد کنید.

۷- یک جواب جدید با پرواز تصادفی تولید کنید.

۸- اگر $rand < A_i$ و $f(x_i) < f(x^*)$ آنگاه جواب‌های جدید را بپذیرید و طبق معادله (۱۷)، ri را افزایش و Ai را کاهش دهید.

۹- خفاش‌ها را مرتب کرده و بهترین جواب x^* را پیدا کنید.

۱۰-اگر t به ماکزیمم مقدار خود رسید، الگوریتم را متوقف کرده در غیر این صورت قرار دهید $t = t+1$ و به مرحله ۴ بروید.

۴- شبیه‌سازی

همان‌طورکه پیش‌تر نشان داده شد در این مقاله از استراتژی خاصی برای پیدا نمودن زوایای کلیدزنی در اینورترهای چند سطحی استفاده شد. در این قسمت کد شبیه‌سازی برای مینیمم کردن تابع هدف معرفی‌شده در بخش (۲) با استفاده از الگوریتم خفاش انجام شده است. با استفاده از برنامه ارایه شده، نتایج جدول(۱) بدست می‌آید. با تغییر ضریب مدولاسیون M از مقدار اولیه ۰,۱ و گام ۰,۱ تا مقدار نهایی ۱ , مقادیر1α و 2α و 3α محاسبه شده توسط الگوریتم، در همین جدول نمایش داده شده است.

نتایج بدست آمده از این جدول برای درک بهتر در شکل (۴) تا (۶) نشان داده شده است. شکل (۳) تغییرات THD نسبت به تغییرات مدولاسیون در اینورتر هفت سطحی نشان می‌دهد و همان‌طورکه مشاهده می‌شود مقدار THD به ازای ضرایب مدولاسیون بالاتر به‌صورت عمومی کاهش می‌یابد. در شکل(۵) مقادیر زوایای کلیدزنی بهینه به ازای مقادیر مختلف ضریب مدولاسیون که به‌وسیله الگوریتم پیشنهادی محاسبه شده، نشان داده شده است.

در شکل (۶) مقدار مؤلفه اصلی بدست آمده در مقابل مقادیر ضرایب مختلف مدولاسیون اعمال شده، نشان داده شده است. تغییرات v_1^{pu} نسبت به تغییرات مدولاسیون به‌صورت یک خط با شیب m=1 است که این هدف ترم اول تابع هدف یعنی $\left|v_1^* - v_1^{pu}\right|$ را برآورده کرده، که این خود باز دلیلی دیگر بر کارآمدی این الگوریتم است.

شکل ۴: تغییرات THD نسبت به تغییرات مدولاسیون (محور افقی) در اینورتر هفت سطحی

برای اینکه صحت نتایج اعتبارسنجی شود، نتایج با مراجع [۳۱] مقایسه شده که در یکی از معتبرترین ژورنال‌ها IEEE در سال ۲۰۱۲ به چاپ رسیده است، با مراجعه به این مرجع و مقایسه نتایج که در جدول (۲) آمده، به‌خوبی صحت روش ارایه شده در این مقاله اثبات می‌شود.

همان‌طور که در جدول مشخص است مقدار THD از مقدار ۱۲,۵۴٪ در مرجع [۳۱] به مقدار ۱۲,۲۸٪ در این مقاله رسیده است. اما میزان ولتاژ فرکانس اصلی تغییر خاصی نکرده است.

همچنین از مرجع [۳۱] آورده شده است که روند تغییرات زوایای کلید زنی مشابه با این مقاله است که به‌خوبی صحت نتایج را نشان می‌دهد.

همچنین تغییر زوایای کلید زنی نسبت به تغییرات مدولاسیون در شکل (۷) نشان داده شده است.

شکل ۵: نمایش زوایای کلیدزنی بهینه (محور عمودی) به ازای ضرایب مدولاسیون مختلف (محور افقی)

جدول ۱: نتایج حاصله از الگوریتم خفاش به ازای ضرایب مدولاسیون مختلف برای اینورتر هفت سطحی

M	v_1^{pu}	$\left\|v_1^* - v_1^{pu}\right\|$ %	α1	2α	α3	THD٪
۰.۱	۰.۱۰۰۵	۰.۰۵	۷۲.۴۵	۹۰	۹۰	۱۲۸.۲۸
۰.۲۰	۰.۲۰۰۰۹	۰.۰۰۹	۵۳.۱۱	۹۰	۹۰	۶۳.۵۰
۰.۳۰	۰.۳۰۰۰۸	۰.۰۰۸	۲۵.۸۱	۹۰	۹۰	۲۹.۲۷
۰.۴۰	۰.۴۰۰۰۶	۰.۰۰۶	۱۹.۳۷	۷۵.۱۲	۹۰	۳۱.۱۳
۰.۵۰	۰.۵۰۰۰۹	۰.۰۰۹	۱۷.۱۰	۵۷.۰۱	۹۰	۲۱.۶۰
۰.۶۰	۰.۶۰۰۰۶	۰.۰۰۶	۱۱.۵۲	۳۶.۷۱	۸۸.۹۳	۱۷.۵۵
۰.۷	۰.۷۰۰۰۷	۰.۰۰۷	۱۰.۵۲	۳۴.۷	۷۲.۸۵	۱۷.۰۴
۰.۸	۰.۸۰۰۰۵	۰.۰۰۵	۹.۶۴	۳۰.۳۷	۵۶.۵۳	۱۲.۲۸
۰.۹۰	۰.۹۰۰۰	۰	۷.۲۹	۲۲.۰۱	۳۸.۶۵	۱۴.۷۷
۱	۰.۹۹۶۲۹	۰.۳۷	۱.۴۴	۴.۳۳	۷.۲۳	۴۰.۶۵

شکل ۶: تغییرات v_1^{pu} (محور عمودی) نسبت به تغییرات مدولاسیون (محور افقی) در اینورتر هفت سطحی

جدول ۲: جدول۵-۲ مقایسه عملکرد الگوریتم خفاش در کاهش THD نسبت به مرجع [۳۱]

ضریب مدولاسیون	مقایسه	α۱	α۲	α۳	THD	V_1^{pu}
۰.۸	خفاش	۹.٦٤	۳۰.۳۷	٥٦.٥۳	۲۸٦۷٥/۱۲	۰.۸۰۰۰٥۳
	مرجع[۳۲]	۱۱.٥۰	۲۸.۷۱	٥۷.۱۰	۱۲.٥٤	۰.۸۰۰۰٥٤

شکل ۷: تغییرات زوایای کلید زنی نسبت به تغییرات مدولاسیون

در محاسبه ریپل کافی است برای یک فاز بر اساس جریان فاز ورودی مقدار ریپل محاسبه گردد. همچنین فرض می‌شود جریان به‌صورت سینوسی با بیشترین مقدار خود و بدون هارمونیک و با زاویه ۹۰ درجه پس فاز یا پیش فاز است. علاوه بر آن فرض می‌شود که خازن همواره در مدار است و جریان سینوسی همواره در حال عبور از خازن است در حقیقت بدترین حالت ممکن برای نوسان ولتاژ خازن در نظر گرفته شده است.

جدول (۳) حذف هارمونیک را برای دو الگوریتم و برای اجرای یک‌بار و ده بار الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. توجه کنید که در اجرای ده‌باره، درنهایت بهترین جواب‌ها انتخاب می‌شوند. همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، احتمال رسیدن به جواب با الگوریتم خفاش کمی بهتر از ژنتیک است و همچنین افزایش تعداد اجرای الگوریتم تأثیر فراوانی در هر دو الگوریتم ندارد.

جدول ۳: حذف هارمونیک برحسب درصد برای اجرای یک‌بار و ده‌باره دو الگوریتم خفاش و ژنتیک

نوع شکل موج	اجرای یک‌بار		اجرای ده بار	
	ژنتیک	خفاش	ژنتیک	خفاش
حذف هارمونیک ۵	۶۷	۶۷	۶۷	۶۷
حذف هارمونیک ۵، ۷ و ۱۱	۴۰	۳۹	۴۱	۴۲
حذف هارمونیک ۵، ۷ و ۱۱(حالت دوم)	۱۷	۲۴	۲۱	۲۴
حذف هارمونیک ۵، ۷، ۱۱و۱۳	۱۶	۱۸	۱۸	۲۰
حذف هارمونیک ۵، ۷، ۱۱ ، ۱۳ و ۱۷	۳۱	۳۲	۳۱	۳۲

بهت استخراج نتایج موردبررسی در این مقاله، یک سیستم DSTAT-COM برای تزریق پنج کیلو وار به یک شبکه توزیع ۳۸۰ ولتی در نظر گرفته شد که اینورتر موردبحث و روش کنترل هارمونیک در آن استفاده شده است. در این بخش شبیه‌سازی این سیستم در محیط MATLAB/Simulink انجام شد و قسمت‌های مختلف سیستم در این محیط مدل شدند. در این محیط به بررسی هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ فاز و خط و جریان خط در حالات مختلف تزریق توان راکتیو پرداخته می‌شود. به‌منظور یافتن شکل موج‌های ایده آل، سوییچ‌ها ایده آل فرض می‌شوند ولی تلفات کلیدزنی به‌صورت مقاومتی سری با اندوکتانس کوپلینگ در نظر گرفته شده است. در سیستم کلیدزنی مقادیر مرجع لازم که توسط کنترلر تولید می‌شوند به سیگنال‌های کلیدزنی (Si) تبدیل می‌شوند. در این سیستم ابتدا باید سیگنال‌های مرجع به ضریب مدولاسیون(M) و فاز(δ) تبدیل شوند، سپس از روی ضریب مدولاسیون زوایای کلیدزنی یافته شوند و این زوایا با δ جمع شده و سیگنال‌های کلیدزنی را می‌سازند.

برای شبیه‌سازی حالت دایم سیستم، ۲ حالت کاری برای DSTAT-COM در نظر گرفته می‌شود. اولین حالت تزریق ۵۰۰۰ وار(حالت کاپاسیتیو) و دومین حالت کشیدن ۵۰۰۰ وار از شبکه(حالت اندوکتیو) است.

در حالت کاپاسیتیو هدف تزریق پنج کیلووار به شبکه است. شکل (۸) شکل موج ولتاژ فازهای خروجی اینورتر را نشان می‌دهد. شکل‌ها دارای ۶ زاویه کلیدزنی در هر ربع سیکل هستند. علاوه بر آن شکل‌ها دارای اندکی اعوجاج در سطوح هستند. این به خاطر خاصیت ذاتی DSTATCOM است که خازن طرف DC در ربع سیکل شارژ و در ربع سیکل بعدی دشارژ می‌شود و یک نوع تحدب در سطوح DC در حالت خازنی DSTATCOM ایجاد می‌کند.

در حالت اندوکتیو هدف جذب پنج کیلو وار از شبکه است. شکل (۹) شکل موج ولتاژهای فازهای خروجی اینورتر را نشان می‌دهد. شکل‌ها همانند حالت قبل دارای ۶ زاویه کلید زنی در هر ربع سیکل و اندکی اعوجاج در سطوح هستند. همان‌طور که گفته شد، این به خاطر خاصیت ذاتی DSTATCOM است که خازن طرف DC در ربع سیکل شارژ و در ربع سیکل بعدی دشارژ می‌شود و یک نوع تقعر در سطوح DC در حالت خازنی DSTATCOM ایجاد می‌کند. تفاوت در حالت به خاطر اختلاف‌فاز جریان‌ها در دو حالت کاپاسیتیو و اندوکتیو است. در حالت کاپاسیتیو در ربع سیکل اول خازن شارژ و در ربع سیکل بعدی دشارژ می‌شود، اما در حالت اندوکتیو خازن در ربع سیکل اول دشارژ و در ربع سیکل دوم شارژ می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله روش جدیدی برای پیدا کردن زوایای آتش در مبدل‌های چند سطحی منبع ولتاژ، به‌منظور حذف هارمونیک‌های مشخص شده و کاهش مقدار اعوجاج کلی هارمونیک (THD) ولتاژ خروجی مبدل، با استفاده از روش بهینه‌سازی جدیدی که با الهام از الگوریتم حرکت خفاش‌ها مبتنی بر انعکاس صدا ارایه شده معرفی می‌کند. همان‌طورکه از نتایج مشخص است زوایای به دست آمده از الگوریتم ارایه شده به‌خوبی مقدار THD را کاهش داده است و همچنین مؤلفه اصلی ولتاژ را در مقدار دلخواه تنظیم نموده است که این نشان‌دهنده کارایی و قدرت این الگوریتم است.

۶- مراجع

[1]Carrasco J.M. Franquelo L.G. Bialasiewicz J.T. Galvan E. PortilloGuisado R.C. Prats M.A.M. Leon J.I. Moreno-Alfonso N. "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey" IEEE Transaction on Industrial Electronics, Volume 53, June 2006 Page(s):1002 – 1016

[2] Shukla A. Ghosh A. Joshi A. "State feedback control of multilevel inverters for DSTATCOM applications" IEEE Transactions on Power

شکل ۸: شکل موج فاز خروجی در حالت کاپاسیتیو و ضرایب هارمونیکی آن

شکل۹: شکل موج فاز خروجی در حالت اندوکتیو و ضرایب هارمونیکی آن

Delivery, Volume 22, Issue 4, Oct. 2007 Page(s):2409 – 2418

[3]H. R. Toodeji, N. Farokhnia, S. M. Ale Emran, H. Askarian Abyaneh,, S.H. Fathi; "Voltage Sag and Unbalance Mitigation in Distribution Systems Using Multi-level UPQC", Accepted in International Conference On Modelling And Simulation, MS'07, December 3-5, 2007 Kolkata, India

[4]Rodriguez, J.; Jih-Sheng Lai; Fang Zheng Peng " Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications" IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 49, Issue 4, Aug 2002 Page(s): 724 – 738

[5]Al-Othman A.K. and Abdelhamid T. H. "Elimination of harmonics in multilevel inverters with non-equal dc sources using PSO" Elsevier Science, Energy Conversion and Management, (2008), doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.047

[6]Fang Zheng Peng; Jih-Sheng Lai; McKeever, J.W.; VanCoevering, J. "A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static VAr generation" IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 32, Issue 5, Sep/Oct 1996 Page(s):1130 – 1138

[7]A. Nabae, I. Takahashi, H. Agaki, "A New Neutral-Point-Clamped PWM, Inverter," IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.IA-17, No.5, Sep./Oct., 1981, pp.518-523.

[8]F. Z. Peng, J-S Lai, "Multilevel Converters – A New Breed of Power Converters" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, No.3, May/June, 1996, pp.509-517.

[9]Sirisukprasert S. "Optimized harmonic stepped-waveform for multilevel Inverter" M.Sc. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech), September 1999, Available online at http://www.worldcatlibraries.org.

[10]Lopez, O. ; Alvarez, J. ; Doval-Gandoy, J. ; Freijedo, F.D. "Multilevel Multiphase Space Vector PWM Algorithm" Industrial Electronics, IEEE Transactions on2008 Volume : 55 , Issue:5 On page(s): 1933 – 1942

[11]A. Kashefi Kaviani, S.H. Fathi, N. Farokhnia, A. Jahanbani Ardakani "PSO, an Effective Tool for Harmonics Elimination and Optimization in Multi-level Inverters Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on

[12]Jeevananthan S. "Evolutionary Computing Based Area Integration PWM Technique for Multilevel Inverters. Journal of Electrical Systems" Vol. 3, 2007, Page(s): 61-72.

[13]Tianhao Tang, Jingang Han, Xinyuan Tan. "Selective Harmonic Elimination for a Cascade Multilevel Inverter" 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 2, July 2006 Page(s): 977–981

[14]Chiasson J.N, Tolbert L.M, McKenzie K.J, Zhong Du. "Elimination of harmonics in a multilevel converter using the theory of symmetric polynomials and resultants" IEEE Transactions on Control Systems Technology, Volume 13, Issue 2, Mar 2005 Page(s): 216 – 223.

[15]Zhong Du, Tolbert L.M, Chiasson J.N, Ozpineci B. "Reduced Switching-Frequency Active Harmonic Elimination for Multilevel Converters" IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 55, Issue 4, April 2008 Page(s): 1761-1770.

[16]Ozpineci B, Tolbert L.M, Chiasson J.N. "Harmonic optimization of multilevel converters using genetic algorithms" IEEE Power Electronics Letters, Volume 3, Issue 3, Sept. 2005 Page(s): 92–95.

[16]R. Salehi, N. Farokhnia, M. Abedi, Harmonic Elimination and Optimization of Stepped Voltage of Multilevel Inverter by Bacterial Foraging Algorithm, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 5, No. 4, pp.545-55, 2010

[17]Kavousi, A.; Vahidi, B.; Salehi, R.; Bakhshi Zadeh, M.K.; Farokhnia, N.; Fathi, S.H, "Application of Bee algorithm in multilevel inverter using selective harmonic elimination" IEEE Transactions on Power Electronics

[18]Geem,Zong W" .Harmony search algorithms for structural design optimization1 ".st ed .Berlin :Springer.2009 ,

[19]Majidi ,B .Baghaee ,H .R .Gharehpetian ,G .B .Milimonfared ,J. Mirsalim ,M" .Harmonic Optimization in Multi-Level Inverters using Harmony Search Algorithm2 ."nd IEEE International Conference on Power and Energy) PECon ,(08 December ,2008 ,1-3 Johor Baharu, Malaysia

[۲۰] زنگانــه علی‌اصغر،زنگانــه محســن،«تعیین بهینه زوایای کلید زنــی در اینورتر هــای منبــع ولتاژ چنــد ســطحی باهدف کاهــش اعوجــاج هارمونیکــی کل با

ادامه از صفحه ۲۳

سیستم‌های نانورباتیک پرداختیم و روش‌های جدیدی را برای طراحی نانوربات‌های زیستی ارایه نمودیم که این روش‌ها بر اساس عملکرد المان‌های زیستی در شرایط و محیط‌های عملیاتی مختلف صورت می‌پذیرد.

۸- مراجع

[1] Farazkish, R., Sayedsalehi, S., and Navi, K. “Novel design for quantum dots cellular automata to obtain fault-tolerant majority gate”, Journal of Nanotechnology, doi: 10.1155/943406 (2012).

[2] Farazkish R., “A New Quantum-Dot Cellular Automata Fault-Tolerant Five-Input Majority Gate”, Journal of Nanoparticle Research 16:2259 (2014).

[3] Farazkish R., and Khodaparast F., “Design and characterization of a new fault-tolerant full-adder for quantum-dot cellular automata”, Microprocessors and Microsystems J., doi:10.1016/j.micpro.2015.04.004 (2015).

[4] Farazkish R., “A new quantum-dot cellular automata fault-tolerant full-adder”, J. Comput. Electr. 14, 506–514 (2015).

[5] Farazkish R., “Fault-tolerant adder design in quantum-dot cellular automata”, Int. J. Nano Dimens., 8(1): 40-48 (2017).

[6] Farazkish R. “Novel efficient fault-tolerant full-adder for quantum-dot cellular Automata”, Int. J. Nano Dimens., 9(1): 58-67 (2018).

[7] Farazkish R. “Robust and reliable design of bio-nanorobotic systems”, Microsystem Technologies, doi.org/10.1007/s00542-018-4049-1 (2018).

[8] Harel E., “Fabrication of latex nanostructures by nanomanipulation and thermal processing”, Nanoletters, 5 (12), 2624-2629 (2005).

[9] Hosseini S., Mehrtash M., and Khamesee M.B., “Design, Fabrication and control of a magnetic Capsule-robot for the human esophagus”, Microsystem Technologies, 17 (5), 1145–1152 (2011).

[10] Pandya A., and Auner G., “Robotics technology: a journey into the Future”, Urol Clin North Am., 31 (4), 793-800 (2004).

[11] Novakovic B., Majetic D., Kasac J. and Brezak D.; “Some Problems and Solutions in Nanorobot Control”, Annals & Proceedings of DAAAM (2011).

[12] Requicha A. G., “Nanorobots, NEMS and Nanoassembly”, Proc. IEEE, 91 (11), 1922-1933 (2003).

[13] Hamdi M., and Ferreira A., “Design, Modeling and Characterization of Bio-Nanorobotic Systems”, DOI: 10.1007/978-90-481-3180-8, Springer Netherlands (2011).

[14] Dingju Z., “Extendibility Scalability and Fault-Tolerance Methods for Cloud Robots Especially for Cloud Nanorobot”, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 12, 6208-6219 (2015).

[15] Mokaberi B., and Requicha A. G., “Towards Automatic Nanomanipulation: Drift Compensation in Scanning Probe Microscopes”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (2004).

[۱۶] فرازکیش ر.، «طراحی و کنترل سیستم‌های نانورباتیک»، مجله دنیای نانو، سال سیزدهم، شماره چهل و نهم، ۱۳۹۶.

[۱۷] حسومی الف.، و فرازکیش ر.، «مشخصه‌سازی ادوات نانوالکترونیک تحمل‌پذیر اشکال چند ورودی- چند خروجی با استفاده از آتاماتای سلولی کوانتومی» (پذیرفته شده)، مجله دنیای نانو، سال چهاردهم، شماره پنجاه و یکم، ۱۳۹۷.

استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات»،دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق،ایران،تهران،شهریورماه ۹۶

[۲۱] الیاسی محمد،علیزاده پهلوانی محمدرضا،«کمینه‌سازی مجموع اعوجاج‌های هارمونیکی چند هدفِ با الگوریتم ژنتیک در اینورترهای چند سطحی آبشاری ترانسفورماتوری»،سی و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق PSC ۲۰۱۶،ایران ،تهران،۱۳۹۵

[22]M. S. A. Dahidah, G. Konstantinou and V. G. Agelidis, "A Review of Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM: Formulations, Solving Algorithms, Implementation and Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 8, pp. 4091-4106, Aug. 2015.

[23]Hojatrad, Falaghi, Farshad, “Heuristic Algorithm for Distribution Networks Reconfiguration for Loss Reduction Based on Graph Theory,” Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.11- No.1- Spring & Summer 2014.

[24]Etesami, M.H.; Farokhnia, N.; Hamid Fathi, S., “Colonial Competitive Algorithm Development Toward Harmonic Minimization in Multilevel Inverters,” in Industrial Informatics, IEEE Transactions on , vol.11, no.2, pp.459-466, April 2015.

[25]Niknam Kumle, A.; Fathi, S.H.; Jabbarvaziri, F.; Jamshidi, M.; Heidari Yazdi, S.S., “Application of memetic algorithm for selective harmonic elimination in multi-level inverters,” in Power Electronics, IET , vol.8, no.9, pp.1733-1739, 9 2015

[26]T. Sudhakar Babu, K. Priya, D. Maheswaran, K. Sathish Kumar, N. Rajasekar, Selective voltage harmonic elimination in PWM inverter using bacterial foraging algorithm, Swarm and Evolutionary Computation, Volume 20, February 2015, Pages 74-81, ISSN 2210-6502.

[27]Roberge, V.; Tarbouchi, M.; Labonte, G., “Parallel Algorithm on Graphics Processing Unit for Harmonic Minimization in Multilevel Inverters,” in Industrial Informatics, IEEE Transactions on , vol.11, no.3, pp.700-707, June 2015.

[28]Pabon Fernandez, L.D.; Diaz Rodriguez, J.L.; Jaimes Carvajal, M.A., “Three-phase multilevel inverter with selective harmonic elimination,” in Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA), 2015 Workshop on , vol., no., pp.1-6, 28-30 Oct. 2015.

[29]S.Assly Steffy, B.Mangaiyarkarasi, S.Sherin Jasper, K.Priyanka, K.Soorya, “ Analysis & Reduction of THD in Multilevel Inverter Using PSO Algorithm”, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 3, Issue 2, February 2014.

[30] Kavousi, A.; Vahidi, B.; Salehi, R.; Bakhshizadeh, M.; Farokhnia, N.; Fathi, S.S., “Application of the Bee Algorithm for Selective Harmonic Elimination Strategy in Multilevel Inverters,” Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.27, no.4, pp.1689,1696, April 2012

[31]Ajami, Ali, Mohammad Reza Jannati Oskuee, and Ata Ollah Mokhberdoran. “Implementation of Novel Technique for Selective Harmonic Elimination in Multilevel Inverters Based on ICA.” Advances in Power Electronics 2013 (2013).

[32]Huibo Lou; Chengxiong Mao; Dan Wang; Jiming Lu; Libing Wang, “Fundamental modulation strategy with selective harmonic elimination for multilevel inverters,” Power Electronics, IET , vol.7, no.8, pp.2173,2181, August 2014.

[33]S. Tasouji Hassanpour, A. Arjhangmehr, E. Mostafapour,” THD Minimization in Cascade Multi-level Inverters with a Few DC Sources and Optimum Voltage Levels”, International Journal of Control Science and Engineering 2013.

[34]Saraswathy, S.; Kavitha, R.; Thottungal, R., “Harmonic optimization of thirteen level uniform step asymmetric Inverter using hybrid BBO/DS algorithm,” in Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), 2015 International Conference on , vol., no., pp.1-6, 19-20 March 2015.

[35]K. Ganesan, K. Barathi, P. Chandrasekar, D. Balaji, Selective Harmonic Elimination of Cascaded Multilevel Inverter Using BAT Algorithm, Procedia Technology, Volume 21, 2015.

[36]Khamooshi, R.; Moghani, J.S., “Comprehensive harmonic optimization in cascaded h-bridge multilevel inverters using variable DC sources,” in Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2014 5th , vol., no., pp.249-254, 5-6 Feb. 2014

[37]Mahmoud Enayati and Sirous Mohammadi, ”Reducing Total Harmonic Content of-9 Level Inverter by Use of Cuckoo Algorithm“, International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering ,.vol2014 ,6 .

[38]http//:cloudserver.blogfa.com/post6/

***

تولید هم‌زمان برق و تصفیه فاضلاب

علیرضا امیری‌تبار/ دانشکده مهندسی مکانیک وانرژی/ دانشگاه شهید بهشتی/a.amiritabar@mail.sbv.ac.ir
رقیه گوگ‌ساز قوچانی/ دانشکده مهندسی مکانیک وانرژی/ دانشگاه شهید بهشتی/ r_gavagsaz@sbv.ac.ir
مجید زندی/ دانشکده مهندسی مکانیک وانرژی/ دانشگاه شهید بهشتی/ m_zandi@sbv.ac.ir

چکیده

وجود مشکل‌های جهانی ناشی از استفاده سوخت‌های فسیلی و تلاش برای یافتن روش‌های جایگزین تامین انرژی بشر از یک سو و وجود انرژی فراوان و نهفته در مواد دورریختنی و فاضلاب از سوی دیگر، استفاده از فاضلاب به‌عنوان یک منبع انرژی را عملی مقرون به صرفه و مفید به لحاظ زیست محیطی قلمداد می‌کند. از طرفی استفاده دوباره از آب در چرخه بازیاب مجدد پساب‌ها به‌صورت موضعی، بخشی از راه‌کارهای منطقی جهت مقابله با چالش جهانی نیازمندی آب در جامعه بشری می‌باشد. بازیاب دوباره فاضلاب و برگشت آب در سیکل مصرف نیازمند انرژی زیادی می‌باشد. استفاده از پیل‌های سوختی میکروبی به‌عنوان راه‌حلی در این مسیر قابل بررسی است. در تصفیه پساب به‌صورت موضعی و با استفاده از این نوع پیل‌های سوختی، امکان تولید انرژی مورد نیاز سیستم نیز فراهم می‌گردد.

کلمات کلیدی: اپیل‌سوختی میکروبی، وتلند، تولید برق، تصفیه فاضلاب موضعی، مدل‌سازی، شبیه‌سازی، غشا

Congeneration of Electricity and Wastewater Treatment

Alireza Amiritabar/ Faculty of Mechanical Engineering and Energy Shahid Beheshti University/ a.amiritabar@mail.sbv.ac.ir
Roghaye Gavagsaz Ghoachani/ Faculty of Mechanical Engineering and Energy Shahid Beheshti University/ roggav@yahoo.com
Majid Zandi/ Faculty of Mechanical Engineering and Energy Shahid Beheshti University/ m_zandi@sbv.ac.ir

Abstract

Environmental problems suffering from fossil fuels, trying to find alternative human energy supply and the presence of huge amount of energy in wastewater, considers sewage as an economically viable and environmentally-friendly option source of energy. Also, wastewater treatment in a localized manner consults reuse of water in the water cycle, but a recovery of wastewater and the return of water to the water cycle requires lots of energy.
Using microbial fuel cells as a solution to this path is considerable and wastewater treatment, using these types of fuel cells, would make it possible to generate the energy required by the system.

Keywords: Microbial fuel cell, Wetland, Generating Electricity, Localized Wastewater treatment, Modeling, Simulating, Membrane

۱- مقدمه

بر اساس یک تحقیق صورت گرفته، در حال حاضر پالایش و تصفیه فاضلاب در یک کشور صنعتی مثل امریکا نیازمند توانی در حدود ۱۵ گیگاوات یا ۳ درصد توان الکتریکی تولیدی این کشور است؛ در حالی‌که مجموع فاضلاب‌های شهری، صنعتی و حیوانی، پتانسیل تولید $۵/۱ \times ۱۰^{۱۱}$ کیلووات ساعت یا معادل ۱۷گیگاوات توان را دارد. می‌توان گفت در صورت امکان تبدیل انرژی فاضلاب، نه تنها برای تصفیه آن نیازمند هیچ انرژی‌ای نخواهیم بود، بلکه فاضلاب می‌تواند به‌عنوان یکی از پتانسیل‌های تولید انرژی در آینده نیز محسوب گردد. در میان روش‌های استفاده از فاضلاب و ضایعات، روش‌هایی چون سوزاندن، گازی‌سازی، پیرولیز، تخمیر یا تجزیه بی‌هوازی، به‌عنوان روش‌های تولید انرژی از ضایعات و فاضلاب‌ها شناخته شده است[۱]. با توجه به وجود مواد مختلف در فاضلاب، انرژی قابل توجهی به‌صورت نهفته در ساختار فاضلاب وجود دارد که در صورت یافتن روش رهاسازی آن، انرژی زیادی را می‌توان از این فرآیند بدست آورد[۲].

۲- تئوری تولید برق و تصفیه همزمان پساب

فاضلاب‌های شهری، صنعتی و حیوانی، حاوی مواد نامحلول فراوانی هستند که پیش از رهاسازی آن‌ها در طبیعت باید از آب جداسازی شده تا امکان برگشت آب به سیکل مصرف ممکن گردد. این مواد که بیشتر موادآلی هستند، در گذشته توسط روش‌های هوازی پالایش می‌شدند و انرژی مصرفی در آن‌ها معادل ۰.۳ تا ۰.۶ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب پساب بود. سپس روش‌های جدیدتر مثل بیوراکتورهای دارای غشا، از روش‌های قبلی کاراتر شد ولی انرژی مصرفی آن‌ها نیز افزایش پیدا کرد و در محدوده ۱ تا ۲کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب رسید[۳].

در سال‌های اخیر، تصفیه بیوشیمیایی فاضلاب، به‌عنوان روشی قابل قبول برای تولید الکتریسیته از فاضلاب محسوب شده است. این روش بر اساس استفاده از میکروارگانیسم‌هایی عمل می‌کند که با تجزیه ساختار مواد فاضلابی، الکترون موجود در آن‌ها را آزاد کرده و به الکترود می‌رساند. بر این اساس، پیل‌های سوختی میکروبی، می‌تواند با تجزیه زیست توده موجود در فاضلاب‌ها، اجزای آلی و غیرآلی موجود در فاضلاب را تصفیه و تولید انرژی الکتریکی نماید[۱].

۳- مفاهیم عملکردی پیل سوختی میکروبی

پیل سوختی میکروبی (شکل ۱) یکی از انواع پیل‌های سوختی است که با استفاده از میکروارگانیسم‌هایی همچون قارچ‌ها، انرژی شیمیایی منابع ورودی‌اش را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. پیل سوختی میکروبی در ساختار خود، از دو بخش اصلی به نام الکترود (آند و کاتد) و محفظه تشکیل شده است که در بین آن‌ها غشا قرار دارد. در آند میکروارگانیسم‌ها جهت زنده ماندن و تامین انرژی بقای خود مواد آلی ورودی را اکسید کرده که در نتیجه آن، کربن دی‌اکسید، الکترون و پروتون، آزاد می‌گردد. الکترون‌ها توسط یک الکترود که در محفظه آند وجود دارد جذب شده و از طریق مدار خارجی جهت انتقال به محفظه کاتد، منتقل می‌شود. پروتون‌های تولیدی نیز از طریق غشای میان دو محفظه که فقط نسبت به پروتون تراوا است، به محفظه کاتد منتقل می‌شود. در محفظه هوازی کاتد، پروتون رسیده از غشا، الکترون رسیده از مدار خارجی و اکسیژن موجود با هم ترکیب شده و مدار پیل سوختی به‌طور خلاصه توسط دو جزء الکترون‌ده و الکترون‌گیر کامل می‌گردد[۴].

شکل ۱: شماتیک عملکرد پیل سوختی میکروبی[۵].

در این فرآیند وارد کردن فاضلاب به‌عنوان سوخت ورودی پیل، منجر به کاهش مواد آلی محلول در آب (یا به عبارتی تصفیه فاضلاب) در کنار تولید الکتریسیته از پیل سوختی می‌شود. اگرچه در حال حاضر با پیشرفت علم، میزان برق تولیدی در حدی نیست که بتوان از آن به‌عنوان یک منبع تولید الکتریسیته برای مصارف مختلف نام برد اما این برق می‌تواند سیستم تصفیه فاضلاب را از نیاز به برق ورودی جهت فرآیندتصفیه، بی‌نیاز نماید.

۴- مقایسه تصفیه در پیل سوختی میکروبی با روش‌های تصفیه سنتی

مقایسه سیستم‌های پیل سوختی میکروبی در مقابل با سیستم‌های سنتی تصفیه فاضلاب، اهمیتِ نیاز به پیشرفت علمی و حرکت به سوی سیستم‌های نوین تولید همزمان انرژی و تصفیه فاضلاب را بیش از پیش نمایان می‌نماید.

سیستم‌هایی با هزینه پایین عملکردی: بر خلاف سیستم‌های سنتی در تصفیه‌خانه‌ها که نیازمند انرژی زیادی برای دستگاه‌های هوادهی بود، پیل‌های سوختی میکروبی در فرآیند خود نیازمند انرژی نبوده و حتی انرژی نیز تولید می‌کنند. در صورت استفاده این انرژی برای سیستم‌های جانبی در پیل، می‌توان راندمان عملکردی آن را نیز افزایش داد.

سیستم‌های پراکنده: یکی از ملزومات استفاده از سیستم‌های سنتی تصفیه فاضلاب، استفاده از روش‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب از نقاط مختلف یک منطقه بوده که خود عاملی هزینه‌بر بوده و نیاز به سیستم‌های زیرساخت شهری دارد. اما در سیستم‌های پیل سوختی میکروبی، عملکرد تصفیه می‌تواند به صورت موضعی در کنار خود فرآیندهای تولید فاضلاب قرار گیرد.

آلودگی سیستم‌های تصفیه سنتی: یکی دیگر از مشکل‌های سیستم‌های سنتی، نیاز آن‌ها به عملیات هوازی در محیط است که این عمل اگر در محدوده شهری وجود داشته باشد باعث بوجود آمدن مشکل‌هایی همچون بوی نامطبوع در آن محیط خواهد شد. اما فرآیند تصفیه پیل سوختی میکروبی عملیاتی بی‌هوازی بوده و انتقال بو به محیط نخواهد داشت.

هزینه پایین‌تر زیرساختی: سیستم‌های نوین به‌علت ماهیت عملکرد بی‌هوازی خود، می‌توانند در ابعاد کوچک‌تری به لحاظ سطح زمین مورد نیاز ساخته شوند و همچنین با توجه به موضعی بودن عملیات تصفیه آب، هزینه ساخت و انتقال سیستم‌های تصفیه مرکزی به صفر می‌رسد.

از طرفی یکی از اصلی‌ترین مشکل‌های سیستم‌های نوین، بالا بودن هزینه مربوط به غشای آن‌ها است که یکی از مواردی که نیاز به پژوهش‌های گسترده دارد استفاده از غشاهای کم هزینه یا حتی عدم استفاده از غشا در ساختار پیل‌های سوختی میکروبی می‌باشد.

۵-مسیر پیشرفت جهانی

با توجه به پژوهش‌های جهانی و انتشار پژوهش‌های مختلف در زمینه پیل‌هـای سـوختی میکروبی، اصلی‌ترین موضوع‌هـای مورد بحث در شـکل (۲)، آمده است. همچنین سرعت پیشرفت این زمینه علمی در جهان مشـهود بوده و نشان‌دهنده آینده تصفیه آب در جهان می‌باشد (شکل ۳). موضوع‌هایی در زمینه پیشرفت این فناوری وجود دارد که در این بخش به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

غشـای به کار رفته: در حال حاضر بهترین نوع غشای به‌کار رفته که باعث بیشـینه شـدن راندمان تصفیه می‌گردد، از نوع غشـای نفیون می‌باشـد که با توجـه به نیاز به تعویض آن در بازه‌هایی مشـخص از کارکرد پیل سـوختی میکروبی، هزینه نگهـداری و تعمیرات در این سیستم افزایش و متاثر از آن خواهد بود. در حال حاضر در بخش‌های مختلف جهان پروژه‌هایی در دسـت انجام است. به‌طور مثال در ایران در مجموعه آزمایشـگاه‌های مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه شـهید بهشـتی پروژه‌ای با هدف جایگزینی غشا نفیون با یک غشا با قیمت بسیار پایین‌تر در دست انجام است. این غشا که آن را می‌توان جایگزین مناسـبی برای غشای نفیون معرفی نمود، دانشی به‌روز را با استفاده از تجهیزات ارزان قیمت درهم آمیخته و این محصول کارا را تولید نموده اسـت[۶]. گروهی دیگر از پژوهش‌ها نیز به دنبال حذف این غشـا بوده که در نتیجه آن مشـکل کاهش در راندمان الکتریکی پیل سـوختی میکروبی را به دنبال داشته اما هم‌چنان با هدف تصفیه آب در حال پیشرفت هستند[۷].

اسـتفاده از سوبسـترا (مواد یا فاضلاب ورودی به آند) با ترکیب‌های خـاص: در حال حاضر پژوهش‌هـای زیادی روی تاثیر مواد مختلف بر تـوان تولیدی پیل سـوختی میکروبی وجود دارد کـه موضوع اصلی آن تاثیـر مواد بر عملکرد قارچ‌هـا و همچنین بر مقاومت داخلی پیل سوختی میکروبی خواهد بود. وجود مواد مختلف در سوبسترا می‌تواند از طرفـی بـر مدت زمان موثر عملکرد غشـا تاثیر گذاشـته و نیاز به تعویض غشا را کمتر یا بیشتر نماید[۸].

اسـتفاده از بیوکاتدهـا: اسـتفاده از بیوکاتدهـا یـا بـه عبارتـی گیاهـان در محفظـه کاتـد مزایایی از قبیـل افزایش میزان سـطح اکسـیژن محلـول در کاتـد و مصرف بعضـی مواد غیرآلـی همچون نیتـرات و نیتریـت را در بخـش کاتد بـه ارمغان مـی‌آورد که باعث افزایـش راندمـان تصفیـه فاضـلاب در بخـش کاتـد خواهد شـد. در ایـن زمینـه نوعـی از پیل‌های سـوختی میکروبی از نـوع وتلند یا مردابی در حال تحقیق و پیشـرفت اسـت کـه اصول آن بر وجود گیاهان بنا نهاده شده است[۹].

طراحـی سیسـتم‌های کنترلی کارا جهـت اسـتفاده از خروجی‌های چندین پیل سـوختی میکروبی: از مواردی که مورد تحقیق محققان واقع شـده است طراحی سیسـتم‌های کنترلی جهت استفاده موثر از الکتریسـیته خروجی پیل‌های سوختی میکروبی است. از آن‌جایی‌که خروجی توان هر پیل ثابت و یکنواخت نمی‌باشد و این‌که مقدار آن نیز کم است، در نتیجه با یک سیستم کنترلی مناسب می‌توان از خروجی چندین پیل استفاده نمود به نحوی که خروجی کل یکنواخت و قابل استفاده باشد.

اسـتفاده از آند مناسـب: پژوهش‌های زیادی در مـورد نوع آند مورد اسـتفاده از نظر شـکل و جنس آن، انجام شـده است اما این موضوع همچنان تحت بررسی و بهینه‌سازی است.

افزایش توان خروجی و بالا رفتن راندمان تصفیه - امکان افزایش ابعاد پیل سوختی میکروبی در حد صنعتی

شکل ۲: مهم‌ترین حوزه‌های پژوهشی پیل سوختی میکروبی

شکل ۳: نمودار تعداد پژوهش‌های مرتبط در زمینه پیل سوختی میکروبی به تفکیک سال انتشار

۶- مدل‌سازی پیل سوختی میکروبی با هدف تولید برق و تصفیه فاضلاب

در این بخش با توجه به مقدمات عملکردی شامل مدل‌سازی، ساخت و صحت‌سنجی، پارامترهای خروجی یک نمونه آزمایشگاهی پیل سوختی میکروبی بررسی شده است.

مدل‌سازی: تا به حال مدل‌های زیادی براساس عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی به‌وجود آمده‌اند که بیش‌تر آن‌ها بر اساس بیان معادله‌های دیفرانسیلی هستند که نیازمند انجام محاسبه‌های بالایی بوده اما دقت عملکردی آن‌ها نسبت به مدل‌های ساده‌تر آن‌چنان بیش‌تر نمی‌باشد. همچنین مدل بیان شده در این قسمت با توجه به ملاحظه‌های لازم در مدل‌سازی پیل سوختی میکروبی با هدف بهینه‌سازی‌های بعدی با رویکرد تولید برق و تصفیه فاضلاب انتخاب شده است. این مدل بر اساس پژوهش‌های زنگ و همکاران[۱۰] بیان شده و مزیت آن نسبت به مدل زنگ قابلیت استفاده از سایر غشاهای ساخته شده مثل غشای ارایه شده است که در ادامه نتایج پارامترهای خروجی براساس مدل‌سازی پیشنهادی، بررسی شده است.

در این مدل جریان هر دو قسمت آند و کاتد به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شده‌اند، به‌نحوی که مواد پس از ورود به هر محفظه با سرعتی ثابت از آن خارج می‌گردند. این شاخصه در فرآیند تصفیه فاضلاب از موضوع‌های اصلی می‌باشد و باید به آن توجه نمود. شماتیک این فرآیند در شکل(۴) نشان داده شده است.

شکل ۴: شماتیک پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای پیوسته مطابق مدل زنگ و همکاران[۱۰].

برخلاف اکثر مدل‌ها در این مدل، رشد بیوفیلم بر سطح الکترود آند در نظر گرفته نمی‌شود اما دقت این مدل و سادگی آن، نسبت به سایر مدل‌ها برتری دارد. در این مدل از استات به‌عنوان سوخت مورد استفاده در آند استفاده شده است. بر اثر تجزیه آن توسط میکروارگانیسم‌ها واکنش (۱) به وقوع می‌پیوندد و در طرف دوم پیل سوختی میکروبی یعنی کاتد، واکنش تشکیل آب بر اثر پیوند هیدروژن رسیده از آند، الکترون رسیده از مدار خارجی و اکسیژن موجود در محفظه، مطابق واکنش (۲) شکل می‌گیرد.

$$(CH2O)2 + 2H2O \rightarrow 2CO2 + 8H+ + 8e- \quad (۱)$$

$$O2 + 4e- + 4H+ \rightarrow 2H2O \quad (۲)$$

این دو معادله، معادله‌های اصلی از تغییر رخ داده از دیدگاه مواد، در پیل سوختی میکروبی است. سرعت پیشرفت و غلظت اجزای واکنش، مواردی هستند که مدل‌سازی و روابط مربوط به آن‌ها را تکمیل می‌کند. مدل‌سازی و محاسبه‌های عددی در نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. پس از انجام محاسبه‌های مربوط به مدل در نظر گرفته شده در محیط نرم‌افزار متلب، نخستین نمودار خروجی مدل‌سازی، نمودار تغییر ولتاژ بر حسب جریان پیل است. شکل (۵) مقایسه دو نمودار جریان – ولتاژ مربوط به مدل‌سازی زنگ و همکاران (۵-الف) و مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق (۵-ب)را نشان می‌دهد.

همان‌طورکه مشخص است، به‌جز در ناحیه جریان صفر (مدار باز) تا یک آمپر بر مترمربع سطح آند، در بقیه نقاط مدل‌سازی انجام شده با مدل مرجع هماهنگی و برابری دارد. با توجه به هم‌خوانی سایر نمودارهای وابسته، می‌توان علت این ناهم‌خوانی را وجود مغایرت در روش محاسبات عددی دانست که در بین این دو مدل وجود دارند.

سایر نمودارهای مورد بررسی در مدل‌سازی، در شکل‌های(۶) تا (۹) نشان داده شده است. در شکل (۶)، نمودارهای (الف) و (ب) به‌ترتیب مربوط به مدل مرجع و مدل‌سازی انجام شده، هستند. همان‌گونه که در شکل(۶) قابل مشاهده است، سرعت پیشرفت واکنش آند r_1 و واکنش کاتد r_2 در مدل‌سازی این پژوهش به‌طور کامل مطابق مدل‌سازی زنگ و همکاران است.

در شکل (۷)، نمودار (الف) مربوط به تغییر مقدار استات، کربن دی‌اکسید، اکسیژن و مقدار قارچ (x) موجود در محفظه می‌باشد که در مقاله زنگ و همکاران آمده است. همچنین نمودارهای (ب)، (پ) و (ت) به‌ترتیب مربوط به مقدارهای میزان قارچ موجود در محفظه،

شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایشگاهی الف) مدل‌سازی زنگ[۱۰] ب) مدل‌سازی این پژوهش

شکل ۶ : مقایسه نتایج پیشرفت واکنش‌ها الف) مدلسازی زنگ [۱۰] ب) مدلسازی این پژوهش

شکل ۷: مقایسه نتایج مقادیر پارامترهای محلول الف) مدلسازی زنگ[۱۰] ب)، پ) و ت) مدلسازی این پژوهش

شکل ۸: مقایسه نتایج مقادیر pH دو محفظه الف) مدلسازی زنگ[۱۰] ب) مدلسازی این پژوهش

شکل ۹: مقایسه نتایج دانسیته توان الف) مدل‌سازی زنگ[۱۰] ب) مدل‌سازی این پژوهش

مقدار استات مقدار اکسیژن موجود در محفظه است که در مدل بررسی شده محاسبه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل(۷) نشان داده شده است، نتایج مدل‌سازی در این پژوهش شامل تغییر میزان قارچ در محفظه آند (شکل ۷-ب)، تغییر میزان استات داخل محفظه آند (شکل ۷-پ) و تغییر میزان اکسیژن در محفظه کاتد (شکل ۷-ت) با تقریب خوبی مانند نتایج مدل‌سازی زنگ و همکاران (شکل ۷-الف) است.

شکل ۸- الف) نتایج مربوط به تغییر مقدار اسیدیته محفظه‌های آند و کاتد در مقاله زنگ و همکاران آمده است. شکل ۸- ب) مربوط به مقدارهای اسیدیته در دو محفظه آند و کاتد بوده و نتایج مدل‌سازی این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌گونه‌که قابل مشاهده است، تغییر مقدارهای اسیدیته در محفظه‌های آند و کاتد در مدل‌سازی این پژوهش بسیار مشابه نتایج مدل‌سازی زنگ است.

همچنین در شکل ۹- الف) و ب) به ترتیب تغییر مقدار دانسیته توان در مدل‌سازی زنگ با مدل‌سازی این پژوهش مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده تطابق تغییر دانسیته توان در مدل‌سازی این پژوهش و مدل‌سازی زنگ می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

تصفیه فاضلاب به‌صورت موضعی با کم‌ترین مصرف انرژی امروزه از چالش‌های جامعه شهری می‌باشد. در سیستم‌های پیل سوختی میکروبی هردوی این اهداف قابل تحقق است. همچنین با توجه به قابلیت موضعی بودن تصفیه فاضلاب، مشکل‌های ناشی از سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب در شهرها نیز برطرف می‌گردد. از طرفی شاخص برجسته این سیستم تولید برق، سیستم تصفیه آب بوده که سیستم‌های پر هزینه سنتی را به سیستم‌های بدون هزینه تبدیل خواهد نمود. بر اساس بررسی‌های انجام شده، پژوهش در زمینه پیل‌های سوختی میکروبی و به‌خصوص در مدل‌سازی آن‌ها و در چند سال اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته و رو به گسترش است. در این پژوهش علاوه بر معرفی فناوری پیل‌های سوختی میکروبی به‌عنوان راه‌کاری جهت چالش جهانی تصفیه فاضلاب در جامعه بشری، مدلی ساده بر اساس مدل زنگ و همکاران که از مهم‌ترین مدل‌سازی‌های انجام شده در زمینه پیل‌های سوختی میکروبی است، پیشنهاد شده است. نتایج پارامترهای عملکردی در این مدل ساده پیشنهادی با مدل‌سازی انجام شده توسط زنگ و همکاران مقایسه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این مدل پیشنهادی، تغییر پارامترهای عملکردی بسیار شبیه مدل‌سازی زنگ و همکاران می‌باشد.

۸- مراجع

[1] Z .G .He Zhen ,Fei Zhang" ,Using Microbial Fuel Cells to Treat Raw Sludge and Primary Effluent for Bioelectricity Generation : Final Report.2013 ",

[2] Y .H .Jia et al" ,.Hydrogen production from wastewater using a microbial electrolysis cell ",Korean J .Chem .Eng ,.vol,27 . no ,6 .pp.2010 ,1859–1854 .

[3]V .G .Gude" ,Wastewater treatment in microbial fuel cells-An overview ",J .Clean .Prod ,.vol ,122 .pp.2016 ,307–287 .

[4]S .Yang ,B .Jia ,and H .Liu" ,Effects of the Pt loading side and cathode-biofilm on the performance of a membrane-less and single-chamber microbial fuel cell ",Bioresour .Technol ,.vol. ,100no ,3 .pp.2009 ,1202–1197 .

"[5]Waste and Wastewater Clean-up using Microbial Fuel Cells.2016 ",

[6]S .Eslami" ,Microbial Fuel Cells) Thesis ",(Shahid Beheshti, .2015

[7]A .Amiritabar" ,Cogeneration of energy and wastewater treatment by using Constructed Wetland Microbial Fuel Cell)CWMFC) (Thesis ",(Shahid Beheshti.2018 ,

[8]J .T .Teleken et al" ,.Mathematical Modeling of the Electric Current Generation in a Microbial Fuel Cell Inoculated With Marine Sediment ",Brazilian J .Chem .Eng ,.vol ,34 .no ,1 .pp. .2017 ,225–211

[9]Z .Najafgholi and M .Rahimnejad" ,Improvement of sediment microbial fuel cell performance by application of sun light and biocathode ",Korean J .Chem .Eng ,.vol ,33 .no ,1 .pp. .2016 ,158–154

[10]Y .Zeng ,Y .F .Choo ,B-.H .Kim ,and P .Wu" ,Modelling and simulation of two-chamber microbial fuel cell ",J .Power Sources, vol. 195, no. 1, pp. 79–89, 2010.

***

تاریخ: / / ۱۳۹

درخواست اشتراک نشریه عصر برق

(لطفا کپی این فرم را به‌طور خوانا و دقیق تکمیل فرمایید)

ASR-E-BARQ

شماره اشتراک:

شماره اشتراک قبل:

(مشخصات متقاضی)

نام شرکت/موسسه: .....

نام خانوادگی: .....

نام: .....

شغل: ..... میزان تحصیلات: ..... رشته تحصیلی: .....

استان: ..... شهر: ..... بلوار: ..... خیابان: .....

کوچه: ..... پلاک: ..... طبقه: ..... واحد: ..... کد پستی: .....

صندوق پستی: ..... پست الکترونیک ..... تلفن: .....

نمابر: ..... پیش شماره ..... تلفن همراه: .....

تعداد نسخه در هر نوبت: ☐ ارسال از شماره: ☐ شماره‌های قبلی مورد درخواست: .....

سرویس پست:عادی ☐ سفارشی ☐ ارسال به: نشانی پستی ☐ صندوق پستی ☐

مبلغ واریزی: ..... شماره رسید بانکی: ..... بانک/شعبه: .....

برای برقراری اشتراک نشریه عصر برق، هزینه اشتراک مورد نظر را از جدول زیر انتخاب نموده و به حساب ۴۰۶۵۳۷۹۲۷ نزد بانک تجارت شعبه برق (قابل پرداخت در همه شعب بانک تجارت) به نام نشریه عصر برق واریزو رسید مربوطه را به همراه برگ تکمیل شده درخواست اشتراک به نشانی: مشهد. پردیس دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی گروه برق ارسال فرمایید.

همچنین برای جلوگیری از عملیات پستی و سهولت کار می‌توانید فرم تکمیل شده را به‌وسیله نمابر به شماره ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۸ ارسال فرمایید.

	پست عادی	پست سفارشی
اشتراک یکساله	۲۵۰،۰۰۰ریال	۳۰۰،۰۰۰ ریال

تذکر: اشتراک بیش از یک سال پذیرفته نمی‌شود.

دانشجویان محترم، اساتید گرامی و فرهنگیان عزیز در صورت تمایل می‌توانند مبلغ فوق را پس از کسر ۱۰٪ واریز فرمایند.

نسخه الکترونیکی شماره‌های قبلی نشریه در سایت انجمن موجود است و برای دریافت نسخه چاپی شماره‌های قبلی نشریه به ازای هر شماره مبلغ ۵۰،۰۰۰ ریال به حساب واریز گردد.

اخبـــــار انجمـــــن
شاخه خراسان
Khorasan Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers

مقدمه

با افزایش جمعیت جهان و گسترش صنعت و احساس نیاز به انرژی بیشتر، بشر با مشکلات زیادی مواجه شده است به‌طوری‌که بقای محیط زیست به حفظ تعادل در جهان وابسته بوده و توجه به منابع زیست محیطی و عملکرد آگاهانه در استفاده از آن‌ها اهمیت زیادی پیدا کرده است. فناوری‌های نوین در تمام زمینه‌ها می‌تواند راه‌گشای بسیاری از مشکلات بشر باشد به شرطی‌که تمام پیشرفت‌ها با یک پایداری نسبی همراه گردد که در این میان، فناوری‌های بهره‌برداری ازمنابع انرژی جایگاه ویژه‌ای خواهند داشت.

با این توضیح، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران- شاخه خراسان نیز در راستای اهداف تعیین شده خود همچون سنوات گذشته، بنا دارد چهارمین همایش ملی فناوری‌های نوین انرژی را با همکاری یکی از دانشگاه‌های مشهد در بهار سال ۹۸ برگزار نماید که در ادامه دستاوردهای سه دوره گذشته این همایش را مرور می‌نماییم.

در سال ۱۳۹۱ با هدف بررسی آخرین تحولات در حوزه فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده حداکثری از ظرفیت‌های قانونی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، فرهنگ‌سازی و افزایش مشارکت های مردمی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، نخستین دوره این همایش با همکاری شرکت برق منطقه‌ای خراسان و استانداری خراسان رضوی در نمایشگاه بین‌المللی مشهد کلید خورد و پس از آن برگزاری دوسالانه همایش ملی فناوری‌های نوین انرژی، از سوی دبیرخانه دائمی آن، به انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران- شاخه خراسان واگذار گردید. دومین دوره این همایش هم‌زمان با نمایشگاه صنعت برق در خردادماه ۱۳۹۳ توسط این انجمن و همکاری شرکت برق منطقه‌ای خراسان و نمایشگاه بین‌المللی مشهد، با حضور بیش از ۴۰۰ نفر شرکت‌کننده و اساتید برجسته‌ای همچون دکتر گئورک قره‌پتیان، دکتر سید هاشم اورعی و دکتر مجتبی جودکی و ... بسیار با شکوه برگزار گردید. سومین دوره آن نیز توسط انجمن و با همکاری دانشگاه صنعتی سجاد در دی‌ماه سال ۱۳۹۵ همچنان با حضور حداکثری شرکت‌کنندگان در این دانشگاه برگزار شد. از جمله سخنرانان برجسته این دوره نیز می‌توان به دکتر محمد شاهیده‌پور، دکتر سید هاشم اورعی، دکتر گئورک قره‌پتیان، دکتر سید محمد صادق‌زاده و دکتر حبیب رجبی مشهدی اشاره کرد.

در برگزاری این همایش‌ها، همواره سازمان‌ها، شرکت‌ها، دانشگاه‌ها و موسسات زیادی همکاری داشته‌اند که در اینجا ضمن تشکر و قدردانی از مشارکت و همراهی آنها، نام برده می‌شوند:

شرکت سهامی مدیریت تولید، انتقال و توزیع برق ایران (توانیر)، شرکت برق منطقه‌ای خراسان، استانداری خراسان رضوی، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان خراسان رضوی، شرکت مخابرات منطقه خراسان رضوی، سازمان نظام مهندسی استان خراسان رضوی، شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد، شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی، ماهنامه تخصصی امواج برتر، شرکت نیان الکترونیک، شرکت پارت لاستیک، شرکت منیران، شرکت الکتروپژواک آرین، شرکت صنایع کیان‌ترانسفو، شرکت ارتباطات پرتو آبی، شرکت نیان باتری خاوران، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشگاه صنعتی سجاد، دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)، موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری، موسسه آموزش عالی خراسان و ...

محورهای همایش

با توجه به اهداف کلی درنظر گرفته شده در هر دوره، می‌توان محورهای همایش را به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- محیط زیست و تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر
۲- اقتصاد فناوری‌های نوین انرژی و چالش‌های پیش‌رو
۳- فناوری‌های نوین روشنایی و هوشمندسازی ساختمان
۴-اتوماسیون در صنعت برق و امنیت سایبری
۵-کاهش تلفات، مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری
۶- کارآفرینی و مهندسی حرفه‌ای

نتایج

از جمله نتایجی که از برگزاری این سه دوره همایش گرفته شده است می‌توان به طور خلاصه به موارد زیر اشاره کرد:

۱- ضرورت حمایت از مشترکین خانگی برای استفاده از مولدهای خورشیدی و استفاده از وسایل پربازده
۲- اصلاح و کاهش طول خطوط شبکه‌های فشار ضعیف و استفاده از سیستم‌های هوشمند اندازه‌گیری
۳- افزایش سهم اعتبارات تحقیقاتی به دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی با اولویت انرژهای تجدیدپذیر، اتوماسیون و هوشمندسازی
۴- تدوین سبد انرژی متناسب با شرایط و محدودیت‌های کشور از جمله کاهش آلایندگی، پدافند غیرعامل، کارآفرینی، تامین انرژی
۵- تثبیت قوانین و مقررات حمایتی، اعتمادسازی و فرهنگ‌سازی برای جلب نظر سرمایه‌گذاران بخش خصوصی و خارجی در زمینه انرژی‌های تجدید پذیر
۶- بازنگری فرهنگ بهینه‌سازی مصرف و به خصوص مصرف برق
۷- تاکید بر موضوع ذخیره‌سازی انرژی به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر
۸- توسعه پاسخگویی بار به‌عنوان یکی از الزامات شبکه‌های هوشمند

کشور جمهوری اسلامی ایران، یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان در بخش انرژی های فسیلی و تجدیدپذیر بوده است و در صورت استفاده صحیح از این نعمت‌های خدادادی می‌تواند یکی از موفق‌ترین کشورهای جهان در این بخش بوده و علاوه بر کسب سودهای مادی و معنوی، رفاه اجتماعی قابل قبولی را ایجاد نماید که به دلایل مختلف و کم و بیش معلوم این مهم محقق نشده است. تحقق این اهداف یک عزم ملی را می‌طلبد که امیدواریم همایش‌هایی از این قبیل مقدمه‌ای برای ایجاد این اراده ملی باشد.

***

مرکز آموزشهای آزاد
دانشگاه صنعتی سجاد

دوره های آموزشی تخصصی
مهندسی - صنعتی - مدیریتی
ویـژه فراگـیران و سـازمان ها

فعالیت‌های انجام شده و دوره‌های برگزار شده و در حال برگزاری توسط مرکز آموزش‌های آزاد دانشگاه صنعتی سجاد:

- دوره‌های ارتقا پایه و تمدید پروانه سازمان نظام مهندسی خراسان
- دوره‌های بازآموزی کارمندان استانداری خراسان
- همایش مدیریت پروژه
- دوره مقدماتی نرم‌افزار متلب
- پردازش سیگنال بیولوژیکی و تحلیل آن در متلب
- پردازش تصویر با OpenCV و Python
- دوره تخصصی FPGA
- پرزانته دیجیتال برای معماران
- نرم‌افزار Revit Architecture
- پرورش تحلیلگر کسب وکار (Business Analyst) بر اساس استاندارد BABOK کانادا
- دوره پیشرفته نرم‌افزار اسکچاپ (SketchUp) مدل‌سازی و رندرینگ
- دوره تعمیرات تجهیزات پزشکی بیمارستانی و کلینیکی
- سمینار حلقه گمشده موفقیت
- دوره مقدماتی میکروکنترلر های آرم
- برنامه‌نویسی iOS و swift
- سلسله نشست‌های TEDX

مرکز آموزش‌های آزاد دانشگاه سجاد علاوه بر برگزاری مداوم دوره‌های فوق، دوره‌های ذیل را نیز به زودی برگزار می‌کند:

دوره‌های آینده:

- آموزش کاربردی پست‌های قدرت پیشرفته ۱ و ۲
- دوره پیشرفته متلب برای دانشجویان قدرت، کنترل، الکترونیک و مخابرات
- شبکه‌های عصبی و آموزش برنامه نویسی در متلب
- شبکه‌های عصبی عمیق
- پردازش تصویر
- طراحی نیروگاه خورشیدی و آموزش نرم‌افزار PVsyst
- دوره مقدماتی نرم‌افزار solidworks
- توسعه شخصیتی برای رسیدن به موفقیت در زندگی شخصی و کسب و کار
- هوش تجاری با نرم‌افزار Tableau
- طراحی سازه‌های فولادی با نرم‌افزار ETABS
- دوره اتوکد دوبعدی

مراسم دریافت مجوز فنی و حرفه‌ای با حضور رییس سازمان فنی و حرفه‌ای کشور و معاون وزیر تعاون، کار و رفاه اجتماعی

بلوار جلال‌آل‌احمد ۶۴، دانشگاه صنعتی سجاد
ساختمان مهندسی برق و مهندسی پزشکی

OLC.Sadjad.ac.ir | ۰۵۱- ۳۶۰۲۹۳۰۵
@OLC_Sadjad | ۰۹۰۲ ۴۲۰ ۵۰۰۲

انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران
IAEEE

انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران – شاخه خراسان برگزار می‌کند:

چهارمین همایش فناوری‌های نوین انرژی

بهار ۱۳۹۸-مشهد

محورهای کلی همایش

- محیط زیست، تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر
- اقتصاد فناوری‌های نوین برق و چالش‌های پیش‌رو
- فناوری‌های نوین روشنایی و هوشمندسازی ساختمان
- اتوماسیون در صنعت برق و امنیت سایبری
- کاهش تلفات، مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری
- کارآفرینی و مهندسی حرفه‌ای

دبیرخانه دائمی همایش
مشهد، بلوار وکیل‌آباد، نبش بلوار امامت، مجموعه فرهنگی ورزشی شرکت برق منطقه‌ای خراسان
تلفن: ۳۶۱۰۳۸۵۷-۰۵۱ نمابر: ۳۶۱۰۳۸۵۸-۰۵۱

NIAN ELECTRONIC
نیان الکترونیک

طراح وتولیدکننده مبدل های الکترونیکی انرژی الکتریکی

Power Conversion Systems

اینورترخورشیدی، کانورترتوربین بادی، کولرآبی با موتور BLDC
شارژرخودروهای الکتریکی، سیستم ذخیره ساز انرژی(ESS)،
منابع تغذیه سوئیچینگ، سیستم های بهبود کیفیت توان، سیستم تغذیه هیبریدو...

دانشی فراتر از اکنون
فناوری ۱۰۰ درصد ایرانی

- برترین شرکت خصوصی فناور و نوآور کشور منتخب پنجمین دوره جایزه ملی مدیریت فناوری و نوآوری در سال ۱۳۹۶
- واحد نمونه صادراتی کشور در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶ / رتبه یک توسعه کسب و کارهای نوآورانه سال ۱۳۹۵
واحد نمونه تولید و پشتیبانی و کارآفرین نمونه سال ۱۳۹۲ منتخب وزارت ارتباطات و فن آوری اطلاعات (فاوا)
- برترین واحد تحقیق و توسعه کشور منتخب وزارت صنعت، معدن و تجارت در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵
- برترین شرکت فن آفرین کشور منتخب دوازدهمین جشنواره ملی فن آفرینی شیخ بهایی در سال ۱۳۹۵
- تندیس طلایی رعایت حقوق مصرف کنندگان به صورت متوالی از سال ۱۳۹۰ تاکنون
- و ...

www.nianelectronic.com
nian_electronic

انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران
IAEEE

انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران - شاخه خراسان

Khorasan Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers

تصاویری از بازدیدهای انجام شده توسط انجمن

- مشهد، بلوار وکیل‌آباد، نبش بلوار امامت، مجموعه فرهنگی ورزشی شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- تلفن: ۳۶۱۰۳۸۵۷-۰۵۱
- نمابر: ۳۶۱۰۳۸۵۸-۰۵۱
- وب سایت انجمن: **www.kiaeee.ir**
- پست الکترونیک: **info@Kiaeee.ir**

دانشگاه صنعتی سجاد

دانشگاه صنعتی سجاد فعالیت آموزشی خود را از سال ۱۳۷۴ با کسب مجوز از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری آغاز کرد. این دانشگاه به‌عنوان تنها دانشگاه صنعتی در مشهد، به پشتوانه ۲۲ سال تلاش و تجربه با بیش از ۵۰۰۰ دانشجو در مقاطع تحصیلی دکترا(۲رشته)، کارشناسی ارشد(۱۶رشته) و کارشناسی پیوسته و ناپیوسته (۲۲ رشته) از جایگاه برجسته‌ای در میان دانشگاه‌های صنعتی کشور برخوردار است.

دانشکده‌ها

دانشکده برق و مهندسی پزشکی

دانشکده کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشکده عمران، معماری و شهرسازی

دانشکده صنایع و مدیریت

دانشکده مکانیک و مواد

برگزاری همایش‌ها و کنفرانس‌ها

- بیست و ششمین دوره کنفرانس برق ایران (ICEE2018)
- سومین همایش فناوری‌های نوین انرژی (ncmet2017)
- همایش مدیریت پروژه با رویکرد PMBOK
- و ...

دفتر ارتباط با صنعت

در راستای ارتباط منطقی و پایدار بین ظرفیت‌های دانشگاه و نیازهای بخش‌های مختلف جامعه (صنعتی، خدماتی و ...) و ارتقاء دستاوردهای علمی و فناوری، دفتر ارتباط با صنعت دانشگاه صنعتی سجاد از سال ۱۳۸۲فعالیت خود را به‌عنوان یکی از دفاتر تحت نظر معاونت پژوهشی دانشگاه آغاز نمود. درحال حاضر تمرکز فعالیت‌های این دفتر در سه حوزه کارآموزی، طرح‌های پژوهشی تقاضامحور و پایان‌نامه‌های کاربردی می‌باشد و همکاری نزدیکی با سایر بخش‌های معاونت پژوهشی و مرکز تحقیقات سجاد دارد.

مرکز آموزش‌های آزاد دانشگاه صنعتی سجاد

- برگزاری دوره‌های با کیفیت مطابق با نیاز بازار
- افزایش مهارت‌های کاربردی دانشجویان
- ایجاد انگیزه و توانمندسازی دانشجویان

مرکز تحقیقات سجاد

مرکز تحقیقات دانشگاه صنعتی سجاد با بیش از ۲۵ سال سابقه فعالیت در زمینه مهندسی و خدمات مشاوره‌ای به مراکز مختلف صنعتی و آموزشی، یکی از بزرگترین شرکت‌های تحقیقاتی موجود در خراسان محسوب می‌شود. مرکز تحقیقات سجاد از کلیه ظرفیت‌ها و پتانسیل دانش و تجربه در کادر هیات علمی دانشگاه و همچنین دانشجویان مستعد در زمینه‌های مختلف بهره‌مند می‌باشد.

نشانی : مشهد.
بلوار جلال آل احمد۶۴،
دانشگاه صنعتی سجاد

تلفن: ۳۶۰۲۹۰۰۰-۰۵۱
فکس: ۳۶۰۲۹۱۱۰-۰۵۱

کدپستی:۹۱۸۸۱۴۸۸۴۸
پست الکترونیک: info@sadjad.ac.ir

www.sadjad.ac.ir

Olc.sadjad.ac.ir

src.sadjad.ac.ir