

# مدیریت انرژی ریزشبه‌ها و جبران‌سازی هارمونیک آنها از طریق فیلتر اکتیو موازی مبتنی بر سیستم‌های چندعاملی

محمدرضا صالحی راد و محمد ملائی امامزاده

می‌توان به مدیریت انرژی، جبران کمبود توان و نیز حفظ تعادل تولید و مصرف در شرایط اتصال و یا عدم اتصال به شبکه قدرت اشاره کرد. تا کنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه ریزشبه‌ها انجام گردیده که بخشی از تحقیقات، مربوط به کنترل‌کننده‌های ادوات الکترونیک قدرت در ریزشبه است. در [۳] یک کنترل‌کننده مقاوم برای میکروتوربین‌ها و الکترولایزرهای استفاده‌شده در ریزشبه با هدف کنترل فرکانس ارائه گردیده است. در [۴] برای رفع مشکل نوسانات توان در یک ریزشبه، یک کنترل‌کننده PID فازی برای کنترل الکترولایزر پیشنهاد شده است. از طرف دیگر در اکثر مطالعاتی که در زمینه مدیریت و استراتژی کنترلی ریزشبه‌ها ارائه شده است، بحث مدل‌سازی تجهیزات، بسیار کم‌رنگ و بیشتر تمرکز بر ارائه روش مدیریتی بوده است [۵] تا [۸].

در بیشتر سیستم‌ها استراتژی‌های مدیریت انرژی ریزشبه‌ها بر اساس ساختار متمرکز طراحی شده است [۵] تا [۷]؛ اما با رشد سریع ریزشبه‌ها در شبکه‌های قدرت و افزایش تعداد آنها و همچنین به دلیل وجود مولدها و انواع بارهای مختلف، استفاده از روش‌های کنترل و مدیریت متمرکز به دلیل افزایش هزینه‌های ارتباطی و مخابراتی، مقرون به صرفه نیستند [۸] و [۹]. از طرفی سیستم‌های کنترل متمرکز با هر تغییری در شبکه نیاز به تجدید ساختار و به‌روزرسانی دارند [۹]. از آنجا که سیستم‌های چندعاملی بر پایه ساختار کنترل غیرمتمرکز طراحی می‌شوند، برای کنترل و مدیریت انرژی ریزشبه‌ها مقاوم‌تر، مقرون به صرفه‌تر و برخوردار از پیچیدگی کمتری هستند و همچنین عیب‌یابی، اصلاح و اعمال تغییرات در یکی از قسمت‌ها راحت‌تر انجام می‌شود [۱۰] و [۱۱]. بنابراین در سال‌های اخیر، بیشتر روش‌های کنترل مدیریت انرژی ریزشبه‌ها به سمت سیستم‌های غیرمتمرکز چندعاملی رفته است. در [۱۲] یک سیستم سلسله‌مراتبی سه‌لایه شامل لایه نظارتی، لایه بهینه‌سازی و لایه اجرایی برای کنترل ریزشبه پیشنهاد شده است. در [۱۳] از دو کنترل‌کننده که به صورت Master/Slave طراحی شده‌اند، برای مدیریت یک ریزشبه با مولدهای توربین بادی، خورشیدی و باطری استفاده گردیده و همچنین از روش‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک، کنترل‌کننده منطبق فازی و بهینه‌ساز الگوریتم پرندگان برای سیستم‌های مدیریت انرژی استفاده شده است. به طور مثال در [۱۴] از الگوریتم ژنتیک برای مدیریت و بهینه‌سازی تولید در یک ریزشبه که شامل چندین نوع مولد انرژی است، استفاده گردیده و همچنین در [۱۵] منطبق فازی برای بهینه‌سازی عملکرد مولدهای ریزشبه به کار گرفته شده است. در این مقاله از یک روش جدید جهت مدیریت انرژی در ریزشبه بهره گرفته شده است. این توپولوژی که ماشین میلی نام دارد، ضمن تأمین توان مورد نیاز بارهای شبکه، باعث کنترل توان تبادلی بین ریزشبه و شبکه در محدوده مشخصی می‌شود تا خطوط انتقال بر اثر افزایش توان تبادلی آسیب نبینند.

چکیده: در این مقاله با استفاده از فیلتر اکتیو موازی، یک استراتژی جدید مدیریت انرژی در ساختار چندعاملی ارائه می‌شود. این استراتژی به یک ریزشبه AC متصل به شبکه اعمال گردیده و مسأله جبران‌سازی هارمونیک را نیز شامل می‌شود. با بررسی مزایا و معایب فیلترهای اکتیو موازی و فیلترهای پسیو و همچنین کارایی آنها در ساختار چندعاملی برای ریزشبه‌های قدرت، علت استفاده از فیلتر اکتیو موازی در روش پیشنهادی مشخص شده است. همچنین عملکرد این فیلترها جهت جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان با بررسی نتایج FFT مورد مقایسه قرار گرفته است. در ریزشبه مورد استفاده از مولد توربین بادی و مولد سلول‌های خورشیدی به عنوان منابع تجدیدپذیر و برای جبران تغییرات ناگهانی و برنامه‌ریزی‌نشده در توان تولیدی این دو مولد، دو پیل سوختی استفاده می‌شود. واحد مدیریت انرژی با توجه به توان تولیدی و توان مصرفی ریزشبه، وضعیت فعال و غیرفعال بودن دو پیل سوختی را به نحوی مدیریت می‌کند که توان تبادل‌شده بین ریزشبه و شبکه اصلی در بازه قابل قبولی محدود باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی با استفاده از کنترل‌کننده‌های پیوسته محلی (در هر عامل) و کنترل‌کننده گسسته مرکزی (سیستم مدیریت انرژی) توانسته که عملکرد مناسبی داشته باشد و ضمن تأمین توان مورد نیاز ریزشبه، هم‌زمان مسأله جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان را به درستی انجام دهد.

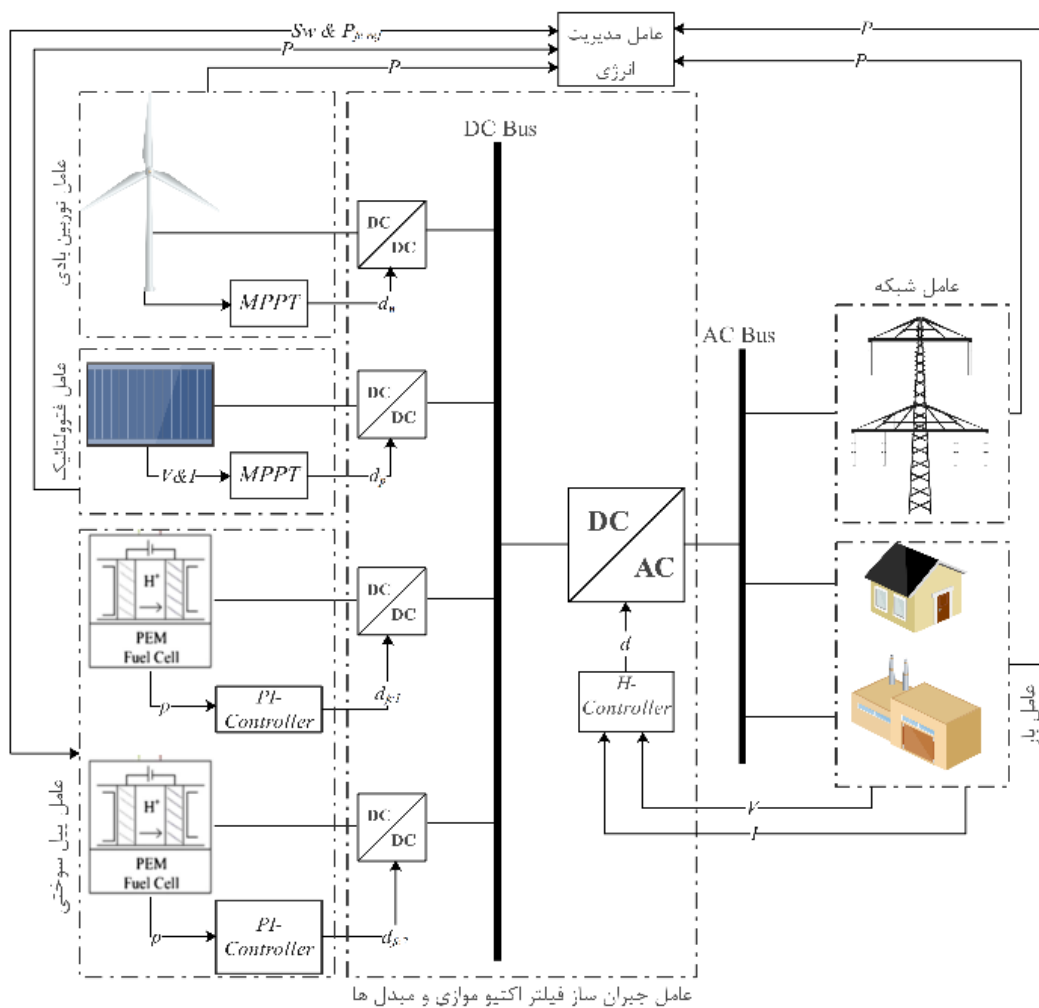
کلیدواژه: جبران‌سازی هارمونیک جریان، سیستم‌های چندعاملی، فیلتر اکتیو موازی، فیلتر پسیو SC-RC-LCL، مدیریت انرژی.

## ۱- مقدمه

به مجموعه‌ای از مولدهای انرژی شامل توربین بادی، مولد خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و پیل‌های سوختی که انرژی مورد نیاز یک بار را با استفاده از یک سیستم غیرمتمرکز در هر دو حالت مستقل از شبکه و متصل به شبکه می‌تواند تأمین نماید، ریزشبه گویند [۱]. ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر مانند منابع خورشیدی و بادی که قابلیت برنامه‌ریزی و پیش‌بینی ضعیفی دارند با منابع تجدیدپذیری که کاملاً قابل برنامه‌ریزی هستند، توانسته که امکان استفاده از مزایای انرژی‌های تجدیدپذیر را در شبکه‌های قدرت فراهم آورد. در واقع استفاده از پیل سوختی به عنوان یک منبع پشتیبان در کنار مولدهای خورشیدی و بادی، پایداری یک ریزشبه را افزایش می‌دهد [۲]. از موارد مهم در استفاده از ریزشبه‌ها

این مقاله در تاریخ ۱۳ دی ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۱۷ شهریور ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

محمدرضا صالحی‌راد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، (email: m.salehirad2020@gmail.com).  
محمد ملائی امامزاده (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، (email: molaie@uk.ac.ir).



عامل جریان ساز فیلتر اکتیو موازی و میدل ها

شکل ۱: ساختار سیستم چندعاملی پیشنهادی شبکه جهت کنترل و جبران سازی هارمونیک به روش فیلتر اکتیو موازی.

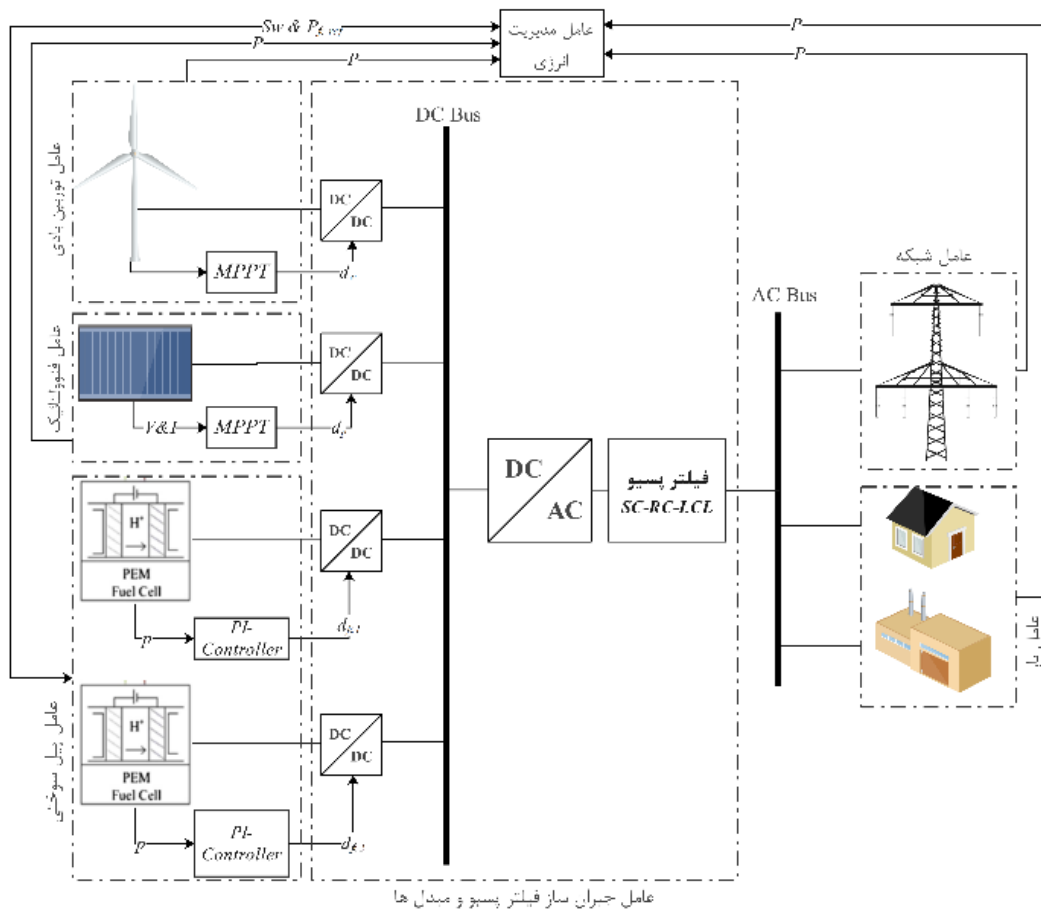
وجود بارهای هارمونیک موجب اشغال ظرفیت میدل ها می شود، بنابراین کنترل و مدیریت انرژی یک ریزشبه بدون در نظر گرفتن محدودیت های ناشی از هارمونیک می تواند موضوع را دور از واقعیت قرار دهد. در این مقاله، ضمن در نظر گرفتن هارمونیک های شبکه، از دو دیدگاه گسسته و پیوسته به مسئله کنترل و مدیریت انرژی نگاه شده و سیستم چندعاملی پیشنهاد شده، توانسته تا با هماهنگی بین دینامیک پیوسته و دینامیک گسسته سیستم، به خوبی کنترل و جبران سازی هارمونیک را برای ریزشبه انجام دهد.

## ۲- بیان مسئله

به منظور حفظ پایداری، انطباق پذیری و استقلال ریزشبه از یک سیستم چندعاملی مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده شده است. شکل های ۱ و ۲، ساختار سیستم چندعاملی را که برای کنترل و جبران سازی هارمونیک ریزشبه به کار رفته اند نشان می دهند. این سیستم با هدف تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز بار با در نظر گرفتن محدودیت های محیطی و متغیرهای سیستمی ایجاد شده است. انرژی تولیدی در یک ریزشبه از منابع تجدیدپذیر تأمین می گردد و چون این منابع تجدیدپذیر وابسته به شرایط محیطی بوده و مقدار تولید آنها کاملاً متغیر است، بنابراین تولید انرژی و تأمین نیاز مصرف کننده در یک ریزشبه، شرایطی متغیر دارد؛ لذا لازم است تا با هر تغییری در شرایط محیطی سیستم، ساختار ریزشبه متناسب با شرایط جدید بازآرایی شود. از طرفی، جهت حفظ استقلال ریزشبه در حالت متصل به شبکه، توان تبادلی بین

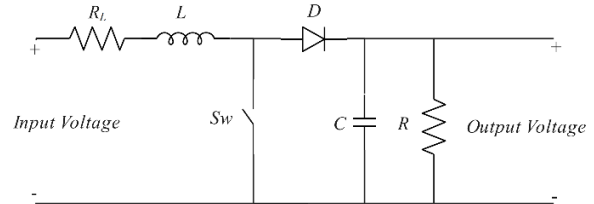
بارهای غیرخطی در اتصال با یک شبکه قدرت نیز می توانند موجب بروز اغتشاشات در ولتاژ و جریان شبکه شوند که اثر آن می تواند بر ریزشبه های متصل به شبکه قدرت در مواردی، بسیار شدید باشد [۱۶]. از جمله مشکلاتی که یک بار غیرخطی می تواند در ریزشبه ها ایجاد کند، بروز اغتشاشات هارمونیک است. در سال های اخیر، روش های مختلفی برای جبران سازی هارمونیک استفاده گردیده که یکی از روش های مؤثر و کاربردی، استفاده از سیستم های چندعاملی و سلسله مراتبی برای جبران سازی هارمونیک می باشد [۱۷] تا [۱۹].

در بیشتر مطالعاتی که در زمینه مدیریت انرژی و جبران سازی هارمونیک ریزشبه ها انجام شده است، تمرکز بر ارائه استراتژی کنترلی بوده و توجه کمتری به مدل سازی ها و رفتارهای دینامیکی ادوات و تجهیزات ریزشبه گردیده است؛ در حالی که برای مدیریت انرژی و جبران سازی هارمونیک ها در یک ریزشبه، نیاز به مطالعه تمام بخش های ریزشبه با در نظر گرفتن ویژگی های دینامیکی و فیزیکی مربوط به مولدها و میدل های قدرت است. بنابراین در این مقاله، جبران سازی و مدیریت انرژی ریزشبه با دقت کافی نسبت به رفتارها و ویژگی های دینامیکی و فیزیکی تجهیزات انجام شده و استراتژی کنترلی با مدل سازی واقعی تر از یک ریزشبه مورد بررسی قرار گرفته است. مدل سازی میدل های میدل های خورشیدی، بادی و پیل سوختی از مدل هایی با جزئیات دینامیکی استفاده گردیده است. همچنین یکی از موارد مهم در کنترل ریزشبه ها، مسئله ظرفیت میدل هاست. از آنجا که در شبکه های واقعی،



شکل ۲: ساختار سیستم چندعاملی پیشنهادی شبکه جهت کنترل و جبران‌سازی هارمونیک به روش فیلتر پسیو SC-RC-LCL.

بادی، پیل سوختی و بارهای خطی و غیرخطی می‌باشد. همان طور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، بار متصل به شبکه پیشنهادی ترکیبی از یک بار خطی متغیر و یک بار غیرخطی است که طیف هارمونیک مختلفی را تولید می‌نماید. در این بخش به بیان عوامل مختلف ریزشکبه پرداخته می‌شود.



شکل ۳: مدل یک مبدل بوست DC/DC.

### ۱-۳ عامل جبران‌ساز فیلتر اکتیو موازی و مبدل‌ها

مبدل DC/DC وظیفه تنظیم توان مورد نیاز مصرف‌کننده با راندمان بالا را دارد. در شکل ۳ مدل یک مبدل بوست DC/DC نشان داده شده که دینامیک این مدل با دو معادله غیرخطی در [۲۰] آمده است. شکل ۴ مدل و ساختار کنترلی مبدل منبع ولتاژ DC/AC و فیلتر اکتیو موازی را که جهت جبران‌سازی هارمونیک استفاده شده است، نشان می‌دهد [۲۱]. فیلترهای قدرت اکتیو موازی با تزریق توان اکتیو با فرکانس ثابت اما با فاز معکوس باعث حذف هارمونیک‌ها در ریزشکبه‌ها می‌شوند. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، جهت تعیین جریان مرجع در حوزه DQ از یک DQ<sup>+</sup> استفاده شده است [۲۲]. همچنین ولتاژهای جریان‌های سه‌فاز AC خروجی مبدل و ولتاژهای باس AC سیستم به صورت  $V_{sa}$ ،  $V_{sb}$  و  $V_{sc}$  نشان داده شده‌اند.

مدل دینامیکی این مبدل را می‌توان به صورت (۱) نشان داد [۲۲]

$$\frac{di_k}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_k + \frac{1}{L_f} (v_{ik} - v_{sk}) \quad (1)$$

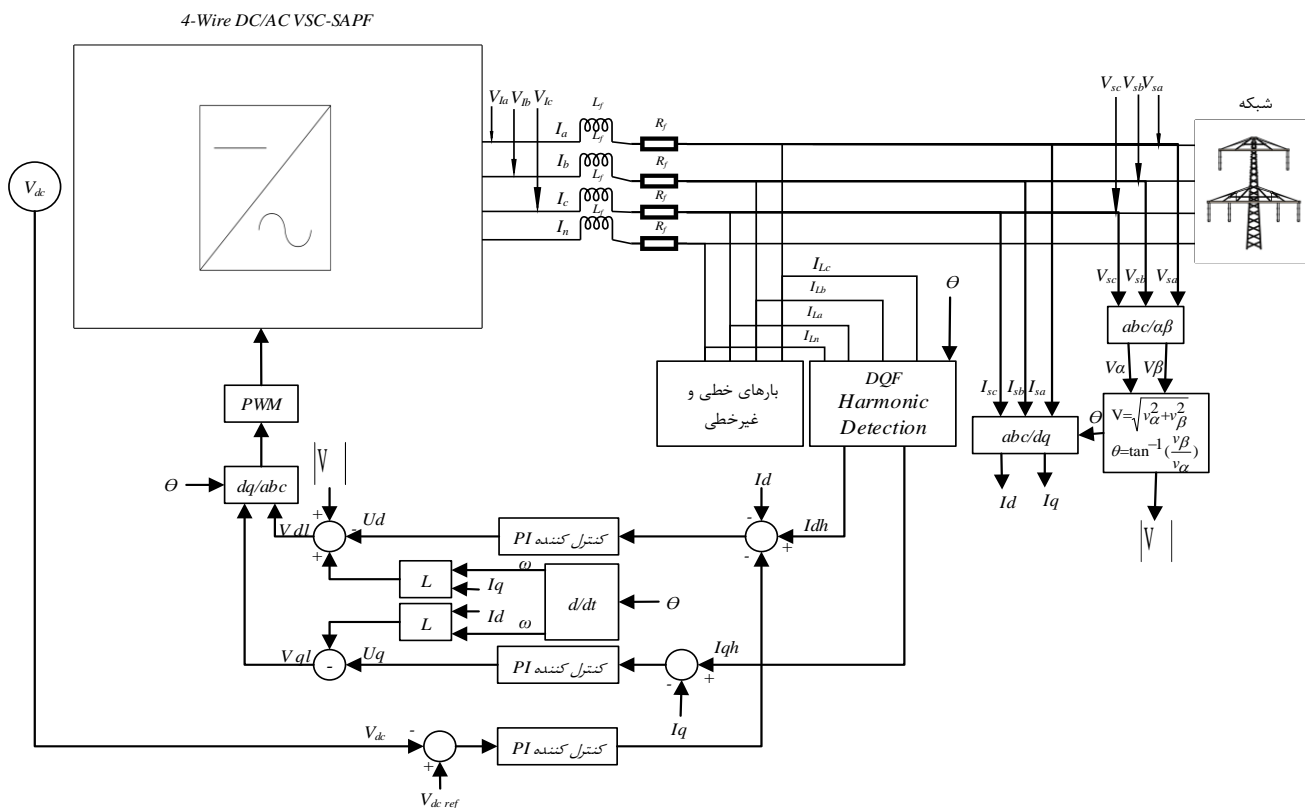
1. DQ Axis with Fourier

ریزشکبه و شبکه نیز دارای اهمیت است زیرا افزایش این توان باعث آسیب به خطوط انتقال می‌شود.

سیستم کنترل چندعاملی پیشنهادی با در اختیار داشتن عوامل مختلف می‌تواند به طور هوشمندانه‌ای تغییرات محیطی و سیستمی را در ریزشکبه شناسایی نموده و با ارسال سیگنال مناسب به واحدهای مدیریت انرژی، تصمیمات صحیحی نسبت به شرایط بهره‌برداری ریزشکبه ارائه دهد؛ به طوری که اثرات ناپایداری منابع انرژی در ریزشکبه حداقل شود. برای سیستم چندعاملی پیشنهادی، یک واحد مرکزی مدیریت انرژی به همراه ۶ زیرعامل در نظر گرفته شده که هر یک از این عامل‌ها به طور محلی، سیستم تحت نظارت خود را کنترل و پایش می‌نمایند. از طرفی این عامل‌های محلی به طور سلسله‌مراتبی با واحد مدیریت و تصمیم‌گیری که در سطح بالاتر قرار دارد در ارتباط بوده و مدیریت انرژی و هماهنگی بین بخش‌ها بر اساس سیگنال‌های دریافتی از عامل‌ها انجام می‌شود.

### ۳- ساختار پیشنهادی و مدیریت انرژی

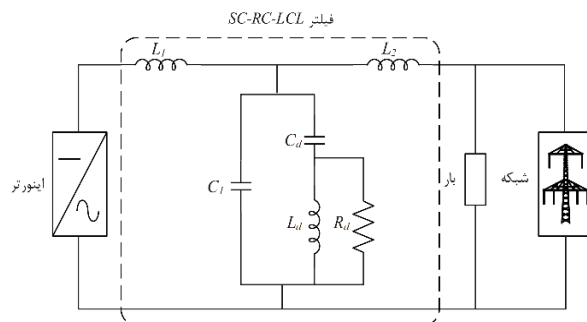
ریزشکبه پیشنهادی در این مقاله از نوع AC و متصل به شبکه است که متشکل از منابع تولید انرژی تجدیدپذیر شامل مولد خورشیدی، توربین



شکل ۴: مدل و ساختار کنترلی مبدل منبع ولتاژ DC/AC و فیلتر اکتیو موازی.

جدول ۱: مشخصات فیلتر پسیو SC-RC-LCL.

مشخصات	مقدار / واحد
اندوکتانس، $L_1$	۶۴٫۵ میکروهانری
اندوکتانس، $L_2$	۶۴٫۵ میکروهانری
اندوکتانس، $L_d$	۱۲۹٫۳ میکروهانری
خازن، $C_d$	۶۸٫۵ میکروفاراد
خازن، $C_1$	۶۸٫۵ میکروفاراد
مقاومت، $R_d$	۰٫۹۷ اهم



شکل ۵: ساختار فیلتر پسیو SC-RC-LCL در اتصال به شبکه.

### ۳-۱-۲ معایب فیلترهای اکتیو موازی

فیلتر اکتیو موازی دارای معایبی نیز می‌باشد که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۳]:

- عدم امکان جبران‌سازی در صورت وجود هارمونیک‌های جریان و ولتاژ به صورت هم‌زمان
- عدم استفاده برای بارهای کوچک در سیستم‌های قدرت
- گران‌تر بودن نسبت به فیلترهای پسیو

### ۳-۲ عامل جبران‌سازی فیلتر پسیو SC-RC-LCL و مبدل‌ها

امروزه از انواع مختلف فیلترهای پسیو نیز به منظور جبران‌سازی هارمونیک‌ها در شبکه‌های قدرت استفاده می‌شود [۲۴].

جبران‌سازی هارمونیک‌ها در روش پسیو، انواع متفاوتی دارد که در این مقاله از آرایش SC-RC-LCL استفاده گردیده که از روش‌های پیشرفته پسیو می‌باشد [۲۵]. این آرایش در شکل ۵ نمایش داده شده و همچنین مقادیر پارامترهای آن نیز پس از محاسبات در جدول ۱ آمده است. در این مقاله، علی‌رغم جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان با روش فیلتر اکتیو موازی، به جبران‌سازی به روش پسیو در یک بازه مشخص پرداخته شده تا عملکرد دو روش مقایسه گردد.

که  $k = \{a, b, c\}$  و  $R_f$  و  $L_f$  نیز به ترتیب مقاومت و اندوکتانس خط فیلتر اکتیو هستند. با استفاده از تبدیل پارک می‌توان نوشت

$$v_{id} = R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - L_f \omega i_q + v_{sd} \quad (2)$$

$$v_{iq} = R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} + L_f \omega i_d + v_{sq} \quad (3)$$

که  $\omega$  سرعت زاویه‌ای سیستم AC،  $v_{id}$ ،  $v_{iq}$ ،  $i_d$  و  $i_q$  به ترتیب ولتاژها و جریان‌های مربوط به محورهای  $d$  و  $q$  و همچنین  $v_{sd}$  و  $v_{sq}$  ولتاژهای باس AC سیستم هستند.

### ۳-۱-۱ مزایای فیلترهای اکتیو موازی

از مزایای فیلتر اکتیو موازی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۳]:

- کاهش اثرات هارمونیک‌ها با مرتبه‌های مختلف
- تنظیم ولتاژ خازن لینک DC
- جبران‌سازی توان راکتیو
- کاهش نوسانات توان
- تنظیم‌کننده ولتاژ

$$C_{ph} = \int_0^T V_{L_{ph}}(t) \cos(\omega t) dt \quad (۶)$$

$$D_{ph} = \int_0^T V_{L_{ph}}(t) \sin(\omega t) dt \quad (۷)$$

که  $V_{L_{ph}}(t)$  و  $I_{L_{ph}}(t)$  ( $ph = \{a, b, c\}$ ) به ترتیب ولتاژ و جریان هر فاز در نقطه اتصال شبکه به مصرف کننده است. در این صورت جریان مؤلفه حقیقی فرکانس پایه جریان در هر فاز را می توان به صورت رابطه زیر استخراج نمود

$$I_{D_{ph}} = K_{ph} \cos(\varphi_{ph}) \sin(\omega t + \beta_{ph} + \theta) \quad (۸)$$

به طوری که زاویه  $\theta$  برای فازهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  به ترتیب صفر،  $2\pi/3$  و  $4\pi/3$  می باشد و مقادیر  $K_{ph}$ ،  $\varphi_{ph}$ ،  $\alpha_{ph}$  و  $\beta_{ph}$  از روابط زیر محاسبه می شوند

$$K_{ph} = \sqrt{A_{ph}^2 + B_{ph}^2} \quad (۹)$$

$$\varphi_{ph} = \alpha_{ph} - \beta_{ph} \quad (۱۰)$$

$$\alpha_{ph} = \tan^{-1} \frac{A_{ph}}{B_{ph}} \quad (۱۱)$$

$$\beta_{ph} = \tan^{-1} \frac{C_{ph}}{D_{ph}} \quad (۱۲)$$

مقدار جریان هارمونیکی مرجع فیلتر هر فاز برابر است با

$$I_{R_{ph}} = I_{L_{ph}} - I_{D_{ph}} \quad (۱۳)$$

### ۳-۴ عامل شبکه

شبکه قدرت که ریزشکها به آن متصل است، به عنوان یک عامل در نظر گرفته می شود که این عامل، مقدار توان اکتیو و راکتیو تبدالی بین شبکه و ریزشکها را نظارت می نماید. از آنجا که یک ریزشکها باید بتواند با حداقل وابستگی به شبکه قدرت، انرژی مصرف کننده را تأمین کند، بنابراین محدودیت زیر برای این عامل در نظر گرفته می شود

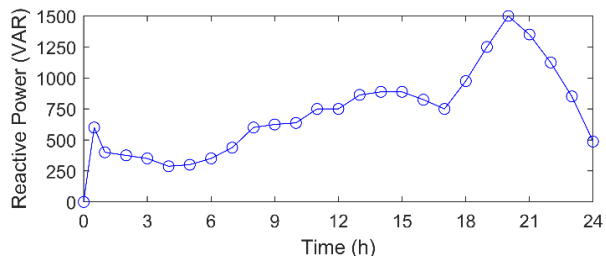
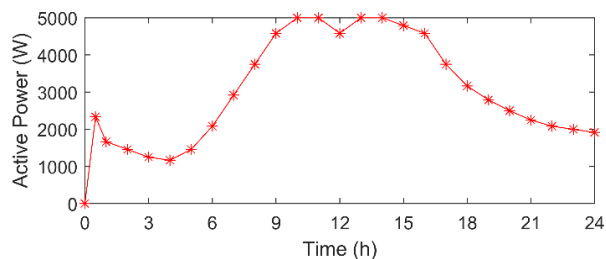
$$P_T = \sum_{i=1}^n P_{Line_i} \leq P_r \quad (۱۴)$$

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_{Line_i} \leq Q_r \quad (۱۵)$$

به طوری که  $P_{Line_i}$  و  $Q_{Line_i}$  به ترتیب توان های اکتیو و راکتیو خط انتقال بین شبکه قدرت با ریزشکها و  $n$  تعداد خطوط ارتباطی بین ریزشکها و شبکه قدرت است. همچنین مقادیر  $P_r$  و  $Q_r$  به ترتیب حد آستانه توان اکتیو و راکتیو عبوری از شبکه قدرت به سمت ریزشکها است.

### ۳-۵ عامل سیستم مدیریت انرژی

به دلیل وابستگی منابع انرژی تجدیدپذیر به شرایط محیطی، مقدار تولید انرژی آنها می تواند متناسب با شرایط آب و هوایی تغییر نماید. بنابراین شرایط بهره برداری در یک ریزشکها متغیر بوده و به همین دلیل استفاده از روش های کنترل پیوسته نمی تواند پاسخگوی نیاز مدیریت انرژی در ریزشکها باشد. در روش مدیریت انرژی چندعاملی پیشنهادی از هر دو روش کنترل پیوسته و گسسته بهره برده شده است. بخش کنترل پیوسته مربوط به تمام کنترل کننده های محلی در هر عامل است که نظارت بر سیستم مربوط به خود را انجام می دهند. همان



شکل ۶: تغییرات توان اکتیو و راکتیو بار خطی.

فیلترهای پسیو دارای مزایا و معایبی نیز می باشند که می توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۳]:

#### ۳-۲-۱ مزایای فیلترهای پسیو

- هزینه کمتر نسبت به فیلترهای اکتیو موازی
- سادگی

#### ۳-۲-۲ معایب فیلترهای پسیو

- سنگین و بزرگ بودن
- افزایش هارمونیکها باعث اضافه بار می شود.
- افزایش توان راکتیو سیستم
- امکان ایجاد رزونانس با بار
- تغییر عملکرد فیلتر با تغییر یافتن فرکانس و امپدانس منبع AC

### ۳-۳ عامل بار

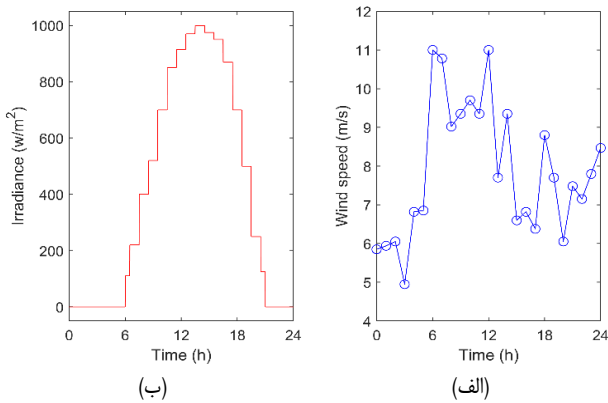
مصرف کننده های غیرخطی و خطی متصل به ریزشکها به عنوان عامل بار در نظر گرفته شده اند. این عامل بر مقدار توان مورد نیاز مصرف کننده و همچنین مقدار هارمونیک تولیدی توسط بار صنعتی نظارت دارد و مقدار توان اکتیو مورد نیاز این بار برابر با  $1.166 \leq P_L \leq 5 \text{ kW}$  و مقدار توان راکتیو نیز  $0.285 \leq Q_L \leq 1.5 \text{ kVAR}$  در نظر گرفته شده که این تغییرات با توجه به مقادیر بار ریزشکها های یک و سه از [۲۶] انتخاب و طبق شکل ۶ اعمال شده اند.

به منظور بررسی عملکرد ریزشکها در جبران سازی هارمونیکی سیستم، بار صنعتی به صورت یک بار غیر خطی هارمونیکی در نظر گرفته شده است که علاوه بر مؤلفه اصلی جریانی، مؤلفه های فرکانسی دیگر  $\{1, 2, \dots, N\} \times 50 \pm 1$  نیز تولید می نماید و مؤلفه های مرتبه پنج و هفت از دامنه مؤثری برخوردارند. در این حالت برای بار صنعتی مقادیر THD برابر با ۳۴٪ است. برای محاسبه مقدار دامنه مؤلفه های هارمونیکی در این عامل به روش زیر عمل می شود.

پس از اندازه گیری جریان مصرفی بار ( $I_L$ ) در نقطه اتصال شبکه به مصرف کننده، مقادیر تبدیل فوریه زیر محاسبه می شود [۲۷]

$$A_{ph} = \int_0^T I_{L_{ph}}(t) \cos(\omega t) dt \quad (۴)$$

$$B_{ph} = \int_0^T I_{L_{ph}}(t) \sin(\omega t) dt \quad (۵)$$



شکل ۸: (الف) تغییرات سرعت باد و (ب) تغییرات شدت تابش نور خورشید.

## ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش بر اساس مدل‌های دینامیکی و همچنین استراتژی‌های کنترلی که پیش از این شرح داده شده‌اند، سیستم ریزشبه در محیط Matlab/Simulink شبیه‌سازی گردیده و جهت ارتباط بین الگوریتم و اجزای ریزشبه از بلوک Matlab function استفاده شده است. سپس برای مشاهده جریان‌سازی هارمونیک سیستم و کارایی سیستم کنترلی، اعمالی تحت تغییرات ناگهانی بار خطی، سرعت باد و تابش خورشید به سیستم اعمال شده است.

### ۴-۱ مشخصات فنی عامل‌ها

مشخصات فنی مربوط به توربین بادی [۱]، پیل سوختی [۳۰]، آرایه خورشیدی و مبدل DC/DC [۳۱] در شبیه‌سازی استفاده شده‌اند.

### ۴-۲ نوسانات متغیرهای ورودی

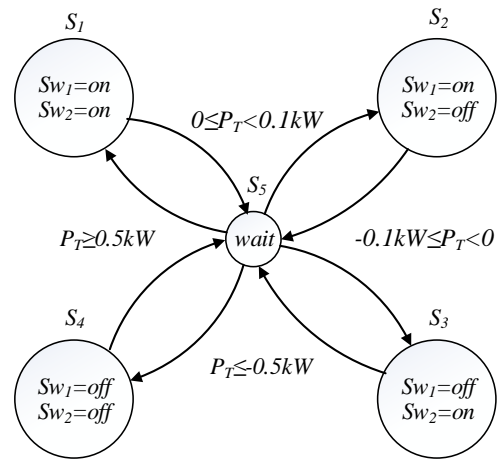
نوسانات سرعت باد و شدت تابش خورشید به صورت شکل ۸ اعمال شده‌اند. این تغییرات به گونه‌ای تنظیم گردیده‌اند که توان‌های خروجی مولدهای خورشیدی و بادی طبق [۲۶] تولید شوند. در واقع با تغییرات انرژی تولیدی و بار مصرفی می‌توان رفتار سیستم کنترلی در مدیریت انرژی با شرایط مختلف را ارزیابی نمود. ولتاژ نقطه PCC برابر با ۴۰۰ ولت در نظر گرفته شده و نهایتاً مقدار حد آستانه توان اکتیو و راکتیو عبوری از شبکه قدرت به سمت ریزشبه برابر  $-۰.۵\text{kW} \leq P_{ff} < ۰.۵\text{kW}$  در نظر گرفته می‌شود.

### ۴-۳ نتایج خروجی ساختار کنترلی پیشنهادی

سیستم مدیریت انرژی با توجه به کمبود یا مازاد توان تولیدی در ریزشبه، در مورد فعال یا غیرفعال بودن پیل‌های سوختی ۱ و ۲ تصمیم می‌گیرد و در هر زمان بین آنها سوئیچ می‌کند و یا ممکن است از هر دو استفاده کند و یا گاهی از هیچ کدام استفاده نکند (مانند شکل ۹) و بدین صورت باعث پایداری ریزشبه می‌شود.

در شکل ۱۰ توان تولیدی منابع تولید پراکنده انرژی هیبرید (شامل فتولتائیک و توربین بادی) و توان تولیدی منابع جریان‌ساز (شامل دو پیل سوختی با سوئیچینگ فعال‌سازی شکل ۹) نشان داده شده است.

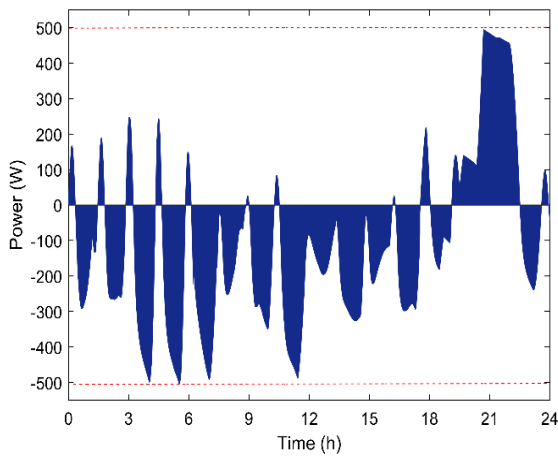
مقدار توان اکتیو تبادلی بین ریزشبه و شبکه در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. مطابق شکل در هر زمان که مقدار توان تولیدشده در ریزشبه از مقدار مورد نیاز بار کمتر است، بنابراین کمبود انرژی از طریق شبکه متصل به ریزشبه جبران می‌شود. با عملکرد صحیح سیستم مدیریت انرژی، مقدار توان انتقالی از شبکه به ریزشبه کنترل شده است.



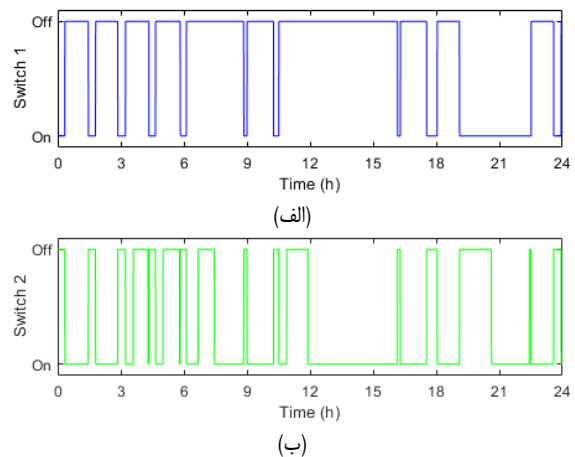
شکل ۹: کنترل‌کننده عامل مدیریت انرژی.

طور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، در ساختار سیستم کنترل چندعاملی پیشنهادی، وظیفه کنترل محلی در عامل‌های خورشیدی، بادی و پیل سوختی به طور پیوسته انجام می‌شود. از طرف دیگر، عامل مدیریت انرژی یک کنترل‌کننده، گسسته و مبتنی بر توپولوژی ماشین میلی است و وظیفه تصمیم‌گیری در مورد شرایط و حالات مختلف بهره‌برداری از مولدهای ریزشبه را دارد [۲۸] و [۲۹]. این کنترل‌کننده بیانگر شروط گذر از حالات مختلف سیستم می‌باشد و با دریافت اطلاعات مورد نیاز از عامل‌های دیگر و اعمال فرمان به کلیدهای  $Sw_1$  و  $Sw_2$ ، متناسب با شرایط، اقدام به در مدار قراردادن پیل‌های سوختی  $FC_1$  و  $FC_2$  نموده و تعادل بین انرژی تولیدی و مصرف‌کننده را برقرار می‌نماید و از این طریق پایداری سیستم را علی‌رغم ناپایداری‌های محیطی و تغییرات بار خطی فراهم می‌کند. این کنترل‌کننده از پنج حالت تشکیل گردیده و ساختار آن در شکل ۷ آمده است. حالت‌های  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  وضعیت بسته یا باز بودن کلیدهای  $Sw_1$  و  $Sw_2$  را به صورت  $(Sw_1, Sw_2)$  نشان می‌دهند. اگر مقدار توان ورودی از شبکه به ریزشبه  $(P_T)$  بیشتر از  $۰.۵\text{kW}$  باشد، سیستم کنترل در حالت  $S_1$  قرار می‌گیرد که در این حالت وضعیت کلیدها به صورت  $Sw_1: \text{on}, Sw_2: \text{on}$  است. زمانی که مقدار توان تبادلی از شبکه به ریزشبه کاهش پیدا نماید و به مقدار  $۰ \leq P_T < ۰.۱\text{kW}$  برسد، سیستم کنترل گسسته به حالت  $S_2$  منتقل می‌شود. در حالت  $S_2$  وضعیت کلیدها به صورت  $Sw_1: \text{on}, Sw_2: \text{off}$  می‌باشند. محدوده کاری حالت  $S_3$  در بازه  $-۰.۱\text{kW} \leq P_T < ۰$  قرار دارد و در این حالت وضعیت کلیدها به صورت  $Sw_1: \text{off}, Sw_2: \text{on}$  است. در نهایت وقتی مقدار  $P_T$  کمتر از  $-۰.۵\text{kW}$  شود، سیستم کنترلی به حالت  $S_4$  رفته و وضعیت کلیدها به صورت  $Sw_1: \text{off}, Sw_2: \text{off}$  قرار می‌گیرد. در ساختار کنترل گسسته، حالت  $S_5$  به عنوان حالت انتظار (wait) است. از آنجا که در شبکه‌های قدرت، رسیدن به شرایط پایداری بعد از هر تغییر حالتی نیاز به گذشت مدت زمان مشخصی دارد بنابراین کنترل‌کننده بعد از اعمال هر تغییر در شرایط بهره‌برداری ریزشبه باید برای مدت زمانی در حالت انتظار قرار گرفته و سپس اقدام به دریافت اطلاعات ورودی نماید. مقادیر انرژی تولیدی مولدهای خورشیدی، بادی و پیل‌های سوختی و همچنین مقدار توان مورد نیاز مصرف‌کننده‌ها و توان تبادلی ریزشبه با شبکه قدرت به عنوان ورودی به این کنترل‌کننده هستند. این کنترل‌کننده با دریافت اطلاعات مورد نیاز از طرف سایر عامل‌ها با توجه به شرایط نسبت به وضعیت بهره‌برداری شبکه تصمیم می‌گیرد. در شکل ۷ شرط گذر از یک حالت به حالت دیگر نشان داده شده است.

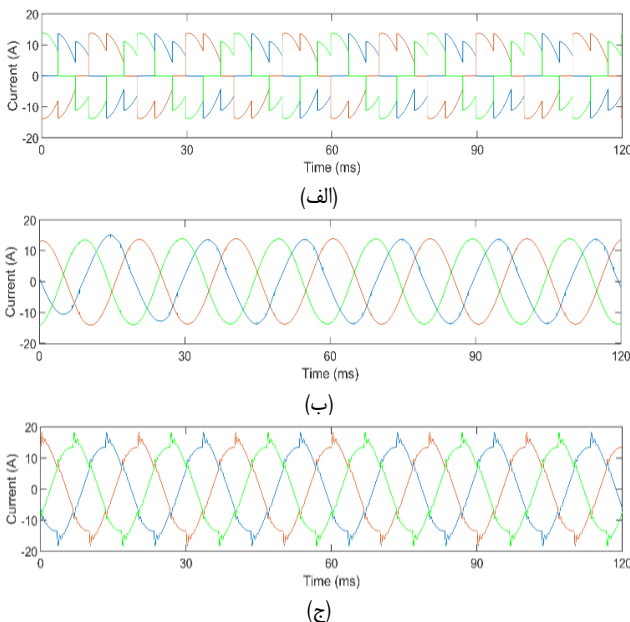




شکل ۱۱: تغییرات مقدار توان اکتیو انتقالی از شبکه به ریزشکده.



شکل ۹: (الف) تغییرات سوئیچ ۱ و (ب) تغییرات سوئیچ ۲.



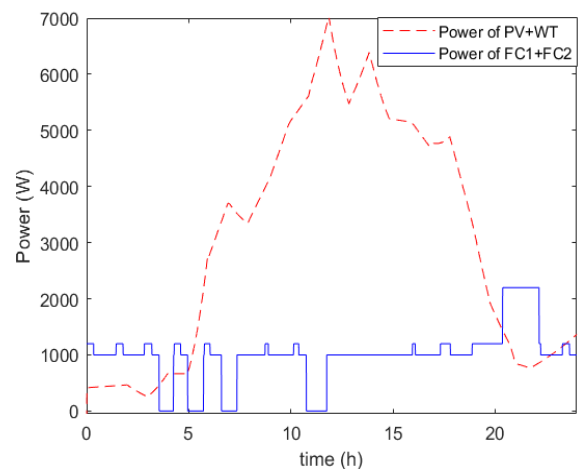
شکل ۱۲: (الف) جریان ریزشکده قبل از جبران سازی هارمونیک، (ب) جریان ریزشکده بعد از جبران سازی به روش فیلتر اکتیو موازی و (ج) جریان ریزشکده بعد از جبران سازی به روش پسیو SC-RC-LCL.

با استفاده از این الگوریتم ضمن استخراج مرتبه‌های مختلف فرکانسی می‌توان میزان هارمونیک‌های موجود در سیگنال مورد نظر را نمایش داد. پارامتر FFT جریان ریزشکده در زمان‌های قبل از جبران‌سازی، بعد از جبران‌سازی به روش اکتیو و بعد از جبران‌سازی به روش پسیو SC-RC-LCL در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نمایش داده شده‌اند. مطابق با سیگنال‌های به دست آمده، فیلتر اکتیو موازی توانسته تا هارمونیک‌های بیشتری را جبران‌سازی کند و نسبت به روش پسیو، عملکرد بهتری داشته باشد.

با عملکرد صحیح سیستم کنترل پیشنهادی، جبران‌سازی هارمونیک از طریق کنترل مبدل DC/AC و به روش فیلتر اکتیو موازی انجام شده و بار غیرخطی متصل به شبکه دارای هارمونیک جریانی  $THD = 3.4\%$  بوده که نهایتاً بعد مدت کمی از لحظه شروع و پایداری شبکه با جبران‌سازی هارمونیک به کمتر از ۲٪ کاهش پیدا کرده که در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک استراتژی مدیریت انرژی جدید جهت کنترل توان اکتیو و راکتیو داخلی یک ریزشکده AC شامل چندین منبع تولید پراکنده



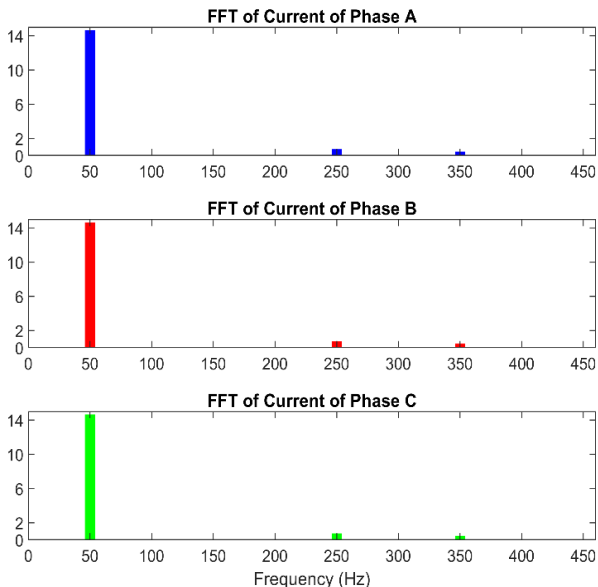
شکل ۱۰: تغییرات توان اکتیو تولیدی توسط مولدهای خورشیدی، بادی و پیل‌های سوختی.

همچنین زمانی که مقدار توان تولیدی در داخل ریزشکده بیشتر از حد مورد نیاز داخلی است، سیستم کنترل مدیریت انرژی، مقدار توان انتقالی از ریزشکده به شبکه را به حداقل مقدار محدود نموده است. بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی به خوبی توانسته تا علاوه بر تأمین انرژی مورد نیاز بار متغیر مربوط به ریزشکده، مقدار انرژی تبدیلی بین ریزشکده و شبکه را در بازه  $0.5 \text{ kW}$  تا  $0.5 \text{ kW}$  محدود نماید.

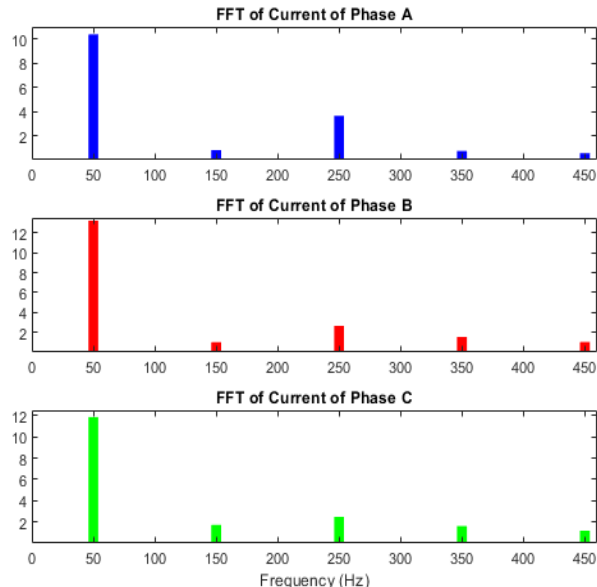
### ۴-۴ نتایج مقایسه فیلتر اکتیو موازی و فیلتر پسیو SC-RC-LCL

شکل ۱۲ جریان ریزشکده را قبل و بعد از جبران‌سازی هارمونیک به روش‌های اکتیو و پسیو SC-RC-LCL در بازه  $10 \text{ h} < t < 11 \text{ h}$  که بار مصرفی تقریباً ثابت است و امکان طراحی پارامتر المان‌های پسیو وجود دارد، نمایش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه روش‌ها نشان می‌دهند که عملکرد فیلتر اکتیو موازی نسبت به فیلتر پسیو بهتر و مناسب‌تر است و قادر به جبران‌سازی بیشتر هارمونیک‌ها می‌باشد. علت اصلی عملکرد بهتر فیلتر اکتیو موازی، تزریق توان با فرکانس ثابت اما با فاز معکوس است که باعث حذف هارمونیک‌ها در ریزشکده‌ها می‌شوند.

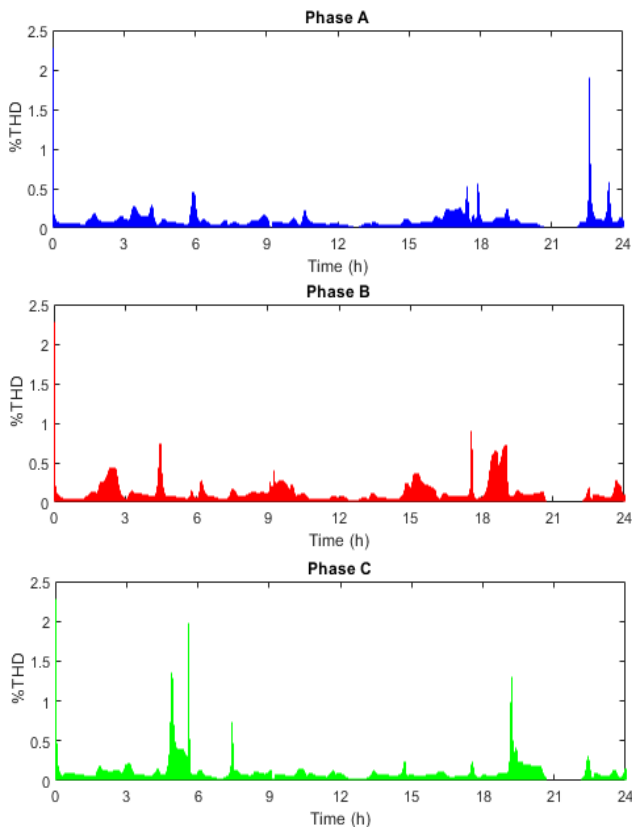
از مؤلفه‌های مهم پردازش و آنالیز صحیح جبران‌سازی هارمونیک‌ها در ریزشکده‌های قدرت، پارامتر تبدیل فوریه سریع (FFT) می‌باشد. در واقع



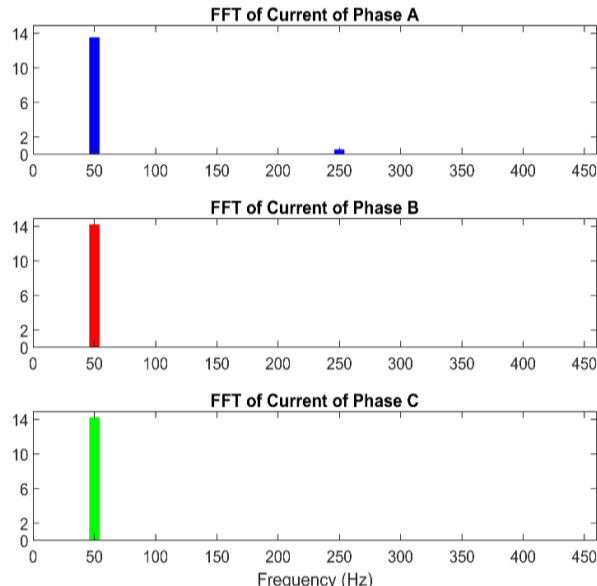
شکل ۱۵: FFT جریان ریزشکبه بعد از جبران سازی به روش پسیو SC-RC-LCL.



شکل ۱۳: FFT جریان ریزشکبه قبل از جبران سازی هارمونیک.



شکل ۱۶: درصد اعوجاج هارمونیک های جبران شده در ریزشکبه.



شکل ۱۴: FFT جریان ریزشکبه بعد از جبران سازی به روش فیلتر اکتیو موازی.

ریزشکبه های قدرت پرداخته شد و مقایسه جبران سازی هارمونیک های جریان یک ریزشکبه توسط این فیلترها با معیار FFT بررسی گردید. نتایج شبیه سازی نشان می دهند که استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی با استفاده از کنترل کننده های پیوسته محلی (در هر عامل) و کنترل کننده گسسته مرکزی (سیستم مدیریت انرژی) توانسته عملکرد مناسبی داشته باشد و باعث کاهش هزینه های انرژی و عدم وابستگی ریزشکبه به شبکه شود. همچنین فیلتر اکتیو موازی نیز با جبران سازی هارمونیک بهتر و مناسب تر نسبت به فیلتر پسیو، به عنوان یک روش و راه حل مناسب، دارای عملکردی عالی است و ضمن تأمین مورد نیاز ریزشکبه، مسأله جبران سازی هارمونیک های جریان را به درستی انجام می دهد.

از جمله فتوولتائیک، توربین بادی، پیل سوختی و بار خطی متغیر مبتنی بر کنترل غیرمتمرکز پیشنهاد گردیده است. در ساختار چندعاملی پیشنهادی از کنترل کننده های پیوسته و گسسته استفاده شده که ضمن کاهش پیچیدگی در طراحی کنترل کننده، موجب بهبود عملکرد کنترلی در مدیریت انرژی می شود. ۶ عامل معرفی شده در سیستم چندعاملی بیانگر هر بخش از ریزشکبه هستند و همه اجزای ریزشکبه و عامل ها در محیط سیمولینک نرم افزار Matlab مدل شده اند. هر دو عامل خورشیدی و توربین بادی جهت جذب حداکثر توان به MPPT مجهز شده اند. عوامل شبکه و بار، پارامترهای اندازه گیری شده مربوط به مقدار بار و انرژی تبادل بین ریزشکبه و شبکه را به واحد مدیریت انرژی ارسال می کنند. بر مبنای ساختار و اطلاعات دریافتی از دیگر عامل ها، واحد مدیریت انرژی، تصمیمات مناسبی را درباره مقدار توان تولیدی پیل های سوختی می گیرد. استفاده از پیل های سوختی، روش مناسبی جهت حفظ پایداری داخلی، کاهش وابستگی به شبکه قدرت و کاهش نوسانات تولید در ریزشکبه ها می باشد. همچنین ضمن بررسی مزایا و معایب فیلترهای اکتیو موازی و فیلترهای پسیو، به ساختار چندعاملی با استفاده از این فیلترها در



## مراجع

- [18] J. Zhou, S. Kim, H. Zhang, Q. Sun, and R. Han, "Consensus-based distributed control for accurate reactive, harmonic and imbalance power sharing in microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 2453-2467, Jul. 2017.
- [19] M. S. Golsorkhi and D. D. C. Lu, "A decentralized control method for islanded microgrids under unbalanced conditions," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1112-1121, Jun. 2016.
- [20] V. Viswanatha and R. Venkata Siva Reddy, "A complete mathematical modeling, simulation and computational implementation of boost converter via MATLAB/Simulink," *International J. of Pure and Applied Mathematics*, vol. 114, no. 10, pp. 407-419, 2017.
- [21] P. Dey and S. Mekhilef, "Current harmonics compensation with three-phase four-wire shunt hybrid active power filter based on modified D-Q theory," *IET Power and Electronics*, vol. 8, no. 11, pp. 2265-2280, Nov. 2015.
- [22] P. Santiprapan, K. L. Areerak, and K. N. Areerak, "Mathematical model and control strategy on DQ frame for shunt active power filters," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 12, pp. 353-361, Sept. 2011.
- [23] S. U. Bhople and S. K. Rayarao, "Reduction of harmonics using shunt active power filters," *International J. of Engineering Research & Technology*, vol. 4, no. 7, pp. 293-296, Jul. 2015.
- [24] A. Akhavan, H. R. Mohammadi, and J. M. Guerrero, "A comprehensive control system for multi-parallel grid-connected inverters with LCL filter in weak grid condition," *Electric Power Systems Research*, pt. A, vol. 163, pp. 288-300, Oct. 2018.
- [25] C. C. Gomes, A. F. Cupertino, and H. A. Pereira, "Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on LCL filter: an overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pt. 1, vol. 81, pp. 116-135, Jan. 2018.
- [26] T. Lu, Z. Wang, Q. Ai, and W. J. Lee, "Interactive model for energy management of clustered microgrids," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 1739-1750, May-Jun. 2017.
- [27] H. R. Imani, A. Mohamed, H. Shreef, and M. Eslami, "Multi-objective optimization based approaches for hybrid power filter design," in *Proc. 21st Iranian Conf. on Electrical Engineering, ICEE'13*, 5 pp., Mashhad, Iran, 14-16 May. 2013.
- [28] C. G. Cassandras and S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, Springer Science and Business Media, LLC, 2008.
- [29] J. Lunze and F. L. Lagarrigue, *Handbook of Hybrid Systems Control: Theory, Tools, Applications*, Cambridge University Press, 2009.
- [30] M. Y. El-Sharkh, et al., "A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications," *J. of Power Sources*, vol. 138, no. 1-2, pp. 199-204, Nov. 2004.
- [31] M. Mohammadi and M. Nafar, "Fuzzy sliding-mode based control (FSMC) approach of hybrid microgrid in power distribution systems," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 51, pp. 232-242, Oct. 2013.
- محمدرضا صالحی راد** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق-الکترونیک در سال ۱۳۹۵ با رتبه اول در رشته تحصیلی خود از دانشکده شهید چمران کرمان به پایان رسانده است. نامبرده در حال حاضر در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان مشغول به تحصیل بوده و زمینه‌های مورد علاقه او شامل انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم‌های چندعاملی، کنترل هیبرید و کنترل غیرمتمرکز می‌باشد.
- محمد ملائی امامزاده** دانش‌نامه کارشناسی مهندسی برق-الکترونیک خود را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه شهید باهنر کرمان دریافت نمود. وی سپس تحصیلات کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق-کنترل خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۶ در دانشگاه صنعتی شریف به پایان رساند. نامبرده از سال ۱۳۹۷ به عنوان عضو هیئت علمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان مشغول به کار بوده و زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه او شامل کنترل بهینه، سیستم‌های هوشمند، هوش مصنوعی، سیستم‌های چندعاملی و سلسله‌مراتبی می‌باشد.
- [1] R. Engleitner, A. Nied, M. S. M. Cavalca, and J. P. Da costa, "Dynamic analysis of small wind turbines frequency support capability in a low power wind-diesel microgrid," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 102-111, Jan.-Feb. 2018.
- [2] B. Benlahbib, et al., "Experimental investigation of power management and control of PV/wind/fuel cell/battery hybrid energy system microgrid," *International J. of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 53, pp. 29110-29122, Oct. 2020.
- [3] S. Vachirasicirikul and I. Ngamroo, "Robust controller design of microturbine and electrolyzer for frequency stabilization in a microgrid system with plug-in hybrid electric vehicles," *International J. Electric Power Energy System*, vol. 43, no. 1, pp. 804-811, Dec. 2012.
- [4] I. Ngamroo, "Application of electrolyzer to alleviate power fluctuation in a stand-alone microgrid based on an optimal fuzzy PID control," *International J. Electric Power Energy System*, vol. 43, no. 1, pp. 969-976, Dec. 2012.
- [5] M. N. Ambia, A. Al-Durra, C. Caruana, and S. M. Muyeen, "Power management of hybrid microgrid system by a generic centralized supervisory control scheme," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 8, pp. 57-65, Dec. 2014.
- [6] M. Elsied, A. Oukaour, H. Gualous, and R. Hassan, "Energy management and optimization in microgrid system based on green energy," *Energy*, vol. 84, pp. 139-151, May 2015.
- [7] R. Wang, P. Wang, G. Xiao, and S. Gong, "Power demand and supply management in microgrids with uncertainties of renewable energies," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 260-269, Dec. 2014.
- [8] T. Wang, D. O'Neill, and H. Kamath, "Dynamic control and optimization of distributed energy resources in a microgrid," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2884-2894, Nov. 2015.
- [9] D. E. Olivares, C. A. Cañizares, and M. Kazerani, "A centralized optimal energy management system for microgrids," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 6 pp., Detroit, MI, USA, 24-28 Jul. 2011.
- [10] C. S. Karavas, G. Kyriakarakos, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration microgrids," *Energy Conversion Management*, vol. 103, pp. 166-179, Oct. 2015.
- [11] M. Elgamal, N. Korovkin, A. Elmitwally, and Z. Chen, "Robust multi-agent system for efficient online energy management and security enforcement in a grid-connected microgrid with hybrid resources," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 9, pp. 1726-1737, May 2020.
- [12] X. Xu, H. Jia, D. Wang, D. C. Yu, and H. D. Chiang, "Hierarchical energy management system for multi-source multi-product microgrids," *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 621-630, Jun. 2015.
- [13] J. P. Torreglosa, P. García, L. M. Fernández, and F. Jurado, "Hierarchical energy management system for stand-alone hybrid system based on generation costs and cascade control," *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 514-526, Jan 2014.
- [14] M. Elsied, A. Oukaour, H. Gualous, R. Hassan, and A. Amin, "An advanced energy management of microgrid system based on genetic algorithm," in *Proc. IEEE 23rd Int. Symp. on Industrial Electronics, ISIE'14*, pp. 2541-2547, Istanbul, Turkey, 1-4 Jun. 2014.
- [15] R. S. Sreeleksmi, A. Ashok, and M. G. Nair, "A fuzzy logic controller for energy management in a PV battery based microgrid system," in *Proc. Int. Conf. on Technological Advancements in Power and Energy, TAP Energy'17*, 6 pp., Kollan, India, 21-23 Dec. 2017.
- [16] A. M. D. S. Alonso, D. I. Brandao, T. Caldognetto, F. P. Marafão, and P. Mattavelli, "A selective harmonic compensation and power control approach exploiting distributed electronic converters in microgrids," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 115, Article ID: 105452, Feb. 2020.
- [17] P. Sreekumar and V. Khadkikar, "A new virtual harmonic impedance scheme for harmonic power sharing in an islanded microgrid," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 936-945, Jun. 2016.