



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 12, No. 1, 2021
Research Paper

Performance analysis of a DC microgrid as a virtual synchronous machine in grid frequency and voltage control

Farzaneh Shourkeshti¹, Mahdi Banejad¹, Mohammad Hoseintabar Marzebali¹, Ali Akbarzadeh Kalat¹

¹ Dept. of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract:

Recently, due to environmental issues and lack of fossil resources, the widespread use of renewable resources has been considered. The use of renewable resources in the power systems leads to decentralized generation and due to the changing nature of these resources, many fluctuations have been added to the network. DC microgrids, as a small power grid, make it easy to use and control these resources in the distribution network. Excessive penetration of power electronic-based renewable sources has reduced the inertia and damping, making the system more sensitive to disturbances and reducing the system stability margin. This paper uses a DC microgrid structure connected to an AC network equipped with a virtual synchronous machine to manage automatically the power of the DC microgrid and AC network and analyze the role of virtual inertia in small signal stability. To verify the proposed method, the network has been examined and approved under different operating conditions and inertias. In this method, using the voltage source converter response and proper design dual droop control of the voltage, frequency, and active output controllers, the necessary support for adjusting the system frequency is provided to withstand disturbances, and therefore, stability is enhanced in different conditions.

Keywords: Virtual Synchronous Machine, DC Microgrid, Virtual Inertia, Voltage Source Converter, Dual Droop Control.



2252-083X/ © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.123025.1382>

تحلیل عملکرد ریزشبه DC به صورت ماشین سنکرون مجازی

در کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه

فرزانه شورکشتی^۱، مهدی بانژاد*^۲، محمدحسین تبار مرزبالی^۳، علی اکبرزاده کلات^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

farzaneh.shourgeshti@shahroodut.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

m.banejad@Shahroodut.ac.ir

۳- استادیار دانشکده برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

M.hoseintabar@shahroodut.ac.ir

۴- دانشیار دانشکده برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

akbarzadeh@shahroodut.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر با توجه به بحران‌های زیست‌محیطی و کمبود منابع فسیلی، استفاده از منابع تجدیدپذیر شایان توجه است. استفاده از منابع تجدیدپذیر در سیستم قدرت، تولید را غیرمتمرکز کرده و با توجه به طبیعت متغیر این منابع، نوسانات زیادی در شبکه اضافه شده‌اند. ریزشبه‌های DC به‌عنوان شبکه قدرت کوچک، امکان استفاده و کنترل این منابع را در سمت توزیع آسان کرده‌اند. نفوذ زیاد منابع تجدیدپذیر مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت، اینرسی و میرایی را کاهش داده‌اند؛ بنابراین، سیستم‌های جدید به اغتشاشات حساس‌تر شده‌اند و حاشیه پایداری سیستم کاهش یافته است. در این مقاله از ریزشبه DC متصل به شبکه AC مجهز به ماشین سنکرون مجازی به منظور مدیریت توان خودکار ریزشبه DC و شبکه AC و تحلیل نقش اینرسی مجازی در پایداری سیگنال کوچک استفاده شده است. شبکه تحت حالت‌ها و اینرسی‌های مختلف برای تأیید روش مذکور بررسی و تأیید شده است. در این روش با استفاده از پاسخ مبدل منبع ولتاژ و با طراحی مناسب کنترل اکتی دوگانه کنترل‌کننده‌های ولتاژ، فرکانس و توان اکتیو خروجی، پشتیبانی لازم برای تنظیم فرکانس سیستم در مواجهه با اغتشاشات فراهم می‌شود و پایداری شبکه در شرایط مختلف بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ماشین سنکرون مجازی، ریزشبه DC، اینرسی مجازی، مبدل منبع ولتاژ، کنترل اکتی دوگانه

۱- مقدمه

ایمن و باکیفیت نیازمندند. مسائل زیست‌محیطی و نگرانی از اتمام منابع تجدیدناپذیر موجب شده است نیاز به منابع انرژی جدید پیش از پیش احساس شود [۱]. به منظور رفع این مشکلات، استفاده از منابع تولید پراکنده مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ^۱ به سرعت در سیستم قدرت در حال افزایش است.

توان در شبکه‌های سنتی با استفاده از ماشین‌های سنکرون بزرگ تأمین می‌شود که روتورشان با جرم بسیار سنگین در حال گردش است. چرخش این جرم بسیار سنگین باعث ایجاد اینرسی زیاد در شبکه است. این اینرسی

در حال حاضر، سیستم‌های قدرت فعلی با چالش‌هایی از قبیل فرسودگی مواجه‌اند. جوامع مدرن بشری به منبع انرژی

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۹

نام نویسنده مسئول: مهدی بانژاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده برق و رباتیک

شبکه هیچ تفاوتی میان ماشین سنکرون حقیقی و مجازی وجود ندارد. اینرسی مجازی برای هر واحد تولید پراکنده با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت، منابع ذخیره انرژی کوتاه مدت و مکانیسم کنترلی مناسب فراهم می‌شود. ماشین سنکرون حقیقی صرف نظر از فیزیک آنها با معادلات دیفرانسیل توصیف می‌شوند. این معادلات اساس کنترل کننده‌های VSM هستند [۳،۴،۷].

در روش کنترل با VSM واحد مانند یک ژنراتور سنکرون عمل خواهد کرد و مشخصات اینرسی و میرایی مانند ماشین های سنکرون را برای یک فاصله زمانی کوچک ارائه می‌دهد؛ در نتیجه، مفهوم اینرسی مجازی به منظور مشارکت واحدهای تولید پراکنده در شبکه ها بدون به خطر افتادن پایداری شبکه بسیار مهم خواهد بود [۸].

در این مقاله، مبدل منبع ولتاژ به عنوان رابط برپایه ماشین سنکرون مجازی بین شبکه AC و منابع انرژی توزیع شده گوناگون در جهت DC ارتباط برقرار می‌کند. با این مفهوم، DGها، بارها و ذخیره‌های انرژی در ریزشبکه DC با استفاده از VSM جمع می‌شود. VSM و ریزشبکه DC با هم به نیازهای کوتاه مدت و بلندمدت تنظیم فرکانس شبکه پاسخ خواهند داد و مدیریت توان خودکار برای شبکه AC و ریزشبکه DC به دست می‌آید.

بیک^۸ و هیس^۹ انگلیسی در سال ۲۰۰۷، نخستین پیشنهاد یک ماشین سنکرون مجازی را منتشر و «VISMA» نام گذاری کردند [۹]. پس از آن، چندین روش دیگر برای افزودن اینرسی مجازی به توان مبدل‌های الکترونیکی با تقلید از ویژگی‌های ماشین سنکرون، اما با تفاوت‌های چشمگیری در اصطلاحات، برنامه‌های کاربردی هدفمند و پیاده‌سازی‌های پیشنهادی ارائه شدند [۱۰]. در مرجع [۱۱] یک ماشین سنکرون مجازی برای تقلید از ویژگی‌های حالت گذرا و حالت پایدار ماشین سنکرون استفاده شده است. در [۱۲] به استفاده از ماشین سنکرون مجازی برای ادغام منابع تجدیدپذیر پرداخته شده است. در مراجع [۸،۱۳] به منظور سادگی در شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد، ماشین سنکرون مجازی یک منبع ایدئال در طرف DC در نظر گرفته شده است. در [۱۴] ماشین سنکرون مجازی در حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای با سلول فتوولتائیک و ذخیره‌کننده انرژی

زیاد عامل اصلی و ذاتی برای جلوگیری از اغتشاشات و بی‌تعادلی در سیستم است و در پایداری آن نقش مهمی دارد. علاوه بر اینرسی حاصل از چرخش روتور به دلیل اصطکاک مکانیکی و تلفات الکتریکی در سیم‌پیچ‌های استاتور و میراکننده، ماشین سنکرون خاصیت میرایی در شبکه به همراه دارد [۱]. با رشد روزافزون منابع تولید پراکنده که بیشتر بر پایه مبدل‌های الکترونیک قدرت و فاقد اینرسی و جرم دوارند و به طور معمول با استراتژی کنترل افتی که روش مرسوم برای کنترل DGها متصل به مبدل الکترونیک قدرت کنترل می‌شوند، اینرسی کل شبکه کاهش پیدا می‌کند و نگرانی‌هایی درباره اینرسی و میرایی شبکه به وجود می‌آید؛ زیرا هم‌زمان با افزایش تزریق توان اکتیو باید میرایی و اینرسی لازم را نیز فراهم کرد [۲].

با کاهش اینرسی، شبکه به بی‌تعادلی و اغتشاشات حساس تر می‌شود و به آن سریع‌تر پاسخ می‌دهد؛ در نتیجه، پایداری سیستم دچار مشکل می‌شود. همچنین با کاهش ثابت اینرسی، سرعت تغییرات فرکانس افزایش می‌یابد و ممکن است سیستم برای دامنه عدم تعادل کوچک نیز وارد فرایند بارزدایی^۲ شود؛ بنابراین، برای شبکه‌های سریع و حساس جدید با وجود نوسانات و اغتشاشات زیاد منابع تجدیدپذیر، روش کنترلی شبکه‌های سنتی کارایی نخواهد داشت؛ از این رو محققان به دنبال روش‌های جدید برای استراتژی کنترل مبدل‌اند. یک راه‌حل برای پایداری چنین شبکه‌های، به‌ویژه درباره تنظیم فرکانس، ایجادکردن اینرسی اضافی از منابع فاقد اینرسی به صورت مجازی است [۳].

بنابراین، برخی از تحقیقات تقلید از اصول ماشین سنکرون^۳ (SM) را در کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت به منظور بهره‌مندی از این مزایا و نیز دستیابی به یکپارچه‌سازی همگن واحدهای منبع انرژی توزیع شده مبتنی بر مبدل پیشنهاد داده‌اند. چنین کنترل کننده‌هایی با نام‌های مختلفی از جمله ماشین سنکرون مجازی^۴ (VSM) [۴]، ژنراتور سنکرون مجازی^۵ (VSG) [۵]، سنکرونوتر^۶ (SV) [۳]، ماشین سنکرون مجازی پیشرفته^۷ (EVSM) [۶] و غیره‌اند.

VSM با تقلید از خصوصیات ماشین سنکرون متداول، کنترل افتی و اینرسی مجازی را فراهم می‌آورد و از نقطه نظر

با ژنراتور سنکرون تحلیل شده است. در [۲۶] پاسخ اینرسی توربین بادی با انواع کنترل ژنراتور سنکرون مجازی به منظور بهبود پشتیبانی فرکانس تحلیل شده است. در [۲۷] استفاده از یک ژنراتور سنکرون مجازی به منظور بهبود پایداری فرکانس در یک ریزشبه‌ک فوولتائیک دی‌زلی با ذخیره‌کننده انرژی بررسی شده است.

در این مقاله، کنترل فرکانس، ولتاژ شبکه و تقسیم توان درست با استفاده از ماشین سنکرون مجازی دارای کنترل افسی دوگانه و متصل به ریزشبه‌ک DC و شبکه AC در شرایط و اینرسی‌های مختلف شبکه آزمایش و بررسی می‌شود. برتری این روش کنترل نسبت به کنترل‌کننده‌های گفته‌شده در مراجع قبلی، در افزایش پایداری شبکه و استفاده از کنترل افسی دوگانه است که باعث مدیریت توان، کنترل فرکانس و ولتاژ به صورت خودکار می‌شود.

در بخش دوم مقاله، معادلات حاکم بر ریزشبه‌ک DC و ماشین سنکرون مجازی، استخراج و مدل‌سازی شده و بلوک دیاگرام کل شبکه به دست آمده است. در بخش سوم، اثر ماشین سنکرون مجازی در حالت اتصال ریزشبه‌ک DC تحلیل و بررسی شده که شامل باتری و سلول فتوولتائیک و توربین بادی و بار به شبکه است و در نهایت در بخش چهارم، نتیجه‌گیری شده است.

۲- ماشین سنکرون مجازی

در شکل (۱) معماری کل ماشین سنکرون مجازی و ریزشبه‌ک DC با استراتژی کنترلی آن (که در این مقاله با روش پیشنهادی به کار گرفته شده است) نشان داده شده است. سلول‌های ذخیره انرژی بر پایه باتری و سلول‌های DG مبتنی بر فتوولتائیک^۴ (PV) و توربین بادی و یک بار مقاومتی در ریزشبه‌ک DC استفاده شده‌اند. هر سلول شامل یک مبدل DC-DC متناظر در آن است. در اینجا برای تجمیع ریزشبه‌ک DC با شبکه AC با تنظیم ولتاژ و تنظیم مقادیر فرکانس، رابط است. در این شبکه، سیستم ذخیره‌ساز انرژی نسبت به ولتاژ باس DC عکس‌العمل نشان می‌دهد تا فرمان لازم برای شارش دوطرفه توان و شارژ و دشارژ صادر شود. برای سلول‌های فتوولتائیک، توان حداکثر

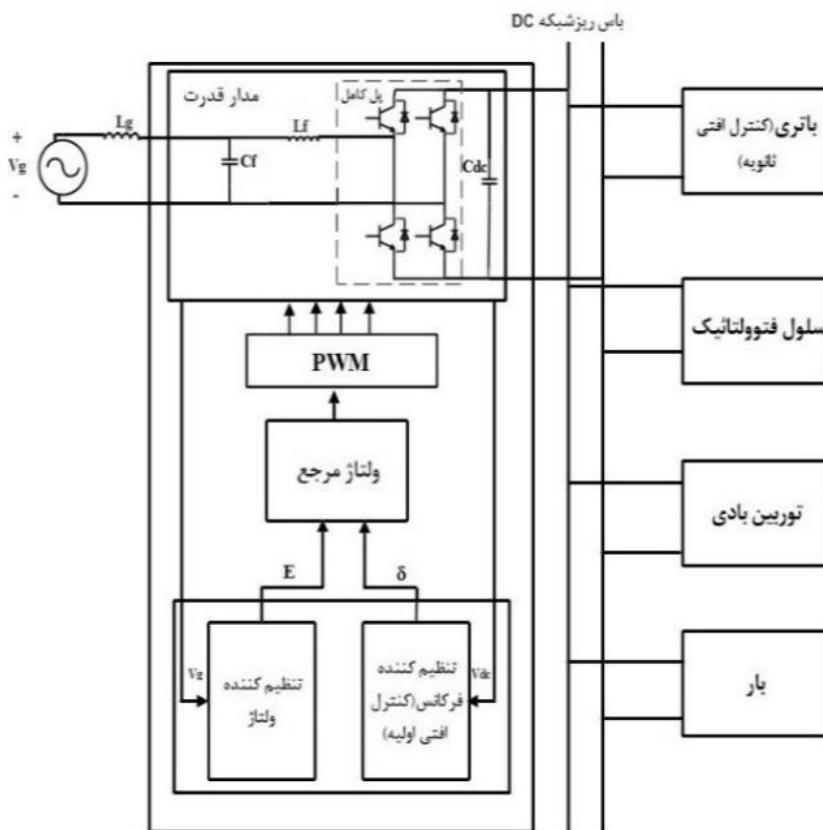
در سمت ریزشبه‌ک DC به منظور حفظ عملکرد پایدار شبکه در این دو حالت مطالعه شده است. تنظیم فرکانس و زاویه در [۱۵] برای کنترل فرکانس AC و ولتاژ DC به منظور افزایش قابلیت اطمینان کلی شبکه استفاده شده است. در [۱۶] کنترل افسی و ماشین سنکرون مجازی در حالت جزیره‌ای با هم مقایسه و برتری کنترل ماشین سنکرون مجازی نشان داده شده است. در [۱۷] کنترل افسی و ماشین سنکرون مجازی در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای، مقایسه و برتری کنترل ماشین سنکرون مجازی به علت تقلید رفتار کنترل افسی و ایجاد اینرسی مجازی نشان داده شد. در این مرجع، مدل سیگنال کوچک دو کنترل‌کننده نیز با یکدیگر مقایسه شده است. در [۱۸] مقایسه و ارزیابی پایداری سیگنال کوچک بر اساس تحلیل مقادیر ویژه بین چهار روش کنترل ماشین سنکرون مجازی با معیار گرفتن ماشین سنکرون، انجام و نشان داده شد هر چهار روش به خوبی می‌توانند پایداری شبکه را فراهم کنند. در مراجع [۲، ۱۹] مبدل منبع ولتاژ به عنوان ماشین سنکرون مجازی در حالت متصل به شبکه AC به منظور افزایش اینرسی مجازی و مهار نوسان ولتاژ باس DC بررسی شده است. در [۲۰] یک استراتژی میرایی بهبودیافته بدون تأثیر منفی بر پاسخ اینرسی ارائه شده است. در [۲۱] ویژگی‌های مکانیکی و الکتریکی یک SM برای ارائه مفهوم سنکرونورتر تقلید شده است. در [۲۲] یک سنکرونورتر در حالت‌های عملیاتی متصل به شبکه و جزیره‌ای با ارائه روش تجمیع گشتاور مجازی و شار مجازی در کنترل‌کننده بر پایه سنکرونورتر^{۱۱} برای انتقال صاف و یکپارچه با قابلیت اتصال و اجرا^{۱۱} بین این دو حالت عملیاتی ارائه داده است. در [۲۳] روش جدیدی به منظور بهبود پاسخ اینرسی ریزشبه‌ک‌های DC به وسیله توان ذخیره آرایه‌های فتوولتائیک ارائه شده است. در [۲۴] به نقش خودروهای الکتریکی^{۱۲} (EV) ایستگاه‌های شارژ^{۱۳} (CS) برای پشتیبانی از فرکانس در حالت ریزشبه‌ک جزیره‌ای متمرکز شده است. در این حالت EV‌های پارک‌شده در CS به عنوان سیستم ذخیره انرژی برای MG‌ها عمل می‌کنند و از طریق کنترل‌کننده VSG در پشتیبانی از فرکانس شبکه شرکت می‌کنند. در [۲۵] پاسخ اینرسی توربین بادی با کنترل ژنراتور سنکرون مجازی و اختلاف آن

تحلیل عملکرد ریزشبه DC به صورت ماشین سنکرون مجازی در کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه

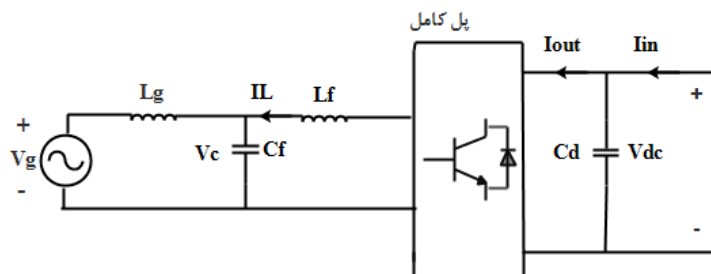
جزئیات کنترل ماشین سنکرون مجازی را نشان می دهد که شامل یک کنترل کننده ولتاژ و یک کنترل کننده فرکانس برای تولید ولتاژ مرجع برای کلیدزنی مبدل DC-AC است. تحلیل استراتژی کنترل VSM ارائه شده در شکل های ۱ تا ۳ به همراه ضوابط ریاضی آنها در بخش های بعد توضیح داده شده است.

در نظر گرفته شده است. توان توربین بادی براساس سرعت باد تغییر می کند و معمولاً برای بار الکتریکی، کنترل فرکانسی در نظر گرفته نمی شود.

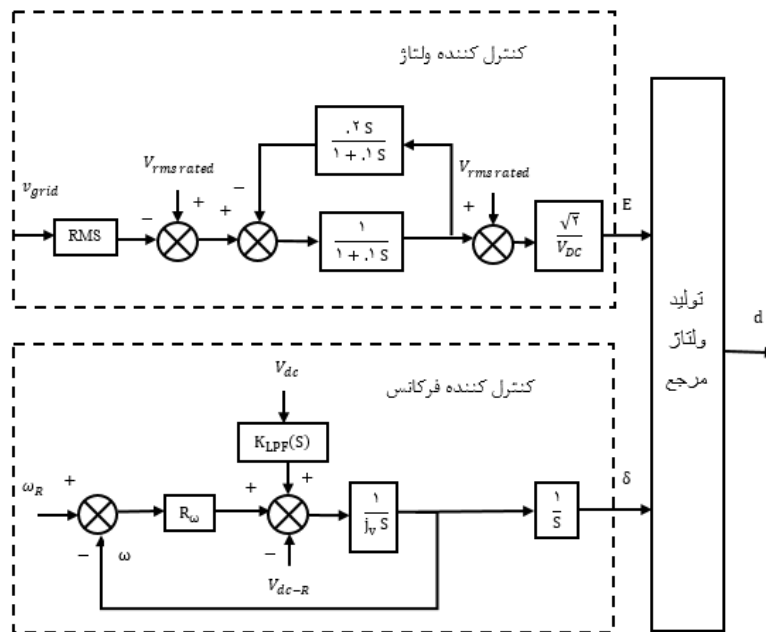
شکل (۲) مدار قدرت ماشین سنکرون مجازی را نشان می دهد که شامل یک پل کامل، فیلتر LCL و خازن DC است که به عنوان مبدل DC-AC استفاده می شود. شکل (۳)



شکل (۱): معماری کلی VSM و ریزشبه DC با استراتژی کنترلی آن



شکل (۲): مدار قدرت ماشین سنکرون مجازی



شکل (۳): استراتژی کنترل دقیق VSM

می شوند؛ بنابراین، انرژی الکتریکی ذخیره شده خازن، مشابه با انرژی جنبشی ذخیره شده روتور است [۲۹]. مطابق با شکل (۲)، خازن در سمت DC دارای ویژگی مشابه معادله نوسان است. معادله دینامیک ولتاژ خازن DC در رابطه (۲) بیان شده است [۶، ۱۵].

$$C_d V_{dc} \dot{V}_{dc} = i_{in} - i_{out} \quad (2)$$

با ضرب رابطه (۲) در V_{dc} رابطه به صورت (۳) اصلاح می شود.

$$C_d V_{dc} \dot{V}_{dc} = i_{in} V_{dc} - i_{out} V_{dc} = P_{in} - P_{out} \quad (3)$$

i_{in} جریان تزریقی از ریزش شبکه DC به C_{dc} است و i_{out} جریان از C_d به مبدل است، V_{dc} ، $C_d V_{dc}$ و P_{in} و P_{out} از VSM به ترتیب مشابه با J ، ω_m ، τ_e هستند [۶]. P_{in} توان اکتیو ورودی از ریزش شبکه DC و P_{out} توان اکتیو تزریق شده به شبکه AC است. رابطه (۲) نشان می دهد خازن DC دارای عملکرد مشابه با روتور SM دارد و می تواند به جای روتور برای کنترل شبیه سازی اینرسی در VSM استفاده شود؛ باین حال برای همان مقدار انرژی مشابه در روتور SM، خازن باس DC بسیار بزرگ خواهد

۲-۱ کنترل فرکانس ماشین سنکرون مجازی

ویژگی های مکانیکی روتور ماشین سنکرون متداول با معادله نوسان [۲۸] و به صورت رابطه (۱) بیان می شود.

$$J\dot{\omega}_{mec} + R(\omega_{mec} - \omega_{grid}) = \tau_{mec} - \tau_{el} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، ω_{mec} فرکانس زاویه ای روتور، ω_{grid} فرکانس شبکه، J اینرسی حرکت روتور موتور، R ضریب میرایی ایجاد شده با سیم پیچ میرایی و τ_{mec} ، τ_{el} به ترتیب گشتاور مکانیکی ورودی و گشتاور الکتریکی بار است که به ترتیب توان P_{in} و P_{out} را تولید می کنند. دینامیک روتور SM با J تعیین می شود و بسیار کند است. در تجزیه و تحلیل سیستم قدرت، ثبات فرکانس و زاویه نیز عمدتاً براساس رابطه (۱) است.

۲-۱-۱-۱ پشتیبانی اینرسی

در ماشین های سنکرون متداول، روتور به عنوان ذخیره ساز انرژی^{۱۰} عمل می کند که انرژی جنبشی را در مواقع عدم تعادل توان میان تولید و بار جبران می کند؛ در حالی که در ماشین سنکرون مجازی ویژگی های اینرسی با استفاده از انرژی ذخیره شده در خازن باس DC شبیه سازی

تحلیل عملکرد ریزشبه DC به صورت ماشین سنکرون مجازی در کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه

گشتاور میرایی معرفی شده، متناسب با انحراف سرعت موتور است و این گشتاور برای جلوگیری از هرگونه حرکت نوسان روتور، تولید شده با سیم پیچ میرایی فیزیکی ماشین است. گشتاور میرایی مشابه با معادله نوسان مکانیکی ماشین سنکرون در رابطه (۴) و شکل (۳) شبیه سازی شده است. در رابطه (۴)، R_ω ضریب میرایی شبیه سازی شده و شیب افقی ولتاژ DC به فرکانس AC است. این شیب افقی متفاوت از گاورنرهای افقی مرسوم $\omega - P$ است [۱،۲۸].

۲-۲ کنترل ولتاژ

در ماشین سنکرون مجازی از تنظیم کننده ولتاژ خودکار^{۱۷} (AVR) برای تنظیم ولتاژ مبدل (V_{grid}) مشابه با ماشین سنکرون استفاده می شود تا به مقدار نامی خود ($V_{rms rated}$) برسد. خروجی AVR، اندازه ولتاژ مرجع E برای ولتاژ خروجی مبدل است. بلوک دیاگرام این مجموعه در شکل (۳) نشان داده شده است [۳۰،۳۱].

با استفاده از زاویه توان δ که از کنترل فرکانس و نیز به کمک اندازه ولتاژ E که از کنترل ولتاژ به دست می آید، یک ولتاژ AC به عنوان ولتاژ مرجع تولید می شود؛ این ولتاژ به مدولاسیون پهنای باند سینوسی^{۱۸} (SPWM) ارسال می شود تا فرمان مطلوب برای کلیدزنی به مبدل منبع ولتاژ صادر شود [۳۲].

۲-۳ کنترل افقی دوگانه

انرژی ذخیره شده در VSM عمدتاً در خازن DC است که بسیار کوچک تر از روتور SM است؛ به همین علت از باتری برای پشتیبانی از اینرسی و بهبود پایداری سیستم در مقایسه با یک بانک خازن بزرگ DC کمک گرفته شده است.

برای دستیابی به مدیریت توان در همه شرایط شبکه، کنترل افقی، روش محبوب است که در کنترل VSM پذیرفته شده است؛ با این حال، اگر $\omega - P$ و $V - P$ مرسوم (ولتاژ DC به توان اکتیو) کنترل های افقی مستقل و جداگانه در شبکه AC و ریزشبه DC اتخاذ شوند، توان از شبکه AC به ریزشبه DC و برعکس، ممکن است نامتعادل یا

بود که این کار غیرمنطقی است؛ برای رفع این مشکل از ذخیره ساز انرژی استفاده شده است [۱۵].

$$J_v \dot{\omega} + R_\omega(\omega - \omega_R) = V_{DCF} - V_{DC-R} \quad (۴)$$

$$V_{DCF} = K_{LFF} V_{DC} \quad (۵)$$

رابطه (۴) معادله نوسان ماشین سنکرون مجازی است که مشابه با رابطه (۱) است. در رابطه (۴) ولتاژ نامی خازن DC، V_{DCF} ولتاژ میانگین حاصل از خازن DC، J_v پارامتر اینرسی مجازی و R_ω ضریب میرایی است که با J و D در رابطه (۱) متناظرند و تنها تفاوت آن، جایگزین شدن V_{DC} به جای گشتاور است؛ بنابراین، این قسمت کنترل رفتارهای مکانیکی روتور SM را بدون اجزای فیزیکی مشابه سازی می کند. رابطه (۵) ولتاژ خازن را پس از عبور فیلتر و رابطه (۶) تابع انتقال فیلتر پایین گذر مرتبه اول $K_{LFF}(s)$ را با فرکانس قطع ω_f بیان می کند. $K_{LFF}(s)$ برای حذف فرکانس های پایین و کلیدزنی برای V_{DC} استفاده می شود [۱۵].

$$K_{LFF}(s) = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} \quad (۶)$$

با ادغام رابطه های (۶-۳)، مدل روتور مجازی از نظر سخت افزاری و کنترلی ترکیب می شود و از معادله نوسان تقلید می کند [۶] معادله روتور مجازی در رابطه (۷) بیان شده است.

$$\omega = \left(\frac{P_{in} - P_{out}}{C_d V_{dc} s} K_{LFF} - V_{dcR} + R_\omega \omega_R \right) \frac{1}{J_v s + R_\omega} \quad (۷)$$

پس از به دست آوردن سرعت زاویه ای مطلوب مطابق با رابطه (۴) با گذر از یک انتگرال گیر، مطابق با رابطه (۸)، سرعت زاویه ای را به زاویه توان δ تبدیل می کند که این زاویه برای ایجاد ولتاژ مرجع استفاده می شود [۲۸].

$$\delta = \frac{1}{s} \quad (۸)$$

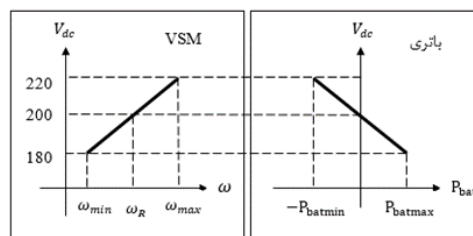
۲-۱-۲ ضریب میرایی

سیم پیچ های میرایی^{۱۶} در ماشین های سنکرون نقش مهمی در پایداری نوسانات روتور دارند. در رابطه (۱)،

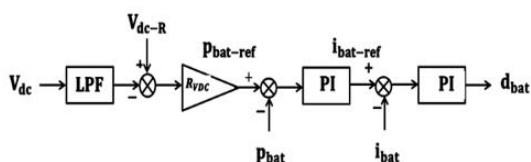
ستون سمت راست شکل (۴) و کنترل دقیق آن در شکل (۵) نشان داده شده است [۳۳،۳۶].

سیستم ذخیره انرژی^{۱۹} (ESS) شامل باتری و مبدل باک - بوست^{۲۰} DC-DC دوطرفه است که در سمت ریزشبه DC متصل می شود. وظیفه این مبدل، ثابت نگه داشتن ولتاژ خازن DC در صورت تغییرات توان در شبکه AC و بار است. ولتاژ اتصال DC در ESS با استفاده از استراتژی حلقه های پشت سرهم کنترل شده که در شکل (۵) نشان داده شده است. مدار قدرت باک - بوست دوطرفه نیز در شکل (۶) نشان داده شده است [۲۳،۳۷].

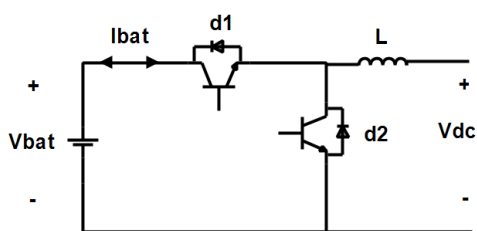
ناهماهنگ باشد و امکان حفظ مناسب پایداری و کنترل خودکار میسر نشود. برای غلبه بر این مشکل، با توجه به شکل (۱) و شکل (۴)، یک کنترل افقی دوگانه برای VSM و کنترل مدیریت توان باتری استفاده شده است [۳۳،۳۴].



شکل (۴): کنترل افقی دوگانه [۳۱]



شکل (۵): کنترل کننده باتری [۳۳،۳۶]



شکل (۶): مبدل باک - بوست دوطرفه باتری [۳۷]

۲-۳-۱- کنترل افقی اولیه

با توجه به اینکه سلول های ذخیره انرژی در ریزشبه DC تنها به ولتاژ DC واکنش نشان می دهند، فرکانس زاویه ای ω در VSM باید از طریق توان اکتیو به V_{DC} وصل شود. کنترل افقی مرسوم برای توان اکتیو در سیستم AC و DC به ترتیب در روابط (۹) و (۱۰) نشان داده شده است [۳۵].

$$\omega - \omega_R = -D_\omega (P - P_0) \quad (9)$$

$$V_{DC} - V_{DC-R} = -D_{VDC} (P - P_0) \quad (10)$$

در روابط (۹) و (۱۰)، P_0 توان نامی مبدل، D_ω و D_{VDC} به ترتیب شیب افقی برای سیستم AC و DC است. این دو رابطه با یکدیگر ترکیب می شوند و در نتیجه، کنترل افقی اولیه برای VSM به صورت رابطه (۱۱) بازنویسی می شود و نمودار آن در ستون سمت چپ شکل (۴) مشاهده می شود.

$$V_{dc} - V_{dc-R} = \frac{D_{vdc}}{D_\omega} (\omega - \omega_R) = R_\omega (\omega - \omega_R) \quad (11)$$

۲-۳-۲- کنترل افقی ثانویه

کنترل افقی ثانویه در سلول های ذخیره انرژی یک کنترل افقی مرسوم V - P است و R_{vdc} شیب افقی آن است. با توجه به کنترل افقی اولیه در VSM، توان خروجی باتری P_{bat} باید براساس ولتاژ DC کنترل شود. این کنترل افقی در

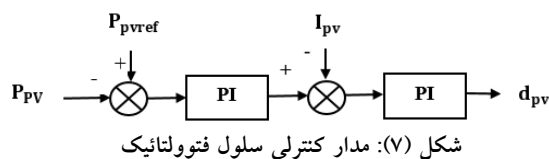
۲-۴- سیستم فتوولتائیک

مدار کنترلی سلول فتوولتائیک در شکل (۷) نشان داده شده است. در این قسمت، کنترلی توان فتوولتائیک برای رسیدن به ماکزیمم توان با توان نامی خود مقایسه می شود و پس از عبور از حلقه های پشت سرهم، فرمان کلیدزنی را به کلید مدار قدرت فتوولتائیک ارسال می کند.

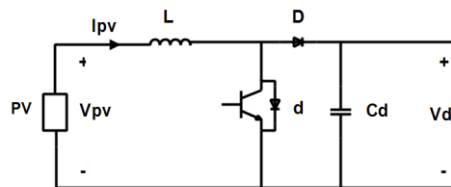
فتوولتائیک از طریق مبدل DC/DC افزایشدهنده به لینک DC متصل می شود. مبدل افزایشدهنده در شکل (۸) نشان داده شده است. اساس کار این مبدل براساس کلیدزنی است که با باز و بسته کردن متناوب کلید الکترونیکی کار می کند. ولتاژ خروجی این مبدل همواره بزرگتر از ورودی است [۳۸].

$$P_{wind} = K_{wind} V^3 \quad (۱۳)$$

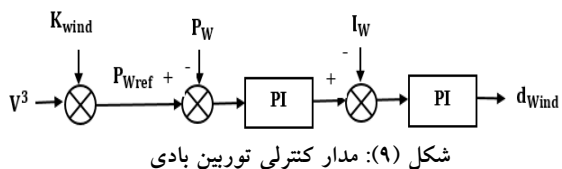
مدار کنترلی توربین بادی در شکل (۹) نشان داده شده است. در این قسمت، کنترلی توان توربین بادی برای رسیدن به ماکزیمم توان با توان نامی خود مقایسه می شود که متناسب با سرعت به توان ۳ است و پس از عبور از حلقه های پشت سرهم، فرمان کلیدزنی را به کلید مدار توربین بادی ارسال می کند. توربین بادی از طریق مبدل DC/DC افزایشده مطابق شکل (۸) به لینک DC متصل می شود.



شکل (۷): مدار کنترلی سلول فتوولتائیک



شکل (۸): مبدل DC/DC افزایشده سلول فتوولتائیک [۳۷]



شکل (۹): مدار کنترلی توربین بادی

۲-۶- سیگنال کوچک

در شکل (۱۰) مدل سیگنال کوچک یک سیستم تک فاز متصل به شبکه AC با یک ماشین سنکرون مجازی، یک توربین بادی، یک سلول فتوولتائیک و یک بار مطابق با شکل (۱)، به منظور تجزیه و تحلیل اثر اینرسی مجازی بر شبکه نشان داده شده اند.

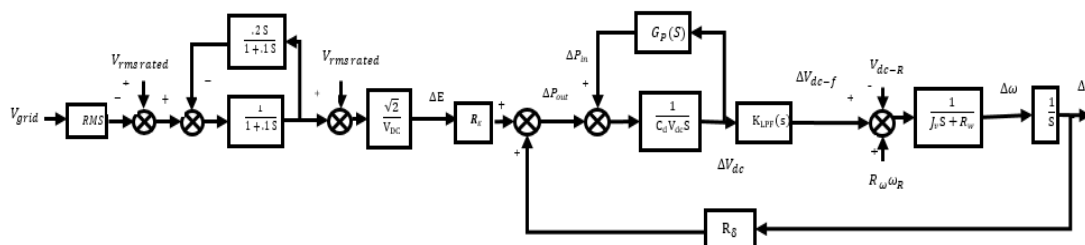
با در نظر گرفتن مبدل منبع ولتاژ متصل به شبکه AC، تغییرات توان به صورت رابطه (۱۴) نوشته می شود. در این رابطه، E_0, δ_0, V_g مقادیر حالت پایدار E, δ, v_g است. ولتاژ شبکه R مقاومت خط و X اندوکتانس خط است.

۲-۵- توربین بادی

توانی که از انرژی جنبشی باد در یک توربین بادی به دست می آید، از رابطه (۱۲) محاسبه می شود؛ در این رابطه V, A, ρ به ترتیب سطح مقطع (بر حسب m^2)، سرعت (بر حسب $\frac{m}{s}$) و چگالی هوا بر حسب $(\frac{kg}{m^3})$ هستند. همچنین C_p ضریب توان توربین است که بازدهی دریافت انرژی از باد را مشخص می کند [۳۹، ۴۰].

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3 \quad (۱۲)$$

با فرض ثابت بودن سطح مقطع، سرعت، چگالی هوا و ضریب توان توربین آن را می توان با یک ضریب ثابت K_{wind} نمایش داد. در این حالت، توانی به دست آمده از انرژی جنبشی باد مطابق با رابطه (۱۳) برابر سرعت باد به توان ۳ است.



شکل (۱۰): بلوک دیاگرام کلی شبکه

با استفاده از تابع تبدیل رابطه (۱۹) تغییرات مقادیر ویژه اینرسی مجازی J_v و میرایی R_ω و محل پایداری این دو پارامتر در قسمت بعد نشان داده می‌شود.

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این قسمت، با استفاده از معادلات دینامیکی که در قسمت قبل برای ماشین سنکرون مجازی و ریزشبه DC معرفی شد و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK، شبکه مد نظر، شبیه‌سازی و اثر ماشین سنکرون مجازی در اتصال ریزشبه DC به شبکه AC بررسی می‌شود تا استراتژی کنترل پیشنهادی ماشین سنکرون مجازی یعنی قابلیت تنظیم ولتاژ، قابلیت تنظیم فرکانس و کنترل افتی مستقل دوگانه بین فرکانس شبکه AC و سلول ذخیره انرژی ریزشبه DC انجام شود.

۳-۱- تحلیل مقادیر ویژه

تحلیل مقدار ویژه با استفاده از تابع تبدیل رابطه (۱۹) انجام شده است. در شکل (۱۱)، تغییرات مقادیر ویژه به ازای تغییرات اینرسی مجازی J_v از ۱,۰۶ به ۴,۲۴ با گام‌های ۰,۵ در نرم‌افزار MATLAB ترسیم شده است. به همین ترتیب با استفاده از این رابطه، تغییرات مقادیر ویژه به ازای تغییرات میرایی R_ω از ۵ به ۳۱,۸۳ با گام‌های ۰,۵ در شکل (۱۲) ترسیم شده است. در شکل (۱۳) و (۱۴) پاسخ پله شبکه به ازای اینرسی و میرایی‌های مختلف نشان داده شده است.

$$\Delta P_{out} = \frac{2RE_0 - RV_g \cos(\delta_0) + X V_g \sin(\delta_0)}{R^2 + X^2} \Delta E + \frac{RE_0 V_g \sin(\delta_0) + X E_0 V_g \cos(\delta_0)}{R^2 + X^2} \Delta \delta = R_E \Delta E + R_\delta \Delta \delta \quad (14)$$

توان‌های قسمت ریزشبه DC و نحوه محاسبه آنها در روابط (۱۵) تا (۱۸) بیان شده است. در این روابط، توان سلول فتوولتائیک، P_{wind} توان توربین بادی، K_{wind} ضریب ثابت توربین بادی، V سرعت باد، R_L توان مصرفی بار، R_L اندازه بار P_{bat} توان باتری، R_{Vdc} ضریب افتی باتری، V_{dc} و V_{dcR} نیز به ترتیب ولتاژ DC و ولتاژ DC نامی هستند. در رابطه

(۱۸)، تغییرات توان ریزشبه DC نسبت به ولتاژ با نماد $G_P(S)$ نشان داده شده است.

$$P_{PV} = P_{wind} = K_{wind} V^3 \quad (15)$$

$$P_L = -\frac{V_{dc}^2}{R_L} \quad (16)$$

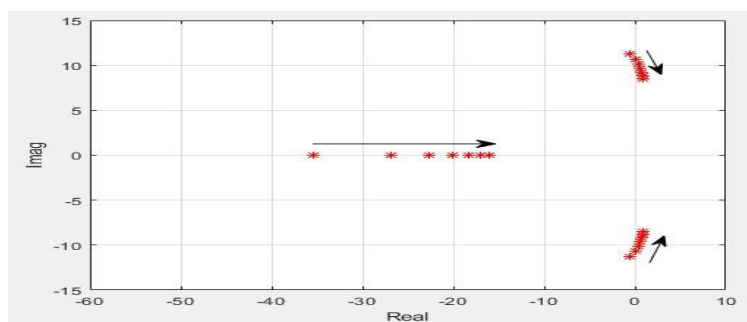
$$P_{bat} = R_{Vdc}(V_{dcR} - V_{dc}) \quad (17)$$

$$G_P(s) = \frac{\Delta P_{in}}{\Delta V_{dc}} = \frac{\Delta P_{PV} + \Delta P_{Wind} + \Delta P_{bat}}{\Delta V_{dc}} = -\frac{2V_{dc}}{R_L} - R_{Vdc} \quad (18)$$

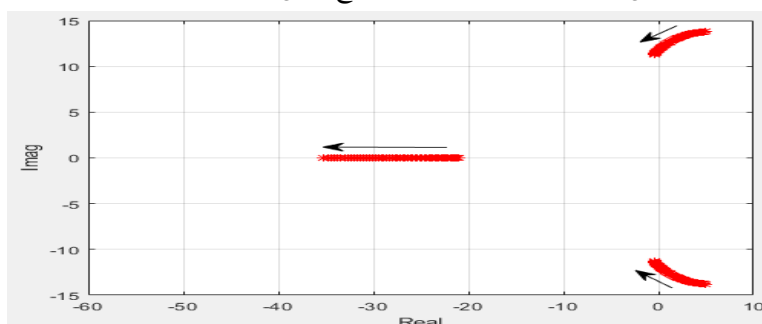
با ادغام رابطه (۷)، (۱۴) و (۱۸) تابع انتقال تغییرات سرعت زاویه‌ای به تغییرات ولتاژ DC به صورت رابطه (۱۹) می‌شود.

$$\frac{\Delta \omega(s)}{\Delta V_{dcR}(s)} = \frac{-(C_d V_{dc} s - G_P(s))s}{(J_v s + R_\omega)(C_d V_{dc} s - G_P(s))s + R_\delta K_{LPIF}(s)} \quad (19)$$

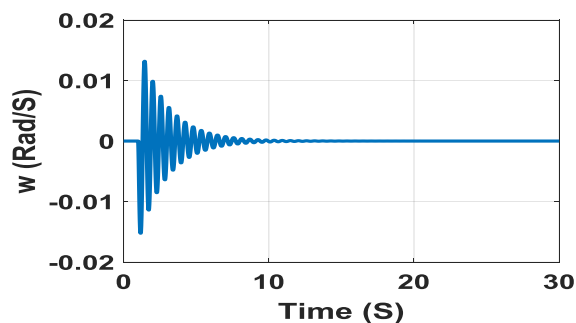
تحلیل عملکرد ریز شبکه DC به صورت ماشین سنکرون مجازی در کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه



شکل (۱۱): مکان هندسی ریشه‌های تابع تبدیل به ازای تغییرات J_v

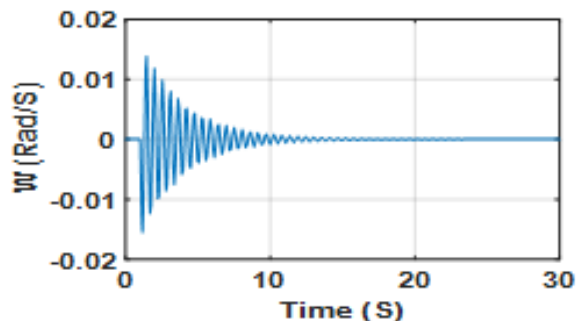


شکل (۱۲): مکان هندسی ریشه‌های تابع تبدیل به ازای تغییرات R_ω



شکل (۱۳): پاسخ پله شبکه در حوزه زمان به ازای اینرسی مجازی

$$R_\omega = 31.83 \text{ و } J_v = 1.06$$



شکل (۱۴): پاسخ پله شبکه در حوزه زمان به ازای اینرسی مجازی

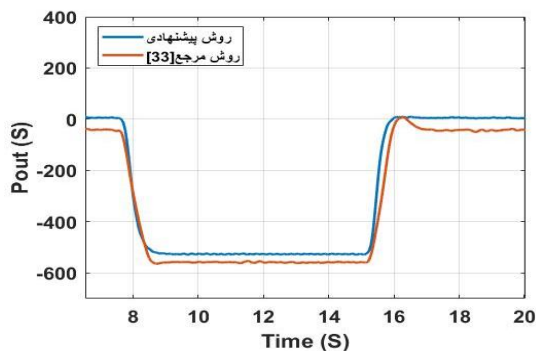
$$R_\omega = 29 \text{ و } J_v = 1.06$$

سنکرون مجازی به شبکه برق متصل شده است. در نتایج روش پیشنهادی بازه زمانی ۰ تا ۳ ثانیه حالت گذرا شبکه است و پس از ۳ ثانیه شبکه با اینرسی مجازی ۱,۰۶ به حالت پایدار خود می‌رسد و شبکه با اینرسی مجازی ۴,۲۴ زمان بیشتری طول می‌کشد تا به پایداری برسد. در شبیه‌سازی‌ها از حالت گذرای ابتدایی صرف‌نظر شده است.

حالت اول: قطع و وصل سلول فتوولتائیک

الف- مقایسه نتایج قطع و وصل سلول فتوولتائیک

در شکل (۱۵)، توان‌های شبکه، ولتاژ DC، فرکانس زاویه‌ای شبکه با استفاده از روش مرجع [۳۳] و روش پیشنهادی، نمایش داده شده است. به‌منظور واضح نشان دادن مقایسه، نتایج از ثانیه ۶,۵ به بعد نشان داده شده است. هدف مشترک هر دو روش، کنترل ولتاژ و فرکانس شبکه است و تفاوت روش پیشنهادی با روش مرجع [۳۳] تغییر در روش کنترل‌کننده ولتاژ و اضافه‌کردن توربین بادی به شبکه است. در بازه زمانی ۷,۵ تا ۱۵ ثانیه، سلول فتوولتائیک از مدار خارج می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در روش پیشنهادی، پارامترهای شبکه با سرعت بیشتری نسبت به روش مرجع [۳۳] پایدار شده است.

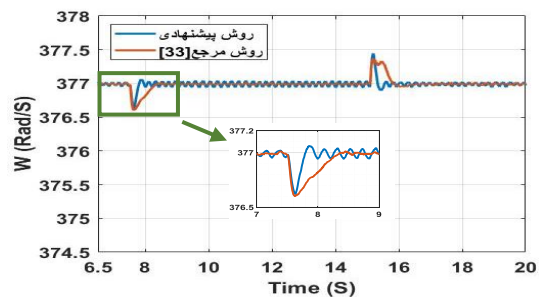


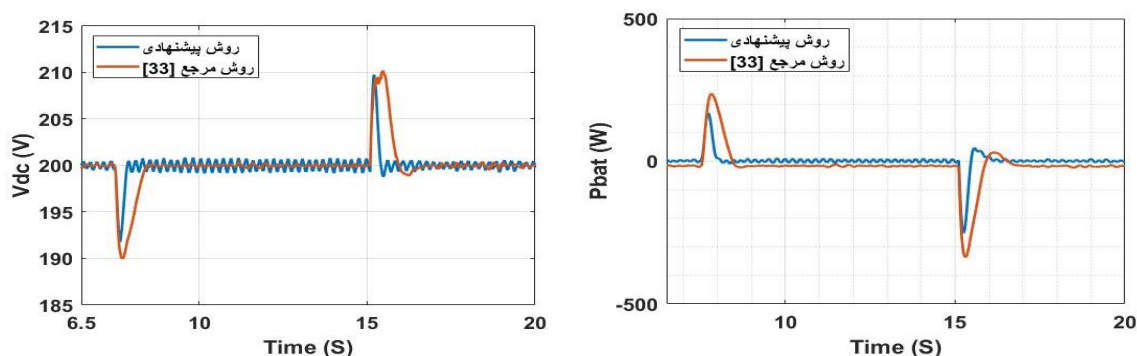
با توجه به شکل (۱۱)، با افزایش اینرسی مجازی، مکان هندسی ریشه‌ها به سمت راست‌محور حرکت می‌کند و تمایل سیستم به ناپایداری افزایش می‌یابد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت وجود اینرسی مجازی، لازم است تا بتواند تحمل سیستم را در مقابل اغتشاشات و میرا کردن آنها افزایش دهد؛ اما هنگامی که اینرسی از یک مقدار معینی بیشتر شود، ناپایداری شبکه و VSM را در پی خواهد داشت. در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار میرایی، شبکه به سمت چپ‌محور حرکت کرده و در اندازه میرایی ۳۱,۸۳ در پایدارترین حالت خود است. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) پاسخ پله شبکه در حوزه زمان به‌ازای اینرسی مجازی J_v برابر ۱,۰۶ و میرایی‌های R_{ω} ۳۱,۸۳ و ۲۹ نشان می‌دهد شکل ۱۳ با میرایی R_{ω} ۳۱,۸۳ با سرعت بیشتری نسبت به شکل ۱۴ است و میرایی R_{ω} ۲۹ میرا و پایدار شده است.

۳-۲- کنترل ریزش‌بکه DC شامل باتری و

سلول فتوولتائیک و بار

شبکه برق AC در ولتاژ ۱۲۰V و فرکانس ۶۰ هرتز کار می‌کند. ریزش‌بکه DC شامل یک سلول فتوولتائیک به توان ۵۰۰ وات، یک بار DC به‌اندازه ۸۰ اهم معادل توان مصرفی ۵۰۰ وات و یک باتری است که به کمک ماشین



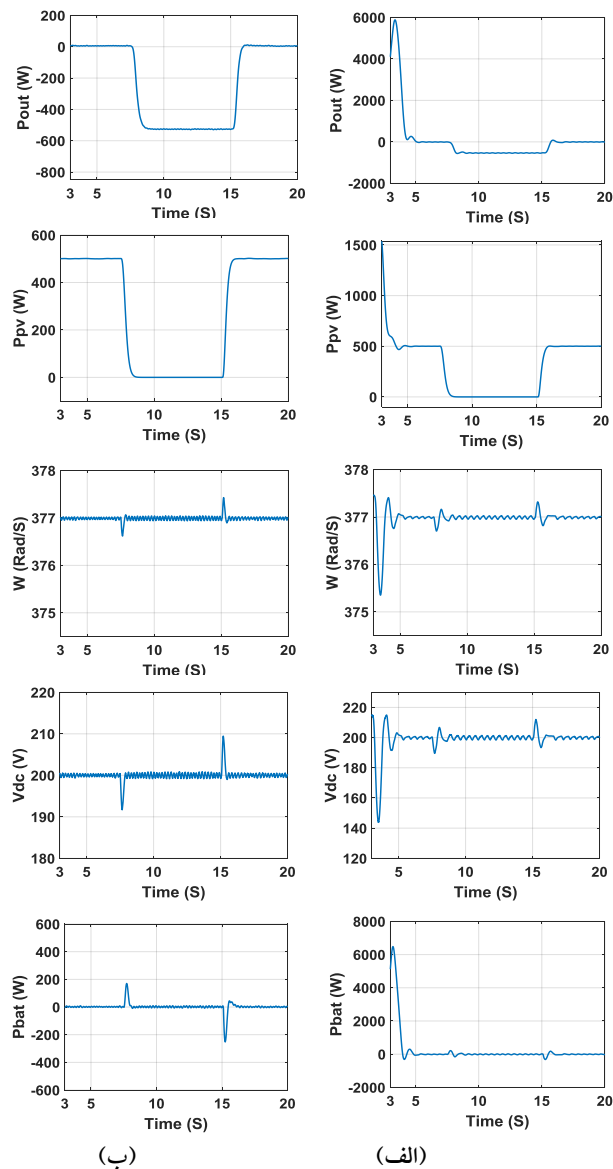


شکل (۱۵): مقایسه نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی با روش مرجع [۳۳] در حالت قطع و وصل سلول فتوولتائیک

لحظه های ۷,۵ و ۱۵ ثانیه که توان فتوولتائیک قطع و وصل می شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی استفاده می شود و توان آن به ترتیب به اندازه ۱۷۰,۵۹ افزایش و ۲۵۲,۲- کاهش می یابد. در این لحظه ها فرکانس زاویه ای به ترتیب ۰,۰۹۹ درصد کاهش و ۰,۱۱۶ درصد افزایش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۴,۱۵ درصد کاهش و ۴,۷ درصد افزایش می یابد. همچنین در لحظه ها مذکور فرکانس زاویه ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایدئال و پایدار خود می رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می کنند. با توجه به شکل (۱۶)، پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J_{v} برابر ۱,۰۶ در بازه زمانی کوتاه تری نسبت به اینرسی مجازی ۴,۲۴ به پایداری می رسند.

ب- قطع و وصل سلول فتوولتائیک با روش پیشنهادی

در شکل (۱۶)، توان های شبکه، ولتاژ DC، فرکانس زاویه ای و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت های الف و ب نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود شبکه در بازه زمانی ۳ تا ۷,۵ ثانیه در حالت پایدار خود است و تمام توان تولیدی توسط سلول فتوولتائیک به میزان ۵۰۰ وات به بار سمت ریزشبه DC (با توان مصرفی معادل ۵۰۰ وات) تزریق می کند و هیچ توانی با سمت شبکه AC مبادله نمی شود. در بازه زمانی ۷,۵ تا ۱۵ ثانیه سلول فتوولتائیک از مدار خارج می شود و کل توان بار به اندازه ۵۰۰ وات با شبکه AC تأمین می شود. در بازه زمانی ۱۵ تا ۲۰ ثانیه، شبکه به حالت اولیه خود باز می گردد و سلول فتوولتائیک، توان بار را تأمین می کند.



شکل (۱۶): نتایج شبیه‌سازی حالت اول قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $J=4.24$ ب: $J=1.06$

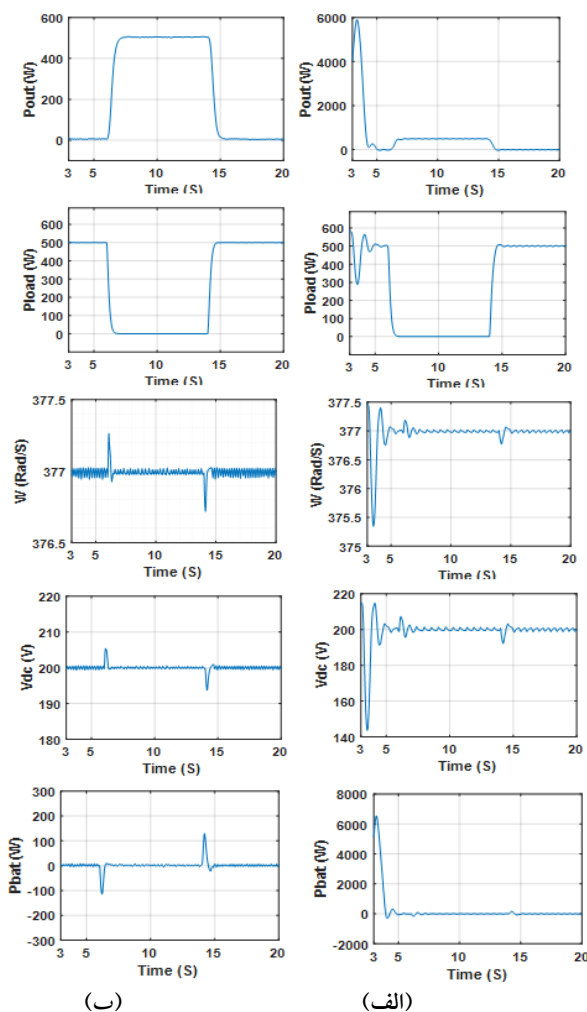
حالت دوم: قطع و وصل بار

در شکل (۱۷)، توان‌های شبکه، ولتاژ DC، فرکانس زاویه‌ای و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۳ ثانیه تا ۶ ثانیه تمام توان بار با سلول فتوولتائیک تأمین می‌شود و شبکه در حالت پایدار خود است. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه بار، قطع و به دلیل نبود هیچ مصرف‌کننده در سمت ریزش‌بنده DC تمام توان فتوولتائیک به اندازه ۵۰۰ وات به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ ثانیه بار به شبکه، متصل و تمام توان

سلول فتوولتائیک به بار تزریق می‌شود. در لحظه‌های ۶ و ۱۴ ثانیه که بار قطع و وصل می‌شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی استفاده می‌شود و توان آن به ترتیب به اندازه ۱۱۴,۶۵ کاهش و ۱۲۹,۲ افزایش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰,۰۷۲ درصد افزایش و ۰,۰۷۲ درصد کاهش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۲,۷ درصد افزایش و ۳,۱۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایدنال و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. با توجه به شکل (۱۷)، پارامترهای شبکه در اینرسی

تحلیل عملکرد ریزشبه DC به صورت ماشین سنکرون مجازی در کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه

مجازی J_v برابر ۱,۰۶ در بازه زمانی کوتاه تری نسبت به اینرسی مجازی ۴,۲۴ به پایداری می‌رسند.

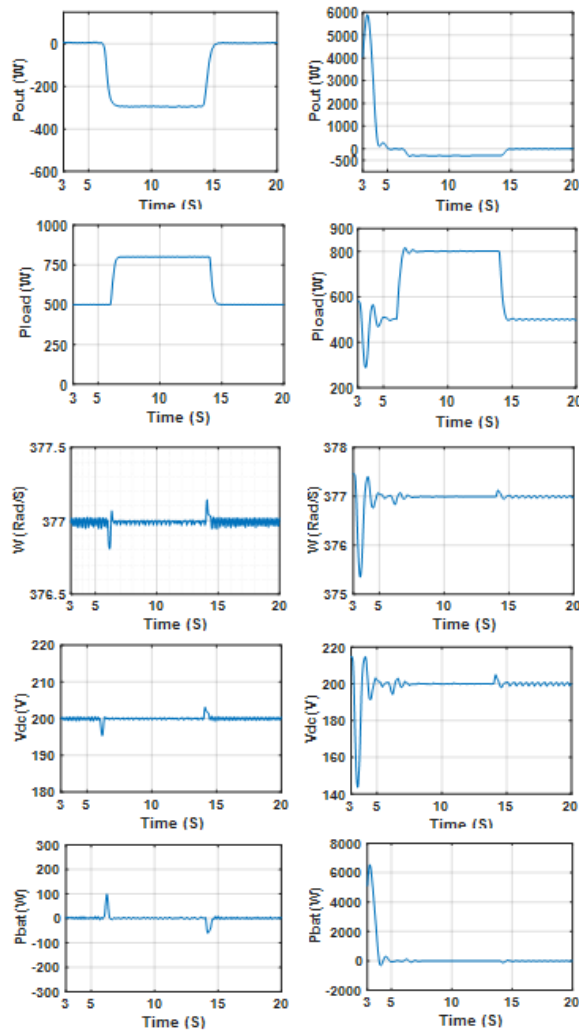


شکل (۱۷): نتایج شبیه‌سازی حالت دوم قطع و وصل بار الف: $J=4.24$ ب: $J=1.06$

در لحظه‌های ۶ و ۱۴ ثانیه که توان مصرفی بار افزایش و کاهش می‌یابد، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی استفاده می‌شود و توان آن به ترتیب به اندازه ۹۹,۷٪ افزایش و ۶۰,۵- کاهش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰,۰۴۸ درصد کاهش و ۰,۳۹۴ درصد افزایش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۲,۳۲ درصد کاهش و ۱,۵۷۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایدئال و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. با توجه به شکل (۱۸)، پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی

حالت‌های الف و ب نمایش داده شده است. در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه، سلول فتوولتائیک توان ۵۰۰ وات تولید می‌کند و بار کل توان شبکه فتوولتائیک را مصرف می‌کند و شبکه در حالت پایدار خود می‌ماند. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه اندازه مقاومت بار از ۸۰ اهم به اندازه ۵۰ اهم کاهش می‌یابد و مقدار توان مصرفی بار از ۵۰۰ وات به ۸۰۰ وات افزایش می‌یابد. در این حالت، به دلیل آنکه حداکثر توان سلول فتوولتائیک ۵۰۰ وات است، شبکه AC ۳۰۰ وات توان به ریزشبه DC و بار تزریق می‌کند و توان بار را تأمین می‌کند. در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ ثانیه بار به اندازه ۸۰ اهم باز می‌گردد و شبکه در حالت پایدار خود کار می‌کند.

J_v برابر ۱,۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴,۲۴ به پایداری می‌رسند.



شکل (۱۸): نتایج شبیه‌سازی حالت سوم کاهش و افزایش بار الف: $J=4.24$ ، ب: $J=1.06$

وات، یک بار DC به اندازه ۸۰ اهم معادل با توان مصرفی ۵۰۰ وات و یک باتری است که به کمک ماشین سنکرون مجازی به شبکه برق متصل شده است

حالت اول: قطع و وصل سلول فتوولتائیک

در شکل (۱۹)، توان‌های شبکه، ولتاژ DC، فرکانس زاویه‌ای و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده شده است. در بازه زمانی ۳ تا ۷,۵ ثانیه سلول فتوولتائیک و توربین بادی هر یک توان ۵۰۰ وات تولید می‌کنند و بار ۵۰۰ وات توان را مصرف

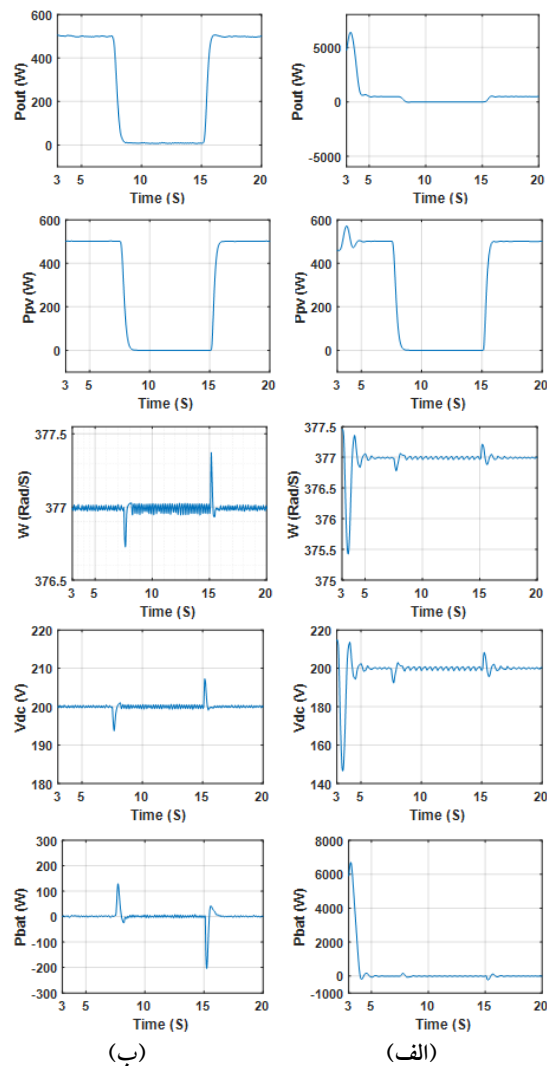
۳-۳- کنترل ریزش‌بنده DC شامل باتری، سلول فتوولتائیک، توربین بادی و بار

در این قسمت، اثر توربین بادی به‌منظور افزایش پایداری و فراهم‌کردن توان ذخیره در ماشین سنکرون مجازی متصل به شبکه AC مطالعه می‌شود. توربین بادی طراحی شده متناسب با سرعت باد، توان تولید می‌کند که در رابطه (۱۳) به نمایش گذاشته شد. در این قسمت، شبکه برق AC در ولتاژ ۱۲۰ ولت و فرکانس ۶۰ هرتز کار می‌کند. ریزش‌بنده DC شامل یک سلول فتوولتائیک به توان ۵۰۰ وات، یک توربین بادی با سرعت ۳,۹۸m/s معادل ۵۰۰

تحلیل عملکرد ریزشبکه DC به صورت ماشین سنکرون مجازی در کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه

کاهش و ۰,۱۹ درصد افزایش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۳,۱۴۵ درصد کاهش و ۳,۶۳۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایدنال و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. با توجه به شکل (۱۹)، پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی $J=1.06$ برابر ۱,۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴,۲۴ به پایداری می‌رسند.

می‌کند و ۵۰۰ وات توان ذخیره به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۷,۵ تا ۱۵ ثانیه سلول فتوولتائیک از مدار خارج می‌شود و کل توان بار با توربین بادی تأمین می‌شود و هیچ توانی به شبکه AC تزریق نمی‌شود. در بازه زمانی ۱۵ تا ۲۰ ثانیه سلول فتوولتائیک وارد مدار می‌شود و شبکه به حالت اولیه خود باز می‌گردد. در لحظه‌های ۷,۵ و ۱۵ ثانیه که توان فتوولتائیک قطع و وصل می‌شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی استفاده می‌شود و توان آن به ترتیب به اندازه ۱۲۹,۱۸ افزایش و ۲۰۳,۵- کاهش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰,۰۷۰۲ درصد

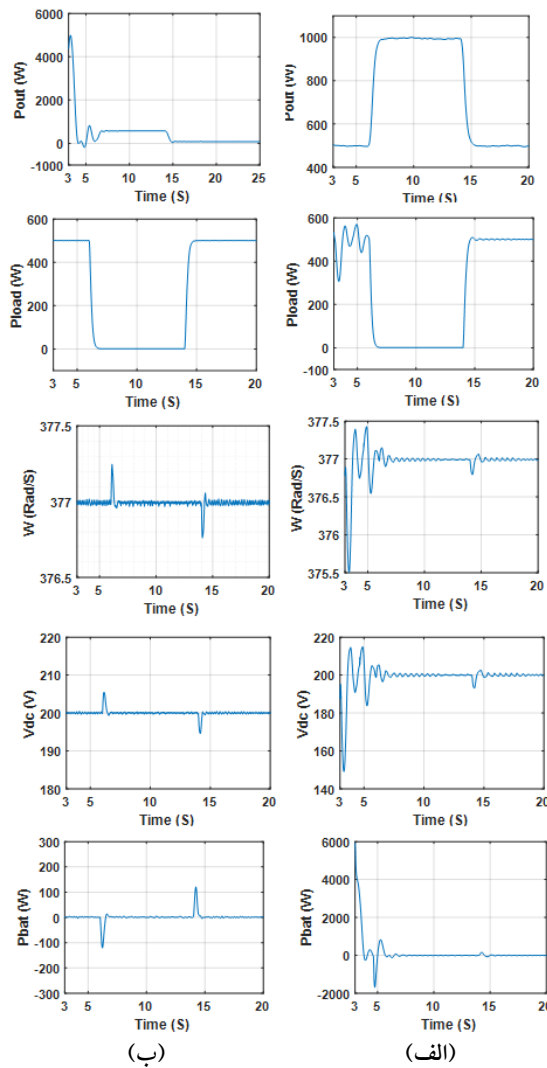


شکل (۱۹): نتایج شبیه‌سازی حالت اول: وصل سلول فتوولتائیک الف: $J=4.24$ ب: $J=1.06$

حالت دوم: قطع و وصل بار

که بار قطع و وصل می‌شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی استفاده می‌شود و توان آن به ترتیب به اندازه ۱۲۰،۷۸- کاهش و ۱۲۰،۷۳ افزایش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰،۶۷۶ درصد افزایش و ۰،۶۱۱ درصد کاهش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۲،۷ درصد افزایش و ۲،۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایدئال و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. با توجه به شکل (۲۰)، پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J_v برابر ۱،۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴،۲۴ به پایداری می‌رسند.

در شکل (۲۰)، فرکانس زاویه‌ای، توان‌های شبکه، ولتاژ DC و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه سلول فتوولتائیک و توربین بادی هر یک توان ۵۰۰ وات تولید می‌کنند و بار ۵۰۰ وات توان را مصرف می‌کند و ۵۰۰ وات توان ذخیره به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه بار ریزش شبکه DC قطع می‌شود و کل توان سلول فتوولتائیک و توربین بادی به علت نبود هیچ توان مصرف‌کننده‌ای در طرف ریزش شبکه DC، به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ ثانیه بار ریزش شبکه DC قطع می‌شود و شبکه به حالت اولیه خود باز می‌گردد. در لحظه‌های ۶ و ۱۴ ثانیه

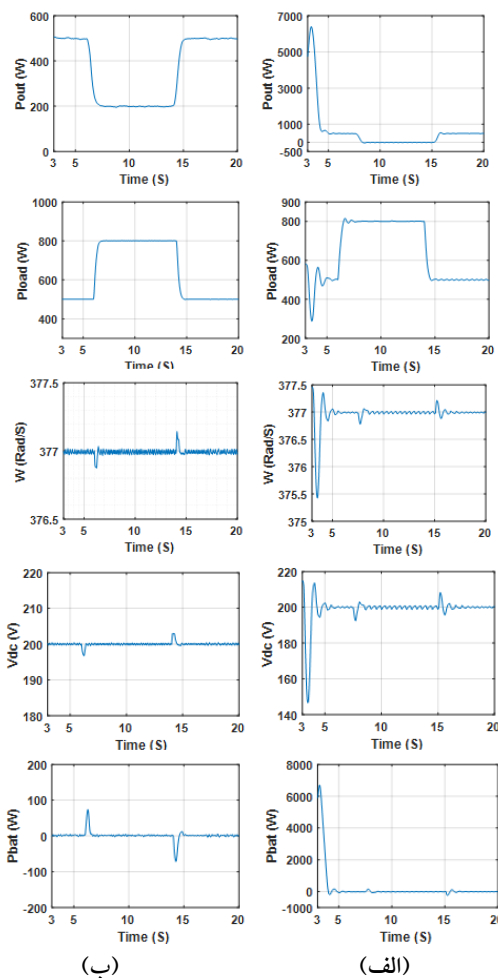


شکل (۲۰): نتایج شبیه سازی حالت دوم قطع و وصل بار الف: $J=4.24$ ب: $J=1.06$

حالت سوم: کاهش و افزایش بار

در شکل (۲۱)، فرکانس زاویه‌ای، توان‌های شبکه، ولتاژ DC و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه سلول فتوولتائیک و توربین بادی هر یک توان ۵۰۰ وات تولید می‌کنند و بار ۵۰۰ وات توان را مصرف می‌کند و ۵۰۰ وات توان ذخیره به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه، بار از ۸۰ اهم به اندازه ۵۰ اهم کاهش می‌یابد و مقدار توان مصرفی بار از ۵۰۰ وات به ۸۰۰ وات افزایش پیدا می‌کند. در این حالت، ۸۰۰ وات توان از سلول فتوولتائیک و توربین بادی به بار تزریق می‌شود و ۲۰۰ وات توان ذخیره باقیمانده از ریزشبه DC به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ ثانیه، بار از ۵۰ اهم به اندازه ۸۰ اهم افزایش

می‌یابد و شبکه به حالت اولیه خود باز می‌گردد. در لحظه‌های ۶ و ۱۴ ثانیه که توان مصرفی بار، افزایش و کاهش می‌یابد، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی استفاده می‌شود و توان آن به ترتیب به اندازه ۷۴,۰۳۸ افزایش و ۷۱,۷۴۹- کاهش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰,۰۳ درصد کاهش و ۰,۰۴ درصد افزایش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۱,۶۴ درصد کاهش و ۱,۴۷۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایدئال و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. با توجه به شکل (۲۱)، پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J برابر ۱,۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴,۲۴ به پایداری می‌رسند.



شکل (۲۱): نتایج شبیه‌سازی حالت سوم کاهش و افزایش بار الف: $J=4.24$ ب: $J=1.06$

حالت چهارم: تغییر سرعت توربین بادی

اندازه ۸۰ اهم معادل توان مصرفی ۵۰۰ وات و یک باتری است که به کمک ماشین سنکرون مجازی به شبکه برق متصل شده است. درکل بازه شبیه‌سازی سلول فتوولتائیک از مدار قطع است. هدف در این قسمت، مشاهده اثر تغییر سرعت باد در نتیجه تغییر توان توربین بادی در بازه زمانی ۲ تا ۳۰ ثانیه بر شبکه است.

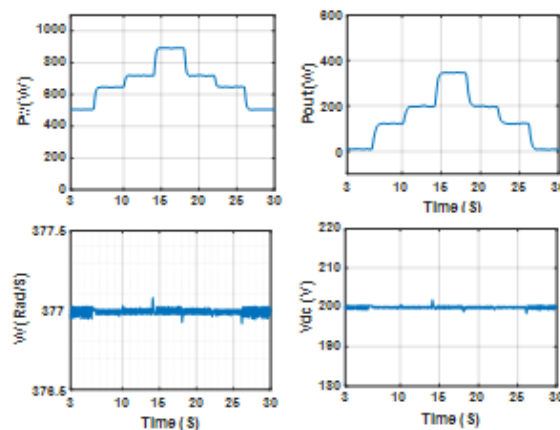
در شکل (۲۲)، توان‌های شبکه، ولتاژ DC و فرکانس زاویه‌ای نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از بازه زمانی ۳ تا ۱۸ ثانیه سرعت باد به صورت پله‌ای هر ۴ ثانیه ۰٫۲ افزایش می‌یابد و از بازه ۱۸ تا ۳۰ ثانیه سرعت باد به صورت پله‌ای هر ۴ ثانیه ۰٫۲ کاهش می‌یابد. در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه، توربین بادی با سرعت ۳٫۹۸m/s توان ۵۰۰ وات تولید می‌کند و بار ۵۰۰ وات توان را مصرف می‌کند و هیچ توانی به شبکه AC تزریق نمی‌شود. در بازه زمانی ۶ تا ۱۰ ثانیه، سرعت توربین بادی به ۴m/s افزایش حالت پایدار خود می‌رسند.

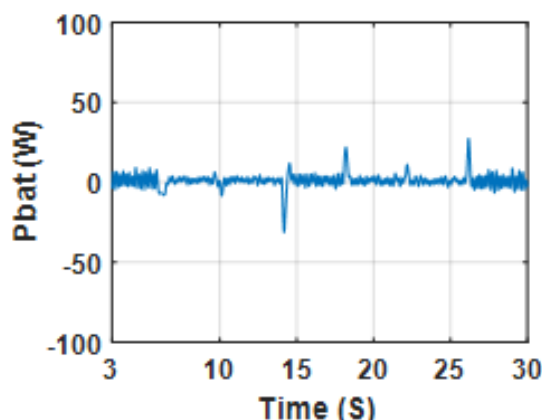
در این حالت ریزش‌بکه DC شامل یک توربین بادی با سرعت ۳٫۹۸m/s با توان معادل ۵۰۰ وات، یک بار DC به اندازه ۸۰ اهم معادل توان مصرفی ۵۰۰ وات و یک باتری است که به کمک ماشین سنکرون مجازی به شبکه برق متصل شده است. درکل بازه شبیه‌سازی سلول فتوولتائیک از مدار قطع است. هدف در این قسمت، مشاهده اثر تغییر سرعت باد در نتیجه تغییر توان توربین بادی در بازه زمانی ۲ تا ۳۰ ثانیه بر شبکه است.

در شکل (۲۲)، توان‌های شبکه، ولتاژ DC و فرکانس زاویه‌ای نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از بازه زمانی ۳ تا ۱۸ ثانیه سرعت باد به صورت پله‌ای هر ۴ ثانیه ۰٫۲ افزایش می‌یابد و از بازه ۱۸ تا ۳۰ ثانیه سرعت باد به صورت پله‌ای هر ۴ ثانیه ۰٫۲ کاهش می‌یابد. در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه، توربین بادی با سرعت ۳٫۹۸m/s در این حالت ریزش‌بکه DC شامل یک توربین بادی با سرعت ۳٫۹۸m/s با توان معادل ۵۰۰ وات، یک بار DC به

جدول (۱): نتایج حاصل از تغییرات سرعت باد

	۳- ۶s	۶- ۱۰s	۱۰- ۱۴s	۱۴- ۱۸s	۱۸- ۲۲s	۲۲- ۲۶s	۲۶- ۳۰s
$v_{Wind} (m/s)$	۳٫۹۸	۴	۴٫۲	۴٫۴	۴٫۲	۴	۳٫۹۸
$P_{Wind} (w)$	۵۰۰	۶۳۰	۷۱۰	۸۵۰	۷۱۰	۶۳۰	۵۰۰
$P_{Load} (w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{out} (w)$	۰	۱۳۰	۲۱۰	۳۵۰	۲۱۰	۱۳۰	۰





شکل (۲۲): نتایج شبیه سازی حالت چهارم افزایش و کاهش سرعت باد

- [4] L. Huang, H. Xin, and Z. Wang, "Damping low-frequency oscillations through vsc-hvdc stations operated as virtual synchronous machines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, No. 6, pp. 5803-5818, 2018.
- [5] Z. Peng, J. Wang, Y. Wen, D. Bi, Y. Dai, and Y. Ning, "Virtual synchronous generator control strategy incorporating improved governor control and coupling compensation for AC microgrid," *IET Power Electronics*, Vol. 12, No. 6, pp. 1455-1461, 2019.
- [6] S. A. Khajehoddin, M. Karimi-Ghartemani, and M. Ebrahimi, "Grid-Supporting Inverters With Improved Dynamics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, No. 5, pp. 3655-3667, 2018.
- [7] X.-D. Chen, S.-R. Yu, and X.-L. Ge, "Modelling and stability analysis of virtual synchronous machine using harmonic state-space modelling method," *The Journal of Engineering*, Vol. 2019, No. 16, pp. 2597-2603, 2019.
- [8] B. Zhang, X. Zhang, Z. Song, and X. Yan, "Enhanced control and parameter analysis for virtual synchronous generators without PLL," *The Journal of Engineering*, Vol. 2019, No. 16, pp. 3082-3087, 2019.
- [9] H.-P. Beck and R. Hesse, "Virtual synchronous machine," in *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007: IEEE, pp. 1-6.
- [10] S. D'Arco and J. A. Suul, "Virtual synchronous machines—Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids," in *2013 IEEE Grenoble Conference*, 2013: IEEE, pp. 1-7.
- [11] M. Abuagreb, B. Ajao, H. Herbert, and B. K. Johnson, "Evaluation of Virtual Synchronous Generator Compared to Synchronous Generator," in *2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2020: IEEE, pp. 1-5.
- [12] M. Ashabani and J. Jung, "Synchronous Voltage Controllers: Voltage-Based Emulation of

۴- نتیجه گیری

در این مقاله روش کنترل کننده ماشین سنکرون مجازی به منظور ارتباط سازی بین ریزشبكة DC با شبکه AC برای فراهم آوردن اینرسی و میرایی مورد نیاز VSC و کنترل فرکانس و ولتاژ معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است. روش مورد نظر برای دو حالت با اتصال و عدم اتصال توربین بادی تحت حالت های مختلف مانند قطع و وصل سلول فتوولتائیک، تغییرات بار، سرعت توربین بادی با اینرسی های مختلف، آزمایش و بررسی شده اند. در این روش، ماشین سنکرون مجازی به کمک کنترل افی دوگانه به خوبی توانایی کنترل سیستم را در شرایط مختلف داراست. در این روش، VSM مبتنی بر سیستم DG باعث مدیریت خودکار توان و بهبود کارایی به منظور رفع مسائل ناپایداری فرکانس و ولتاژ تحت نفوذ زیاد DG ها شده است.

مراجع

- [1] H. Bevrani, B. François, and T. Ise, *Microgrid dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2017.
- [2] M. Dreidy, H. Mokhlis, and S. Mekhilef, "Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp. 144-155, 2017.
- [3] X. Hua, Z. Xiaochen, and L. Na, "A control strategy for inverter: Virtual synchronous generator," in *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2018: IEEE, pp. 193-197.

- constant power loads," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 4, pp. 430-438, 2017.
- [24] K. Dhingra and M. Singh, "Frequency support in a micro-grid using virtual synchronous generator based charging station," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 9, pp. 1034-1044, 2018.
- [25] J. Xi, H. Geng, G. Yang, and S. Ma, "Inertial response analysis of PMSG-based WECS with VSG control," *The Journal of Engineering*, Vol. 2017, No. 13, pp. 897-901, 2017.
- [26] J. Xi, H. Geng, S. Ma, Y. Chi, and G. Yang, "Inertial response characteristics analysis and optimisation of PMSG-based VSG-controlled WECS," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 15, pp. 1741-1747, 2018.
- [27] R. Shi, X. Zhang, C. Hu, H. Xu, J. Gu, and W. Cao, "Self-tuning virtual synchronous generator control for improving frequency stability in autonomous photovoltaic-diesel microgrids," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 6, No. 3, pp. 482-494, 2018.
- [28] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-hill New York, 1994.
- [29] S. Samanta, J. P. Mishra, and B. K. Roy, "Virtual DC machine: an inertia emulation and control technique for a bidirectional DC-DC converter in a DC microgrid," *IET Electric Power Applications*, Vol. 12, No. 6, pp. 874-884, 2018.
- [30] J. Alipoor, Y. Miura, and T. Ise, "Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 2, pp. 1462-1471, 2016.
- [31] H. S. Hlaing, J. Liu, Y. Miura, H. Bevrani, and T. Ise, "Enhanced Performance of a Stand-Alone Gas-Engine Generator Using Virtual Synchronous Generator and Energy Storage System," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 176960-176970, 2019.
- [32] U. B. Krishnan, S. Mija, and E. P. Cheriyan, "State space modelling, analysis and optimization of microgrid droop controller," in 2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA), 2017: IEEE, pp. 276-281.
- [33] D. Chen, Y. Xu, and A. Q. Huang, "Integration of dc microgrids as virtual synchronous machines into the ac grid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 9, pp. 7455-7466, 2017.
- [34] F. Guo, C. Wen, J. Mao, and Y.-D. Song, "Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids," *IEEE Transactions on industrial Electronics*, Vol. 62, No. 7, pp. 4355-4364, 2014.
- [35] C.-T. Lee, C.-C. Chu, and P.-T. Cheng, "A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 4, pp. 1980-1993, 2012.
- [36] D. Chen, A. Q. Huang, Y. Xu, F. Wang, and W. Yu, "Distributed and autonomous control of the FREEDM system: A power electronics based distribution system," in *IECON 2014-40th Annual Synchronous Machines for the Integration of Renewable Energy Sources*, IEEE Access, Vol. 8, pp. 49497-49508, 2020.
- [13] J. A. Suul, S. D'Arco, and G. Guidi, "Virtual synchronous machine-based control of a single-phase bi-directional battery charger for providing vehicle-to-grid services," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 52, No. 4, pp. 3234-3244, 2016.
- [14] J. Liu, F. Rafi, J. Lu, and M. Hossain, "Neutral current compensation in a VSG-based three-phase four-wire microgrid system," in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, 2018: IEEE, pp. 1-6.
- [15] M. Ashabani and Y. A.-R. I. Mohamed, "Novel comprehensive control framework for incorporating VSCs to smart power grids using bidirectional synchronous-VSC," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 29, No. 2, pp. 943-957, 2013.
- [16] D. Leng and S. Polmai, "Transient Respond Comparison Between Modified Droop Control and Virtual Synchronous Generator in Standalone Microgrid," in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, 2019: IEEE, pp. 1-4.
- [17] J. Liu, Y. Miura, and T. Ise, "Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 5, pp. 3600-3611, 2015.
- [18] E. Unamuno, J. A. Suul, M. Molinas, and J. A. Barrena, "Comparative Eigenvalue Analysis of Synchronous Machine Emulations and Synchronous Machines," in *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2019, Vol. 1: IEEE, pp. 3863-3870.
- [19] W. Wu *et al.*, "A virtual inertia control strategy for DC microgrids analogized with virtual synchronous machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 7, pp. 6005-6016, 2016.
- [20] M. Ebrahimi, S. A. Khajehoddin, and M. Karimi-Ghartemani, "An improved damping method for virtual synchronous machines," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 10, No. 3, pp. 1491-1500, 2019.
- [21] Q.-C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 4, pp. 1259-1267, 2010.
- [22] M. Ramezani, S. Li, F. Musavi, and S. Golestan, "Seamless transition of synchronous inverters using synchronizing virtual torque and flux linkage," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 67, No. 1, pp. 319-328, 2019.
- [23] A. Hosseinipour and H. Hojabri, "Virtual inertia control of PV systems for dynamic performance and damping enhancement of DC microgrids with

- [39]A. Koerber and R. King, "Combined feedback-feedforward control of wind turbines using state-constrained model predictive control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 1117-1128, 2013.
- [40]A. Uehara *et al.*, "A coordinated control method to smooth wind power fluctuations of a PMSG-based WECS," *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol. 26, No. 2, pp. 550-558, 2011.
- Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2014: IEEE, pp. 4954-4960.
- [37]A. Merabet, K. T. Ahmed, H. Ibrahim, R. Beguenane, and A. M. Ghias, "Energy management and control system for laboratory scale microgrid based wind-PV-battery," *IEEE transactions on sustainable energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 145-154, 2016.
- [38]D. W. Hart, *Power electronics*. Tata McGraw-Hill Education, 2011.

-
- ¹ Voltage Source Converter
² Load Shedding
³ Synchronous Machine(SM)
⁴ Virtual Synchronous Machine
⁵ Virtual Synchronous Generator
⁶ Synchronverter
⁷ Enhanced Virtual Synchronous Machine
⁸ Beck
⁹ Hesse
¹⁰ Synchronizing
¹¹ Plug and play
¹² Electric vehicle
¹³ Charging Station
¹⁴ Photovoltaic
¹⁵ Energy Buffer
¹⁶ Damping Winding
¹⁷ Automatic Voltage Regulator
¹⁸ Sine Pulse Width Modulation
¹⁹ Energy Storage Systems (ESS)
²⁰ Buck-boost Converter