

طراحی، مدل سازی و شبیه سازی کنترل کننده مرکزی برای سیستم تولید الکتریسیته با منابع تجدیدپذیر ترکیبی در حضور ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)

حامد علی اکبر^۱، مهیار خسروی^۲، احمد غلامی^۳، محسن کلانتر^۴

^۱دانشگاه علم و صنعت ایران، hamedaliakbar@elec.iust.ac.ir

^۲دانشگاه علم و صنعت ایران، mkhosravi@elec.iust.ac.ir

^۳دانشگاه علم و صنعت ایران، gholami@iust.ac.ir

^۴دانشگاه علم و صنعت ایران، kalantar@iust.ac.ir

چکیده - امروزه رشد سریع فناوری های مرتبط با منابع انرژی تجدیدپذیر که منجر به کاهش قیمت آن ها گشته است، امکان کاهش مصرف سوخت های فسیلی و در نتیجه حفظ محیط زیست را برای کشورها فراهم آورده است. یکی دیگر از مزایای این منابع، امکان استفاده از آن ها در مناطق دور دست است. به منظور مجتمع سازی این منابع، مفهوم ریز شبکه که در واقع تحقق مجتمع سازی آن ها است، ارائه شده است. کنترل ریز شبکه ها با توجه به حضور منابع تولید پراکنده (DG) و ادوات الکترونیک قدرت، مساله ای مهم و غیر قابل اجتناب بوده و خواهد بود. در این مقاله در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink مجموعه ای شامل مولد خورشیدی (PV)، مولد بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) و مزرعه بادی در کنار ادوات الکترونیک قدرت و ذخیره ساز از نوع باتری به همراه بار خطی سه فاز مورد مطالعه قرار گرفته و شبکه اصلی به صورت شین بی نهایت مدل شده است. در کنار این المان ها، سیستمی تحت عنوان کنترل کننده مرکزی نیز معرفی شده و نتایج شبیه سازی مربوطه آورده شده است. این سیستم با به کارگیری مولد میکروتوربین و باتری در شرایط تغییر بار، سیستم را کنترل کرده و توان خروجی مابقی مولدها را ثابت نگه می دارد. این کنترل کننده همچنین شرایط کیفیت توان سیستم و پایداری آن را نیز بهبود می بخشد. کلید واژه - باتری، ریز شبکه، کنترل کننده مرکزی، میکروتوربین.

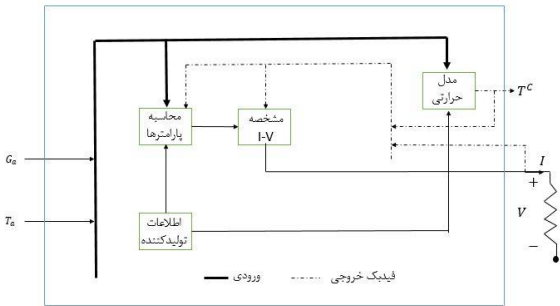
ترکیبی [۴]، امکان عملکرد در دو حالت مستقل و متصل به شبکه و مزایای متعدد دیگر می شود. لازم به ذکر است که معمولاً تجهیزات الکترونیک قدرت به عنوان واسطه بین تجهیزات و ریز شبکه مورد استفاده قرار می گیرند [۵]. به منظور عملکرد مناسب ریز شبکه، این مبدل ها باید به نحو مناسب کنترل شوند. در این زمینه کارهای فراوانی صورت گرفته است. به منظور جلوگیری از ایجاد جریان گردشی بین مبدل ها بدون به کارگیری هر گونه تجهیزات مخابراتی خاصی، از روش کنترل دروپ استفاده می شود [۶]. عیب این کنترل آن است که باعث انحرافات ولتاژ و فرکانس سیستم می شود. به منظور غلبه بر این مشکل، از کنترل ثانویه استفاده می شود [۷]. جهت حل مشکل ذکر شده در مورد کنترل دروپ، یک کنترل ثانویه اضافی برای ثابت نگه داشتن دامنه و فرکانس ولتاژ سیستم اضافه می شود. یک کنترل ثالثیه اضافی نیز می تواند به منظور کنترل دو جهته جریان قدرت به کار گرفته شود. یک چالش مهم دیگر، امکان ایجاد ناپایداری در شبکه به علت اتصال منابع تولید پراکنده در صورت کنترل

۱- مقدمه

امروزه به علت تقاضای افزایش انرژی الکتریکی، منابع انرژی تجدیدپذیر در حال ورود به شبکه های الکتریکی نوین هستند [۱]. در این میان انرژی فتوولتائیک، بادی و برق آبی پر- استفاده ترین موارد هستند. رشد سریع فناوری های مرتبط با این منابع که منجر به کاهش قیمت آن ها گشته است، امکان کاهش مصرف سوخت های فسیلی و در نتیجه حفظ محیط زیست را برای کشورها فراهم آورده است. به منظور مجتمع سازی این منابع انرژی تجدیدپذیر، مفهوم ریز شبکه که همان منابع تجدیدپذیر ترکیبی می باشد، در سالیان گذشته ارائه شده است [۲]. سیستم با منابع تجدیدپذیر ترکیبی (ریز شبکه) را می توان به صورت بخشی از شبکه تعریف نمود که شامل مولدها، مبدل های الکترونیک قدرت، ذخیره سازهای پراکنده انرژی و بارهای محلی می باشد. به کارگیری ریز شبکه ها باعث ایجاد مزایایی هم چون هوشمندسازی و انعطاف بیشتر شبکه [۳]، تشکیل سیستم های

- مولد خورشیدی نهایتاً بصورت یک منبع جریان مدل می شود.

باید این نکته را متذکر شد که چون شبکه اصلی بصورت منبع ولتاژ و مولد خورشیدی به صورت منبع جریان مدل شده است، می بایست علاوه بر فرکانس این دو منبع، فاز آن ها نیز برای اتصال برابر باشد.



شکل ۱: بلوک کلی سیستم فتوولتائیک

۲-۲- ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG)

به منظور به دست آوردن مدلی برای DFIG، ابتدا مدل یک ماشین القایی رتور سیم پیچی شده را تعیین خواهیم نمود. این مدل با همان رویکرد مربوط به ماشین القایی قفس سنجابی به دست می آید، با این تفاوت که در این جا ولتاژهای رتور غیر صفر هستند. DFIG دارای سه سیم پیچ در استاتور است. سیم پیچ های رتور دارای اتصال ستاره بوده و سه فاز آن به یک سیستم حلقه لغزان متصل شده اند که این امر امکان دسترسی به ولتاژ و جریان های رتور را فراهم می کند. این موضوع امکان عملکرد ماشین به عنوان موتور یا ژنراتور، مستقل از سرعت گردش را فراهم می کند. کنترل ولتاژ به منظور تولید میدان مغناطیسی در داخل ماشین مورد استفاده قرار گرفته و هم چنین امکان عملکرد در مدهای مختلف را برای ماشین فراهم می کند [۸].

برای مدل سازی DFIG ابتدا معادلات را در حوزه سه فاز نوشته و سپس با اعمال تبدیلات مناسب، این معادلات در قاب مرجع مناسب به صورت نوشته می شوند:

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - M^2) \frac{dI_{rd}}{dt} - s\omega_s (L_r - M^2) I_{rq} \quad (3)$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} - s\omega_s (L_r - M^2) I_{rd} + s \frac{M V_s}{L_s} \quad (4)$$

نامناسب آن ها است. بنابراین باید تمهیداتی در این زمینه برای روش های کنترلی در نظر گرفته شود.

در این مقاله ایده ای نو برای سیستم ریز شبکه به قسمی که پارامترهای مرتبط با کیفیت توان و فرکانس آن و همچنین پایداری به نحوی مناسب کنترل شوند، ارائه شده است. در روش معرفی شده از سیستم کنترل کننده مرکزی به عنوان قلب سیستم استفاده می شود. این سیستم در شرایط تغییر بار، مولدهای خورشیدی و بادی را در شرایط توان ثابت نگه داشته و مولد میکروتوربین و ذخیره ساز (باتری) را برای پاسخگویی به بار کنترل می کند. تحت این شرایط می توانیم ادعا کنیم که سیستمی پایدار و با وضعیت کیفیت توان مناسب خواهیم داشت.

۲- مدل سازی سیستم ریز شبکه

در این قسمت تنها مدل های مولد خورشیدی و مولد بادی به صورت ژنراتور القایی دو سو تغذیه و هم چنین سیستم کنترل کننده مرکزی به عنوان قلب سیستم معرفی می شود. سیستم دارای تجهیزات دیگری مانند ذخیره ساز از نوع باتری، مولد میکروتوربین، ادوات الکترونیک قدرت و حلقه های کنترلی متنوع می باشد که از ذکر آن ها خودداری شده است.

۲-۱- مولد خورشیدی

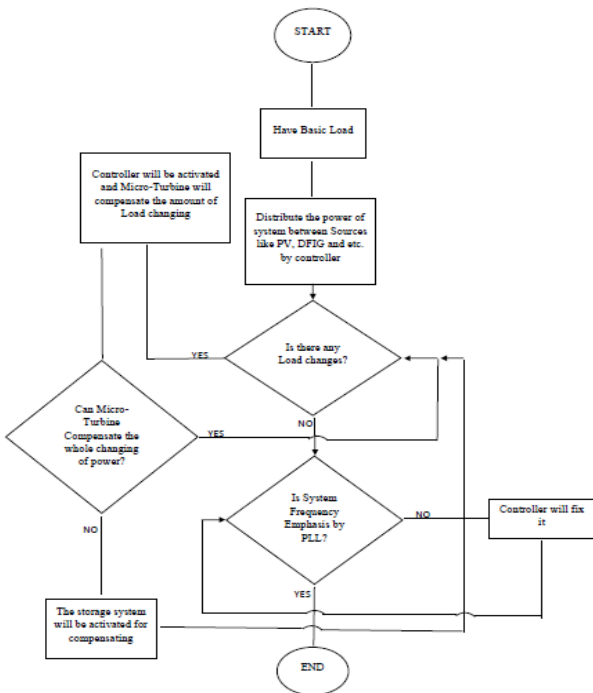
تا به حال روش های متعددی برای بیان ویژگی های یک سلول فتوولتائیک پیشنهاد شده است که پرکارترین آن ها مدل های تشکیل شده از یک یا دو دیود می باشد. از لحاظ ریاضی مدل های ساخته شده از یک دیود ساده ترین و پرکاربردترین می باشند. این مدل مشخصه جریان- ولتاژ یک سلول خورشیدی را نشان می دهد معادلات مربوط به این مدل و مدار معادل آن در مرجع [۸] آمده است که از ذکر جزئیات خودداری می شود.

بلوک کلی سیستم فتوولتائیک جهت مدل سازی به صورت شکل ۱ است. با توجه به این شکل موارد زیر قابل ذکر است:

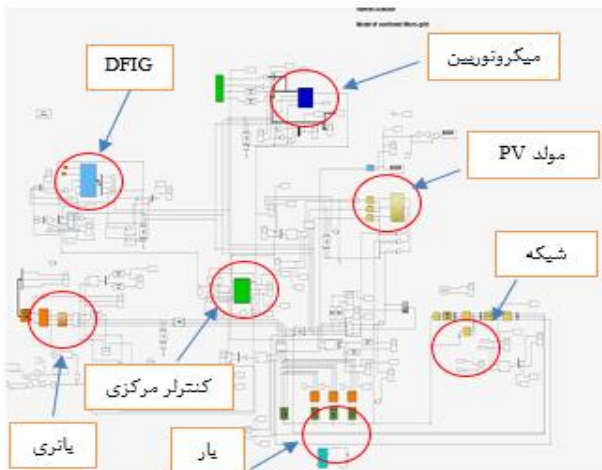
- G_a تابش خورشید و T_a درجه حرارت محیط است.
- با توجه به روابط ریاضی بیان شده و مشخصه ولتاژ- جریان، سیستم PV قابل مدل سازی بوده و پارامترهای لازم آن محاسبه می شود.

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

- طراحی کنترل کننده با هدف بهبود شرایط کلی کیفیت توان سیستم ریزشبه و بالاخص منابع تولید پراکنده
 - نهایتا کنترل کننده طراحی شده هم شرایط تغییر بار را در نظر گرفته و سیستم را متناسب با آن پایدار می کند و هم شرایط کیفیت توان سیستم را بهبود می بخشد.
- سیستم مدل شده در فضای نرم افزار MATLAB/Simulink به صورت شکل ۴ است.

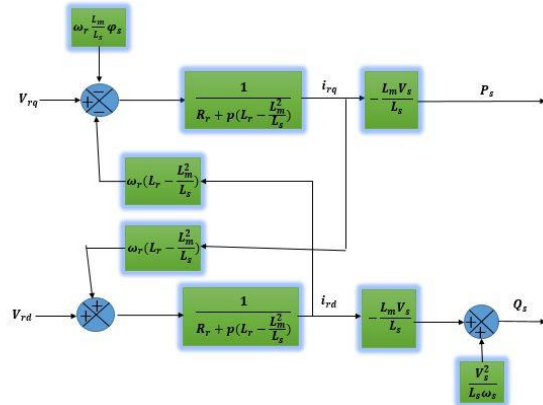


شکل ۳: فلوچارت عملکرد کنترل کننده مرکزی



شکل ۴: دیاگرام کلی سیستم مدل شده

در نهایت بلوک دیاگرام مربوطه به صورت شکل ۲ تشکیل می شود:



شکل ۲: بلوک کلی DFIG

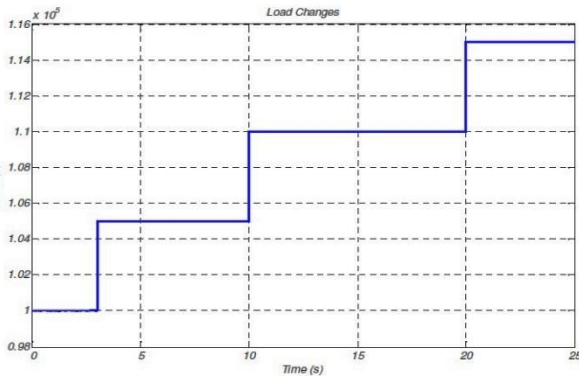
۲-۳- طراحی کنترل کننده مرکزی

کنترل کننده مرکزی اطلاعات شبکه شامل میزان بار مصرفی و همچنین مقدار تولید هر یک از مولدها را گرفته و با توجه به این مقادیر اخذ شده، میزان تولید بهینه هر یک از تولیدکنندگان را معین می کند.

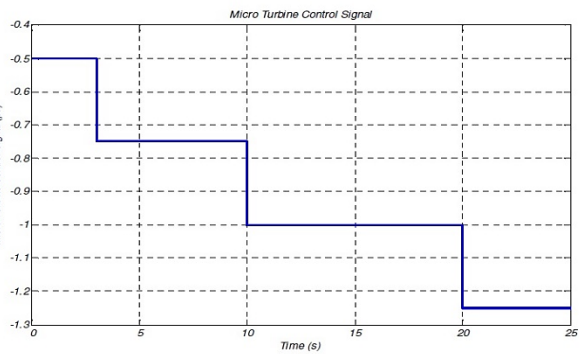
ذکر این نکته ضروری است که برای هر یک از بارهای فرض شده می بایست پخش بار بهینه انجام داد که در این مقاله از ذکر جزئیات این بحث خودداری شده است. استراتژی بهینه ای که در این مقاله برای سیستم کنترل کننده مرکزی در نظر گرفته شده است، به این صورت است که در شرایط تغییر بار که به صورت افزایشی می باشد، میکروتوربین وظیفه تامین بار اضافه شده را داشته باشد. شکل ۳ دیاگرام عملکرد کنترل کننده مرکزی را نشان می دهد.

در نهایت الگوریتم سیستم کنترل کننده مرکزی شامل مراحل زیر است:

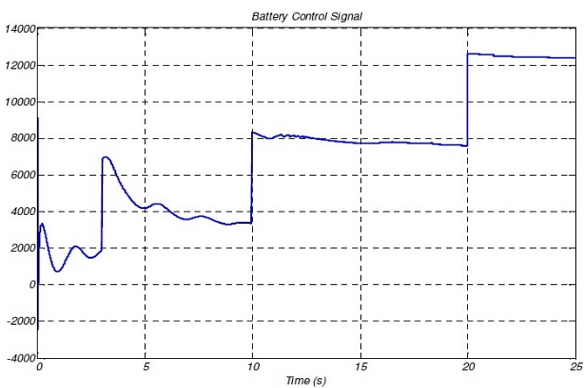
- برای هر میزان بار، انجام پخش بار بهینه و تعیین مقدار تولید منابع
- تامین اضافه بار توسط میکروتوربین، ارسال سیگنال در شرایط تغییر بار به میکروتوربین تا بتواند خروجی خود را به میزان تغییر بار افزایش یا کاهش دهد (در این مقاله حالت افزایش دیده شده است)
- حل تاخیر زمانی میکروتوربین بوسیله منابع دیگر با پاسخ زمانی سریع مانند باتری و نهایتا شبکه



شکل ۵: تغییرات پله‌ای بار



شکل ۶: سیگنال کنترلی میکروتوربین



شکل ۷: سیگنال کنترلی باتری

این سیگنال‌های کنترلی تولید شده توسط کنترل کننده مرکزی باعث تغییرات توان در خروجی مولد میکروتوربین و ذخیره‌ساز باتری شده که در نهایت شرایط سیستم را در اثر افزایش بار پایدار ساخته و توان خروجی مولد خورشیدی و بادی را در اثر تغییر بار ثابت نگه می‌دارد.

۳-۳ سایر نتایج حاصل از سیستم

در شکل‌های ۸ و ۹ نتایج شبیه‌سازی ولتاژ- جریان- توان اکتیو و راکتیو حاصل از مولد خورشیدی و مولد DFIG نمایان

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش شبیه‌سازی سیستم مدل شده انجام گرفته و نتایج آن ارائه خواهد شد و تحلیل‌های لازم بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد.

۳-۱- مشخصات سیستم مدل شده

در سیستم شبیه‌سازی شده موارد جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

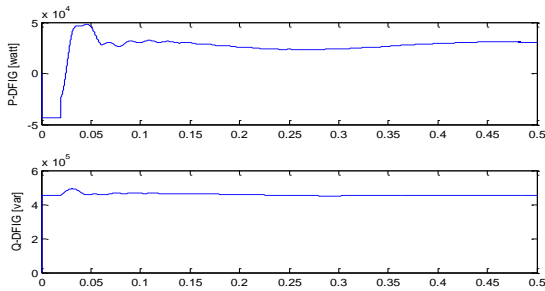
جدول (۱): مشخصات سیستم مدل شده

مشخصات	مدل
توان ثابت 30 kW، مدل شده با منبع جریان	مولد خورشیدی
DFIG با 4 توربین 10 kW	مولد بادی
بار سه فاز با افزایش به صورت پله‌ای در سه مرحله به این صورت:	بار
• بار پایه 100 kW	
• بار دوم پس از 3 ثانیه وارد شده و بار کلی به 105 kW می‌رسد.	
• بار سوم پس از 10 ثانیه وارد شده و بار کلی به 107 kW می‌رسد.	
• بار چهارم بعد از 20 ثانیه وارد شده و بار کلی به 197kW می‌رسد.	
بارها به صورت مقاومتی و خطی می‌باشند.	
3 توربین بادی با ژنراتور سنکرون به میزان توان 20 kW	مزرعه بادی
از نوع باتری Lead-Acid	ذخیره‌ساز
با توان نامی 100 kW	میکروتوربین
ولتاژ فاز به فاز سیستم برابر 269 ولت بوده و ضریب قدرت 0.9 فرض شده است.	ولتاژ سیستم و ضریب قدرت

۳-۲ شبیه‌سازی قلب سیستم (کنترل کننده مرکزی)

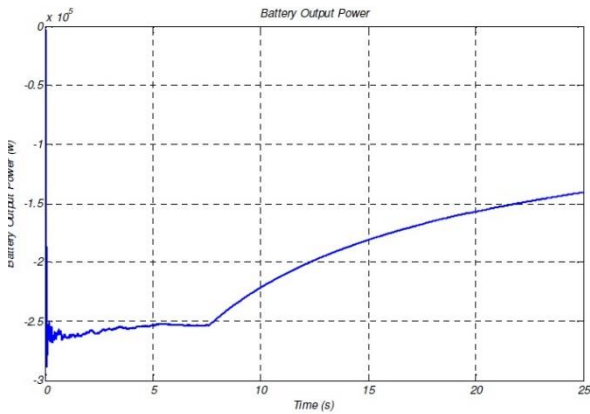
با توجه به شکل‌های ۵-۷ که به ترتیب بیانگر تغییرات بار، سیگنال کنترلی باتری و سیگنال کنترلی میکروتوربین می‌باشد، می‌توان باتوجه به توضیحات بخش ۲-۳ شرایط کنترل سیستم را در اثر افزایش بار به سهولت تحلیل کرد.

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

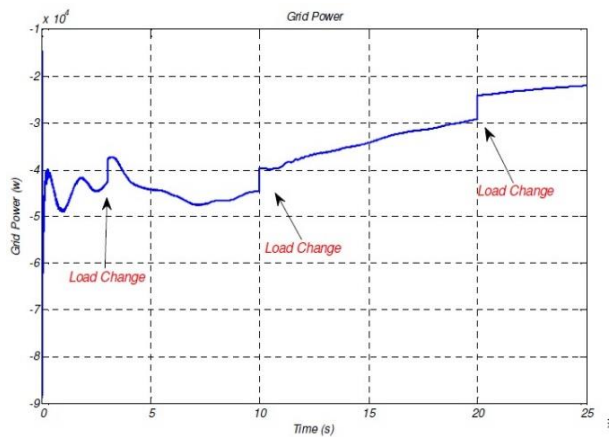


شکل ۹: خروجی های DFIG

شکل ۱۰ نشان دهنده توان خروجی باتری به عنوان ذخیره ساز سیستم می باشد. شکل ۱۱ نیز توان مبادله شده بین سیستم و شبکه را نشان می دهد. مطابق شکل می توان دریافت که توان از شبکه (شین بی نهایت) به سیستم تزریق می شود و همچنین نقاط پرش نشان دهنده تغییرات بار می باشد. شکل ۱۲ نیز توان خروجی مولد میکروتوربین را نشان می دهد.

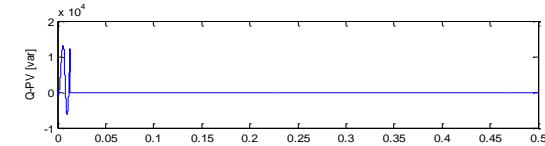
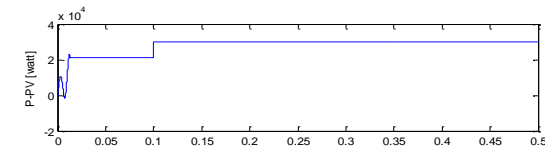
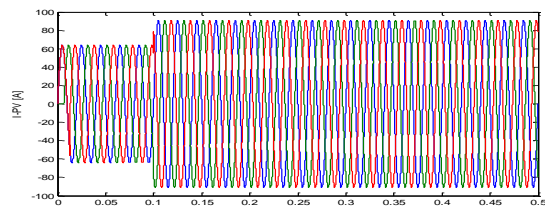
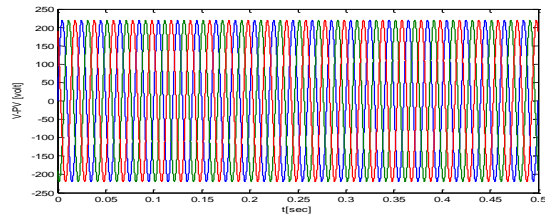


شکل ۱۰: توان خروجی باتری

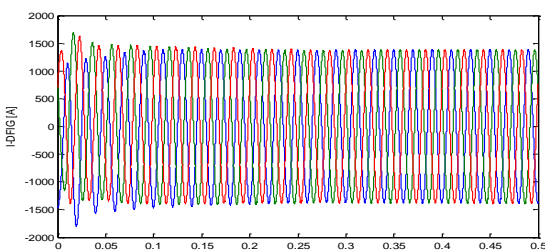
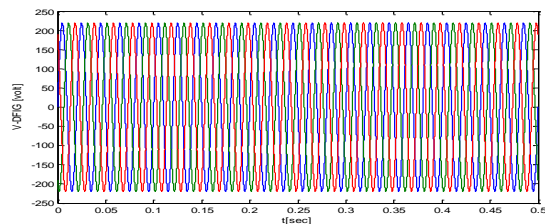


شکل ۱۱: توان مبادله شده بین شبکه و ریزشکبه

است. با توجه به شکل های زیر می توان مشاهده نمود با تغییر بار، توان هیچ کدام از دو مولد فوق الذکر تغییر نکرده و ثابت می ماند که این موضوع از مکانیزم کنترل کننده مرکزی نشئت می گیرد.



شکل ۸: خروجی های مولد PV



- source inverters”, IEEE Transactions on Industrial Electronics , Vol 60, 2013
- [6] Guerrero JM, Chandorkar M, Lee T, Loh PC. “Advanced control architectures for intelligent microgrids-Part I: decentralized and hierarchical control”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 60, 2013
- [7] Vasquez JC, Guerrero JM, Savaghebi M, Eloy-Garcia J, Teodorescu R. “Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters”. IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol 60, 2013
- [8] Allal M, Bouzid, Josep M, Guerrero, Ahmed Cheriti, Mohamed Bouhamida, Pierre Sicard, Mustapha Benghanem, “A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications” Elsevier on Renewable and Sustainable Energy, 2015.



شکل ۱۲: توان خروجی میکروتوربین

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله منابع تجدیدپذیر انرژی شامل مولد میکروتوربین، مولد خورشیدی (PV)، مولد بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) و مزرعه بادی در کنار ادوات الکترونیک قدرت و ذخیره‌ساز باتری و بار خطی سه فاز و شبکه به صورت شین بی‌نهایت مدل شدند و نتایج شبیه‌سازی آنها ارائه شد. در کنار تمام این المان‌ها، سیستمی به‌عنوان قلب سیستم یعنی کنترل‌کننده مرکزی نیز معرفی شد که در شرایط تغییر بار سیستم را پایدار نگه می‌داشت و شرایط کیفیت توان سیستم را نیز با مکانیزم عملکردش کنترل می‌نمود. هدف کنترل‌کننده این امر بود که به‌وسیله باتری و میکروتوربین تغییرات بار را کنترل کرده و مولدهای دیگر سیستم یعنی بادی و خورشیدی را در شرایط تولید ثابت و پایدار نگه دارد.

مراجع

- [1] Chicco G, Mancarella P. “Distributed multi-generation: a comprehensive view” Elsevier on Renewable and Sustainable Energy, 2009.
- [2] Xiaonan L, Guerrero JM, Kai S, Vasquez JC, Teodorescu R, Lipei H. “Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids.” IEEE Transactions on Smart Grid, Vol 5, 2014
- [3] Guerrero JM, Vasquez JC, Matas J, Luis GV, Castilla M. “Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids- A general approach toward standardization” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 58, 2011
- [4] O. Palizban, K. Kauhaniemi, J.M. Guerrero, “Microgrids in active network management—Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation”, Elsevier on Renewable and Sustainable Energy, 2014
- [5] Vasquez JC, Guerrero JM, Savaghebi M, Eloy-Garcia J, Teodorescu R. “Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage