دانشنـــــــامــه علــوم فنــی و مهندســی

جلد۱،شماره۱،آذر۱۴۰۲

صفحه ۱۱ -۱۸

بررسی منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان منابع پشتیبان در سیستم‌های ترکیبی (هیبرید) ریزشبکه‌های قدرت

۱-محمدرضا صالحی راد۲-محمد ملائی امامزاده

۱- کارشناسی ارشد برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲- استادیار گروه کنترل ،دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

M.Salehirad۲۰۲۰@gmail.com
Molaie@uk.ac.ir

چکیده

در این مقاله، به بررسی اهمیت منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت و بیان استراتژی‌های مختلف سیستم‌های ترکیبی در ریزشبکه‌ها پرداخته شده است. همچنین مقایسه زمان پاسخ پیل سوختی و باتری بعنوان مهمترین منابع پشتیبان تجدیدپذیر در ریزشبکه‌های قدرت نسبت به تغییرات سوئیچینگ و جبران کمبود انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پیل سوختی دارای زمان پاسخ سریع-تر و مناسب‌تری نسبت به باتری است و می‌تواند روش مناسبی جهت حفظ پایداری داخلی، کاهش وابستگی به شبکه قدرت و کاهش نوسانات تولید در ریزشبکه‌ها باشد و بکارگیری صحیح آن در مدیریت انرژی می‌تواند باعث عدم وابستگی ریزشبکه‌ها به شبکه قدرت شود.

کلمات کلیدی: باتری، پیل‌سوختی، سیستم‌های ترکیبی، منابع تجدیدپذیر.

۱. مقدمه

امروزه استفاده از منابع تجدیدپذیر همچون توربین بادی، مولد خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و پیل‌های سوختی به عنوان منبع پاک و رایگان تولید انرژی الکتریکی درحال گسترش روزافزون است و براساس تحقیقات در سال ۲۰۲۰ میلادی ۱۰٪ کل برق جهان از انرژی باد تامین شده است و طبق پیش‌بینی‌ها رشد سالانه آن تا سال ۲۰۴۰ بین ۱۰٪ تا ۴۰٪ خواهد بود [۱]. به مجموعه ای از مولدهای انرژی تجدیدپذیر 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 تامین نماید ریزشبکه می‌گویند [۲]. ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر مانند منابع خورشیدی و بادی که دارای وابستگی جوی هستند و پیش‌بینی تولید انرژی ضعیفی دارند با منابع تجدیدپذیری که کاملا قابل برنامه‌ریزی هستند توانسته است امکان استفاده از مزایای انرژی‌های تجدیدپذیر را در شبکه های قدرت فراهم آورد. درواقع استفاده از پیل سوختی و باتری به عنوان یک منبع پشتیبان در کنار مولدهای خورشیدی و بادی، پایداری یک ریزشبکه را افزایش می‌دهد [۴,۳]. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه ریزشبکه‌ها و مدیریت انرژی آن‌ها انجام شده است. بخشی از تحقیقات مربوط به مدیریت منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و بکارگیری بعضی از منابع دیگر بعنوان منبع پشتیبان در ریزشبکه‌ها است [۵]. در مرجع [۶] یک باتری به عنوان منبع ثانویه و در نقش انباشتگر در تأمین توان و تغییرات بار مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین استفاده از پیل‌های سوختی روش مناسبی جهت حفظ پایداری داخلی، کاهش وابستگی به شبکه قدرت و کاهش نوسانات تولید در ریزشبکه‌ها می‌باشد و می‌توان از آن‌ها بعنوان منابع پشتیبان در ریزشبکه‌ها استفاده کرد [۸,۷]. از مولفه‌های مهم بکارگیری پیل‌های سوختی و باتری‌ها بعنوان منابع پشتیبان در ریزشبکه‌ها، زمان پاسخ این منابع نسبت به تغییرات سوئیچینگ و زمان قرارگیری در مدار است که مورد توجه محققین بوده است [۱۰,۹]. در اکثر مطالعاتی که در زمینه مدیریت و استراتژی کنترلی ریزشبکه‌ها انجام شده است، تمرکز بر ارائه استراتژی مدیریتی بوده است و توجه کمتری به مدل‌سازی‌ها و رفتارهای دینامیکی ادوات و تجهیزات ریزشبکه شده است [۱۴-۱۱]، درحالی که برای مدیریت و کنترل انرژی در یک ریزشبکه نیاز به مطالعه

تمام بخش‌های ریزشبکه است، بنابراین در این مقاله ضمن بررسی انرژی‌های تجدیدپذیر و انواع سیستم‌های ترکیبی (هیبرید)، با در نظر گرفتن ویژگی‌های دینامیکی و فیزیکی مربوط به پیل‌سوختی و باتری به مقایسه زمان پاسخ این منابع در ریزشبکه‌ها پرداخته شده است.

۲. منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت

انرژی‌های تجدیدپذیر از آنجا که منبع تولید آن‌ها رایگان می‌باشد گزینه‌ای مناسب برای تامین برق در مناطق دور افتاده است. در واقع می‌توان با ایجاد یک مرکز مستقل تولید انرژی‌های بادی و یا خورشیدی در نزدیکی محل مصرف بدون نیاز به هزینه‌های زیاد توسعه شبکه، تامین خطوط و پست‌های انتقال، برق مورد نیاز مصرف‌کنندگان شامل مصارف روشنایی، ارتباطات، منابع آب، وسایل سرمایش و گرمایش را تامین نمود.

از جمله محاسن انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۱۶،۱۵]:

۱. امکان دسترسی سریع به برق پایدار در هر زمان
۲. کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی
۳. عدم نیاز به توسعه شبکه قدرت و صرف زمان و هزینه بالا
۴. عدم آلودگی و حفظ محیط زیست
۵. افزایش تولید اقتصادی و ایجاد فرصت‌های شغلی

این منابع انرژی علی‌رغم کاهش هزینه‌های توسعه شبکه، هزینه‌های لازم برای انتقال سوخت را نیز کاهش می‌دهند و چون منبع اصلی آن‌ها باد و خورشید است و این منابع کاملاً مجانی هستند لذا برق تولیدی آن‌ها بسیار ارزان قیمت است. از طرفی به دلیل راندمان و قابلیت اطمینان بالا و طول عمر زیاد از این منابع در شبکه اصلی نیز به عنوان سیستم پشتیبان برای بالا بردن پایداری در نقاط ضعف شبکه و یا در شرایط بحرانی می‌توان استفاده نمود.

استفاده از منابع تجدیدپذیر علاوه بر محاسن قابل توجه دارای معایب مهمی نیز هستند.

از مهمترین این معایب، وابستگی بسیار زیاد این سیستم‌ها به وضعیت آب و هوا و شرایط جوی می‌باشد و از آنجایی که همواره تولید یک برق مداوم و با کیفیت از اهمیت خاصی برای صنعت برق برخوردار است لذا این عیب مشکل‌ساز می‌باشد. یکی از روش‌های رفع این مشکل استفاده ترکیبی از این سیستم‌ها در کنار یکدیگر می‌باشد [۱۶].

۳. سیستم‌های ترکیبی (هیبرید) انرژی

سیستم هیبرید قدرت[۱] به صورت ترکیب دو یا چند تکنولوژی برای تولید توان معرفی می‌شود. سیستم‌های هیبرید قدرت می‌توانند به صورت مستقل و یا متصل به شبکه قدرت در نظر گرفته شوند [۱۶،۵]. در سیستم‌های هیبرید مستقل از شبکه، ظرفیت ذخیره انرژی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا پاسخگوی تغییرات توان بار و کمبود منابع اولیه انرژی باشد. در واقع سیستم‌های هیبرید مستقل از شبکه به همراه بارهای مربوطه را می‌توان به عنوان یک شبکه کوچک در نظر گرفت. همچنین سیستم‌های هیبرید متصل به شبکه، قادر به تأمین توان بار محلی و شبکه برق می‌باشند که می‌توان آن‌ها را به عنوان منابع تولید پراکنده[۲] شبکه توزیع در نظر گرفت.

ترکیب‌های بسیاری از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجهیزات ذخیره‌ساز برای ساختن یک سیستم هیبرید متصل به شبکه یا مستقل در مقالات مختلف پیشنهاد شده است، در زیر تعدادی از ترکیبات ذکر شده است:

۱. سیستم هیبرید باتری و یا خازن بزرگ/ پیل سوختی: در این سیستم پیل سوختی نقش اصلی در تأمین توان را برعهده دارد و باتری به عنوان منبع ثانویه در نقش انباشتگر ظاهر می‌شود تا در تأمین توان پیک بار و تغییرات ناگهانی بار به طور همزمان با پیل سوختی مورد استفاده قرار گیرد [۶].

[۱] Power hybrid system

[۲] Distributed generator

۲. سیستم هیبرید باتری/ پیل سوختی/ آرایه خورشیدی/ مولد باد: این سیستم شامل سه منبع انرژی تجدیدپذیرِ آرایه خورشیدی، مولد باد و پیل سوختی می‌باشد. انرژی حاصل از توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی منابع اصلی سیستم بوده و از ترکیب پیل سوختی و الکترولایزر[۳] به همراه باتری به عنوان سیستم ذخیره‌سازی و پشتیبان استفاده می‌شوند [۱۷].

۳. سیستم هیبرید پیل سوختی/ میکروتوربین: با توجه به مزایا و ویژگی‌های این نوع منابع تولید توان، با استفاده از میکروتوربین‌ها و پیل‌های سوختی در کنار یکدیگر به عنوان یک سیستم هیبرید می‌توان هم از سرعت پاسخگویی سریع میکروتوربین‌ها و هم از انعطاف پذیری پیل‌های سوختی بهره برد [۱۸].

۴. سیستم هیبرید پیل سوختی/ آرایه خورشیدی: این سیستم همانند سیستم هیبرید شماره دو می‌باشد اما با این تفاوت که از مولد بادی و باتری استفاده نمی‌شود. آرایه خورشیدی بعنوان منبع اصلی تولید انرژی، توان مورد نیاز الکترولایزر برای تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی را فراهم می‌کند [۱۹].

۵. سیستم هیبرید باتری/ پیل سوختی/ آرایه خورشیدی: در این سیستم آرایه خورشیدی و پیل سوختی نقش منابع اصلی تولید توان و باتری نقش جبران‌سازی انرژی را برعهده دارد [۲۰].

سیستم‌های انرژی هیبرید ذکرشده بیان‌گر این هستند که پرکاربردترین و اصلی‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، خورشید و باد هستند. همچنین پیل-سوختی و باتری‌ها به دلیل مزایای آن از جمله بازده مناسب و عدم تولید آلودگی محیطی توجه زیادی از محققین را به سمت خود برای جبران-سازی انرژی را جلب کرده است.

با توجه به ویژگی‌های دوره‌ای توان باد و وابستگی سیستم‌های فتوولتائیک به شرایط محیطی، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در کاربردهای مستقل از شبکه به تجهیزات ذخیره‌کننده‌ی انرژی همانند باتری یا دیگر منابع تولید انرژی مانند پیل‌سوختی برای مدیریت انرژی در سیستم هیبرید نیاز دارند.

در واقع یکی از چالش‌هایی که در ریزشبکه‌ها وجود دارد عدم قطعیت در انرژی خروجی مولدهای وابسته به منابع خورشیدی و بادی است. وابستگی مولدهای خورشیدی و بادی به شرایط محیطی موجب شده است تا برنامه‌ریزی و پیش‌بینی تولید انرژی و درنتیجه حفظ تعادل بین مصرف‌کننده و تولیدکننده انرژی در یک ریزشبکه دشوار شود. البته زمانی که یک ریزشبکه به شبکه قدرت متصل باشد، کمبود و یا مازاد تولید در ریزشبکه به راحتی ازطریق خطوط ارتباطی با شبکه قدرت مبادله شده و در نتیجه پایداری ریزشبکه تضمین می‌شود، اما اگر این وابستگی به شبکه قدرت از طرف همه ریزشبکه‌ها وجود داشته باشد و شبکه قدرت به طور مداوم مجبور به انتقال انرژی به ریزشبکه‌ها باشد، در این صورت وجود ریزشبکه‌ها نه تنها مشکلی از شبکه‌های قدرت سنتی حل نمی‌نمایند بلکه بر پیچیدگی و مشکلات آن‌ها می‌افزاید. این موضوع با توجه به نوسانات آنی و سریع در انرژی خروجی مولدهای خورشیدی و بادی می‌تواند مشکلات بیشتری برای شبکه‌های قدرت نیز ایجاد نماید. استفاده از منابع پشتیبان تجدیدپذیر می‌تواند روش مناسبی برای حفظ پایداری و کاهش وابستگی ریزشبکه‌ها به شبکه قدرت و راه حل مناسبی برای حل این مسئله باشد.

۳-۱. پیل‌های سوختی

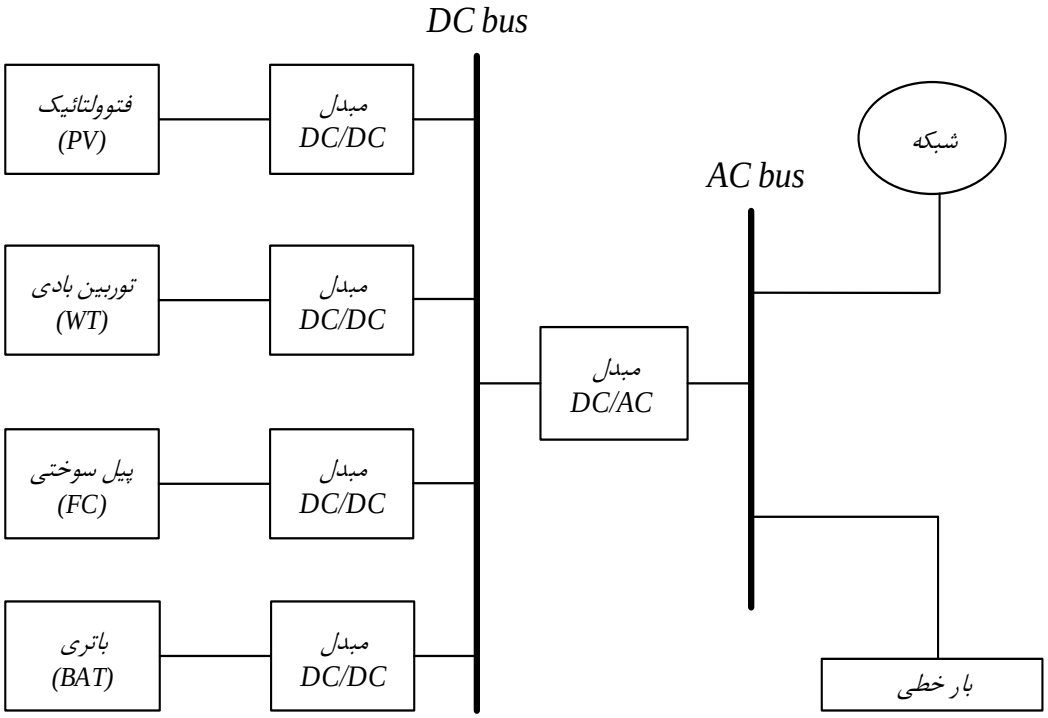
پیل‌های سوختی فناوری جدیدی برای تولید انرژی الکتریکی هستند که بدون ایجاد آلودگی های زیست محیطی و صوتی انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی با راندمان بالایی تبدیل می نمایند. پیل سوختی استفاده شده در این مقاله بر اساس مدل پیل‌سوختی پلیمری است که یکی از پرکاربردترین نوع پیل‌های سوختی محسوب می‌شود [۲۱].

عملکرد این پیل سوختی به چندین متغیر بستگی دارد ولی در این مقاله مدل‌سازی پیل سوختی با شبیه سازی رابطه بین مقدار ولتاژ خروجی پیل سوختی و فشار نسبی هیدروژن، اکسیژن و آب انجام شده است [۲۲].

[۳] Electrolyzer

۴. شبیه‌سازی

در این بخش براساس سیستم‌هایی که شرح داده شدند، یک ریزشبکه مطابق با شکل۱ در محیط Matlab/Simulink شبیه‌سازی شده است. نحوه عملکرد منابع پشتیبان و جبران انرژی در ریزشبکه‌های قدرت از مولفه‌های مهم بکارگیری یک منبع پشتیبان مناسب است که در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است.



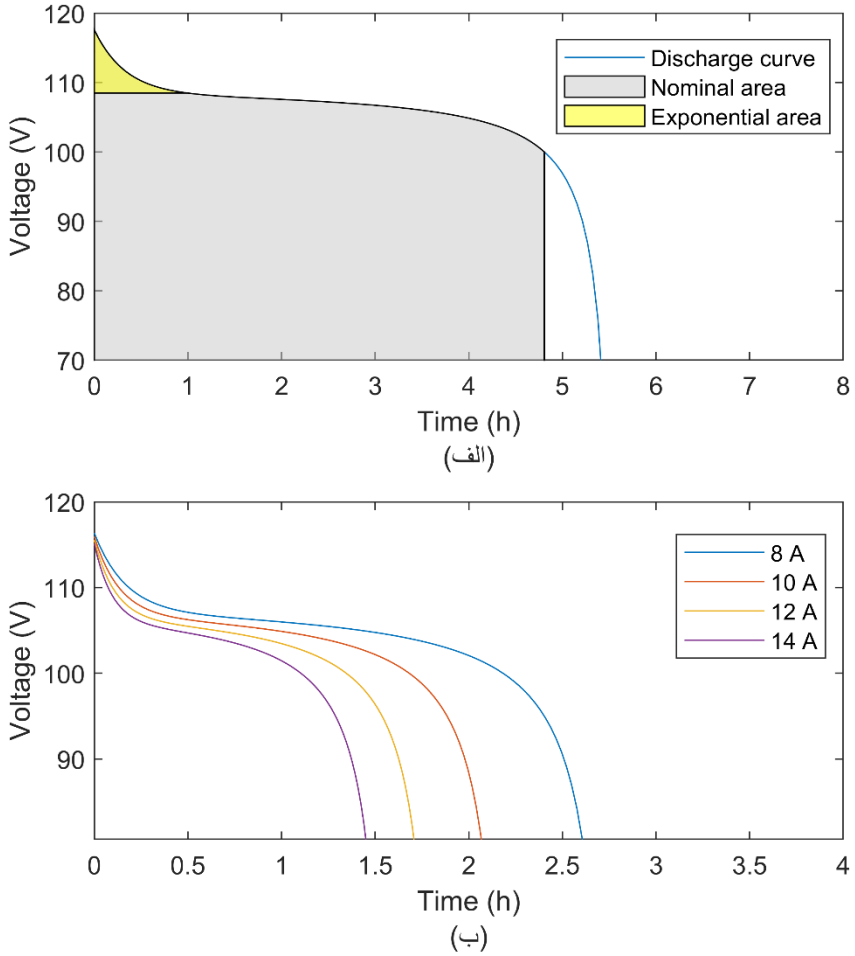
شکل۱: ساختار شبکه پیشنهادی

۴-۱. مشخصات فنی منابع

مشخصات فنی مربوط به پیل سوختی [۲۲]، آرایه فتوولتائیک و MPPT [۲۳]، توربین بادی[۲]، باتری [۴]، مبدل DC/DC [۲۴] و مبدل DC/AC [۲۴] در شبیه‌سازی استفاده شده‌اند.

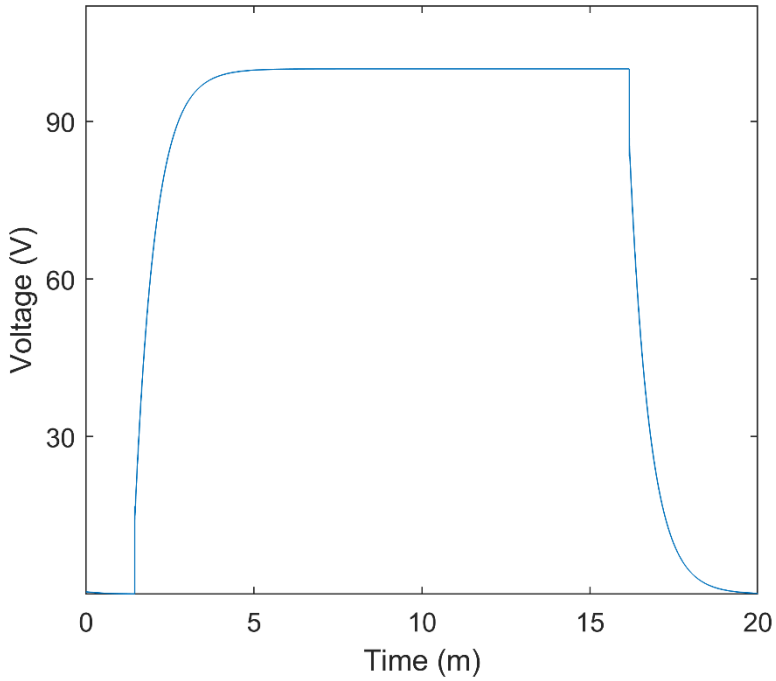
۴-۲. بررسی عملکرد منابع پشتیبان

در شکل۲ نمودار دشارژ باتری نشان داده شده است که بیانگر مناطق‌های مختلف مد کاری باتری و همچنین نمودار دشارژ باتری در جریان‌های متفاوت است. مطابق با شکل۲، باتری قادر است فقط در یک ناحیه نامی دارای بازدهی و عملکرد قابل توجه‌ای باشد و چنانچه جریان مدار توسط بار متغیری، تغییر کند سرعت دشارژ باتری به شدت افزایش پیدا می‌کند. همچنین باتری در ابتدا دارای یک ناحیه نمایی است و پس از گذر از حالت نمایی شروع به دشارژ می‌کند. از آنجایی که باتری بعنوان یک مولد نمی‌باشد و باید توسط منابع تولید پراکنده شارژ شود لذا دارای وابستگی شدید به منابع تولید است لذا اگر منابع تولید بدلیل وابستگی به شرایط محیطی، مدتی دارای تولید نباشند باتری قادر به جبران توان مورد نیاز بار مصرفی در مدت طولانی نخواهد بود.



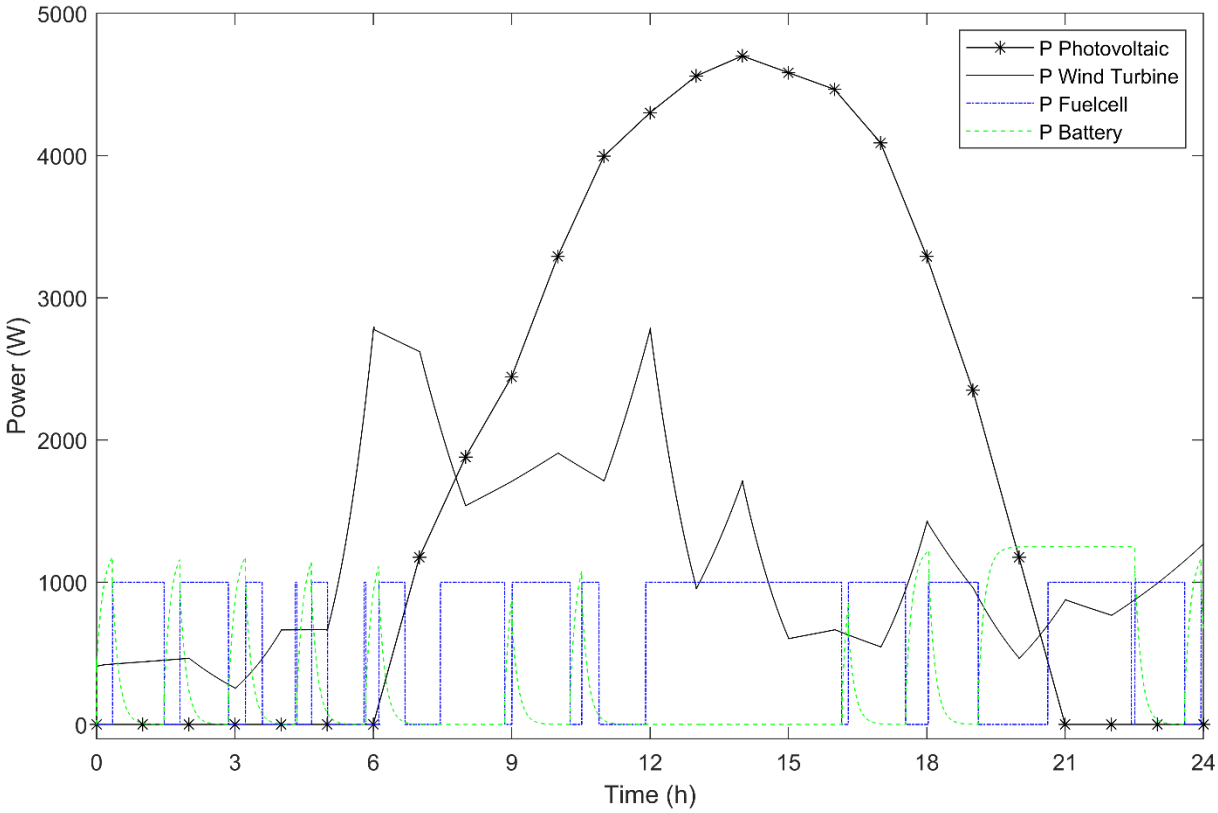
شکل۲: الف) نواحی مختلف نمودار دشارژ باتری، ب) نمودار دشارژ باتری در جریان‌های مختلف

پاسخ زمانی پیل‌های سوختی نیز باید بعنوان یک منبع پشتیبان دیگر در نحوه قرارگیری و خارج شدن از مدار مورد توجه قرار گیرد که در شکل۳ نمایش داده شده است.



شکل۳: زمان پاسخ سوئیچینگ ولتاژ پیل سوختی

در نهایت سیستم پیشنهادی با استفاده از پیل‌سوختی و باتری بعنوان منابع پشتیبان توانسته است ضمن حفظ پایداری و استقلال ریزشبکه، مطابق با شکل۴ توان مورد نیاز بارخطی با مقدار $P = ^{\circ}kW$ را تامین کند.



شکل۴: تغییرات توان اکتیو تولیدی توسط مولدهای خورشیدی، بادی، پیل‌سوختی و باتری

با مقایسه نمودارهای بالا می‌توان نتیجه گرفت که پیل‌سوختی بدلیل پاسخ زمانی مناسب‌تر و سریع‌تر در نحوه قرارگیری در مدار و همچنین عدم وابستگی پیل‌های سوختی به منابع دیگر و شرایط محیطی و از آنجایی که خود یک مولد است، دارای عملکرد مناسب‌تر و برتری بیشتر نسبت به باتری جهت استفاده بعنوان منبع پشتیبان را دارا است. از طرفی استفاده از این دو در کنار یکدیگر می‌تواند باعث مدیریت انرژی خیلی مناسبی در زمان کمبود انرژی و نیاز مصرف‌کننده در سیستم‌های هیبرید شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله ضمن بررسی اهمیت منابع تجدید در شبکه‌های قدرت و بیان استراتژی‌های مختلف سیستم‌های هیبرید در ریزشبکه‌ها به بررسی عملکرد پیل سوختی و باتری نسبت به تغییرات سوئیچینگ و جبران‌سازی انرژی بارمصرفی پرداخته شد. همچنین شبیه‌سازی با در نظرگرفتن ویژگی‌های دینامیکی و رفتاری در محیط سیستمی Matlab/Simulink SimPower مدل شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌داد که پیل سوختی و باتری می‌توانند روش مناسبی جهت حفظ پایداری داخلی، کاهش وابستگی به شبکه قدرت و کاهش نوسانات تولید در ریزشبکه‌ها باشند و بکارگیری صحیح آن‌ها بعنوان منابع پشتیبان می‌تواند باعث عدم وابستگی ریزشبکه‌ها به شبکه قدرت شود.

۶. منابع

Trends in photovoltaic applications., Survey report of selected IEA countries between ۱۹۹۲ and ۲۰۰۴, -International Energy Agency Photovoltaics Power Systems Programme (IEA PVPS), ۲۰۰۵.

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 Transactions on Industry Applications, ۲۰۱۸, ۵۴ (۱), pp. ۱۰۲-۱۱۱.

B, Benlahbib., N, Bouarroudj., S, Mekhilef., D, Abdeldjalil., T, Abdelkrim., F, Bouchafaa., and A, Lakhdari., Experimental investigation of power management and control of PV/wind/fuel cell/battery hybrid energy system microgrid, -International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۰, ۴۵ (۵۳), pp. ۲۹۱۱۰-۲۹۱۲۲.

A, Jahangir., and S, Mishra., Autonomous battery storage energy system control of PV-wind based DC microgrid, -۲۰۱۸ ۲nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE), Shillong, India, ۲۰۱۸, pp. ۱-۶.

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, ۲۰۱۴, ۷۷, pp. ۵۱۴-۵۲۶.

D-K, Choi., B-K, Lee., S-W, Choi., C-Y, Won., and D-W, Yoo., A novel power conversion circuit for cost-effective battery-fuel cell hybrid systems, -Journal of Power Sources, ۲۰۰۵, ۱۵۲, pp. ۲۴۵-۲۵۵.

S, Mubaarak., D, Zhang., L, Wang., M, Mohan., P.M, Kumar., C, Li., Y, Zhang., and M, Li., Efficient photovoltaics-integrated hydrogen fuel cell-based hybrid system: energy management and optimal configuration, -Journal of Renewable and Sustainable Energy, ۲۰۲۱, ۱۳ (۱).

F.J.V, Fernandez., A.D.L.H, Jimenz., F.S, Manzano., and J.M.A, Marquez., An energy management strategy and fuel cell configuration proposal for a hybrid renewable system with hydrogen backup, -International Journal of Energy Optimization and Engineering, ۲۰۱۷, ۶(۱), pp. ۱-۲۲.

A.R.T, Bambang., A.S, Rohman., C.J, Dronkers., R, Ortega., and A, Sasongko., Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source using model predictive control, -IEEE Transactions on Industrial Informatics, ۲۰۱۴, ۱۰ (۴), pp. ۱۵۵۱-۳۲۰۳.

L, Zhao., J, Brouwer., S, James., J, Siegler., E, Peterson., A, Kansal., and J, Liu., Dynamic performance of an in-rack proton exchange membrance fuel cell battery system to power servers, -International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۱۷, ۴۲, pp. ۱۰۱۵۸-۱۰۱۷۴.

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, ۲۰۱۴, ۸, pp. ۵۷-۶۵.

M, Elsied., A, Oukaour., H, Gualous., and R, Hassan., Energy management and optimization in microgrid system based on green energy, -Energy, ۲۰۱۵, ۸۴, pp. ۱۳۹-۱۵۱.

R, Wang., P, Wang., G, Xiao., and S, Gong., Power demand and supply management in microgrids with uncertainties of renewable energies, -International Journal of Electrical Power & Energy Systems, ۲۰۱۴, ۶۳, pp. ۲۶۰-۲۶۹.

T, Wang., D, O'Neill., and H, Kamath., Dynamic control and optimization of distributed energy resources in a microgrid, -IEEE Transactions on Smart Grid, ۲۰۱۵, ۶ (۶), pp. ۲۸۸۴-۲۸۹۴.

D, Maradin., Advantage and disadvantage of renewable energy sources utilization, -International Journal of Energy Economics and Policy, ۲۰۲۱, ۱۱ (۳), pp. ۱۷۶-۱۸۳.

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, ۲۰۲۰, ۱۴ (۹), pp. ۱۷۲۶-۱۷۳۷.

D.B, Nelson., M.H, Nehrir., and C, Wang., Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems, -Renewable Energy, ۲۰۰۶, ۳۱, pp. ۱۶۴۱-۱۶۵۶.

Y, Zhu., and K, Tomsovic., Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells, -Electric Power Systems Research, ۲۰۰۲, ۶۲, pp. ۱-۱۱.

P.A, Lehman., C.E, Chamberlin., G, Pauletto., and M.A, Rochleau., Operating experience with a photovoltaic-hydrogen energy system, -Advances in hydrogen energy, ۱۹۹۷, ۲۲ (۵), pp. ۴۶۵-۴۷۰.

S.B, Silva., M.A.G.D, Oliveira., and M.M, Severino., Economic evaluation and optimization of a photovoltaic–fuel cell–batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon, -Energy Policy, ۲۰۱۰, ۳۸, pp. ۶۷۱۳-۶۷۲۳.

M.Y, El-Sharkh., A, Rahman., M.S, Alam., P.C, Byrne., A.A, Sakla., and T, Thomas., A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications, -Journal of Power Sources, ۲۰۰۴, ۱۳۸, pp. ۱۹۹–۲۰۴.

M, Salehirad., and M. M, Emamzadeh., Energy management and harmonic compensation of micro-grids via multi-agent systems based on decentralized control architecture, -IET Renew. Power Gener, ۲۰۲۳, ۱۷, pp. ۱۲۶۷-۱۲۸۵.

۲۳. صالحی راد، محمدرضا و ملائی امامزاده، محمد؛ مدیریت انرژی ریزشبکه ها از طریق سیستمهای چندعاملی مبتنی بر ساختار کنترل غیرمتمرکز، دومین کنفرانس پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، اهواز، ۱۴۰۰

۲۴. صالحی راد، محمدرضا و ملائی امامزاده، محمد؛ جبران سازی هارمونیک های جریان در ریزشبکه ها ازطریق سیستمهای چندعاملی مبتنی بر روش فیلتر اکتیو موازی، دومین کنفرانس پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، اهواز، ۱۴۰۰