

بهبود پایداری و کنترل ولتاژ و فرکانس در ریز شبکه شناور به روش کنترل دروپ غیر متمرکز جزیره‌ای

محمدصادقی^{۱*}، محمدرضا علیزاده پهلوانی^{۲*}، آرش دهستانی کلاگر^۳ و مهدی مصیبی^۴

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ۲- استاد، ۳- استادیار ۴- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹، پذیرش: پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.3.1.5>

چکیده

پایداری، کنترل ولتاژ و فرکانس در ریز شبکه شناورها یکی از مباحث مهم در پیشگیری از خرابی تأسیسات و تجهیزات و همچنین امنیت جان سرنشینان شناور است که در مبحث پدافند غیرعامل قابل بحث است. به همین دلیل، در این مقاله یک روش کنترل خودکار مستقل برای به اشتراک گذاشتن توان راکتیو در میان منابع انرژی و همچنین، تثبیت فرکانس به منظور بهبود پایداری و کنترل ولتاژ و فرکانس در ریز شبکه شناور به روش کنترل دروپ غیرمتمرکز ارائه می‌گردد. تقسیم توان مناسب باعث بهبود عملکرد میکروگرید و قدرت مانور آن در زمان خطا می‌شود و عملکرد میکروگرید را در شرایط جزیره‌ای تضمین می‌کند و با مدیریت توان راکتیو در عین ثابت نگاه داشتن فرکانس ریز شبکه، می‌توان به رفتار مقاوم ریز شبکه در برابر بارهای نامتعادل، بدون بهره‌گیری از هیچ‌گونه سیستم مخابراتی دست یافت. همچنین با کنترل کننده غیرمتمرکز پیشنهادی، با اشتراک گذاری توان راکتیو و تثبیت فرکانس در میکروگرید شناور الکتریکی، قابلیت اطمینان سیستم‌های ریز شبکه بهبود داده خواهد شد. در این مقاله، به منظور بررسی صحت نتایج و درستی عملکرد سیستم کنترلی، دو شاخص در نظر گرفته می‌شود. اولین مورد، شاخص فرکانس زاویه‌ای است که جهت بررسی عملکرد سیستم در تثبیت فرکانس در حالت‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. دومین مورد نیز شاخص مربوط به ولتاژ است که در حالت عملکرد نرمال ۲۳۷ ولت بوده و اختلاف ولتاژ با این مقدار، نشان دهنده خطای سیستم کنترلی است که در شبیه‌سازی‌ها به آن اشاره می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف بررسی شده و نشان داده می‌شود که در تمامی این حالت‌ها، حتی در حالت تغییر ناگهانی بار، سیستم کنترلی به خوبی عمل نموده و با اشتراک گذاری توان راکتیو و عملکرد مناسب بخش تثبیت کننده فرکانس، ولتاژ در محدوده مجاز قرار گرفته و فرکانس نیز به مقدار اولیه خود باز خواهد گشت.

کلیدواژه‌ها: ریز شبکه شناور، کنترل کننده غیرمتمرکز، دروپ کنترل

Improving the Stability and Control of Voltage and Frequency in Shipboard Microgrid Using Island Decentralized Droop Control Method

M. Sadeghi Ahmadabadi¹, M. R. Alizadeh Pahlavani², A. Dehestani Kolagar^{3*}, M. Mosayebi⁴

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 2023/10/22, Revised: 2023/12/20, Accepted: 2024/01/04, Published: 2024/01/21)

Abstract

Stability, voltage and frequency control in the shipboard microgrid is one of the important topics in preventing the breakdown of facilities and equipment, as well as the safety of the shipboard operators, which can be discussed in the topic of advanced defense. In this paper, an independent automatic control method for sharing reactive power among energy sources, as well as frequency stabilization in order to improve stability and voltage and frequency control in shipboard microgrids, is presented using the decentralized droop control method. Proper power distribution improves the performance of the microgrid and its maneuverability during the fault and ensures the performance of the microgrid in island conditions and by managing the reactive power while keeping the frequency of the microgrid constant, the robust behavior of the microgrid against unbalanced loads, without using any Telecommunication system is achieved. Also, with the proposed decentralized controller, the reliability of microgrid systems will be improved by reactive power sharing and frequency stabilization in the shipboard electric microgrid. In this article, in order to evaluate the correctness of the results and the performance of the control system, two criteria are considered. The first one is the angular frequency index, which is used to check the performance of the system in stabilizing the frequency in different modes of operation. The second one is the voltage indicator, which is 237V in normal operation mode, and the voltage difference with this value indicates the error of the control system, which is mentioned in the simulations. The simulation results are presented for different scenarios and it is shown that in all conditions, even in the case of sudden load change, the control system operate appropriately and with the sharing of reactive power and the proper operating of the frequency stabilizer, the voltage is within the allowed range. In addition, the frequency has also returned to its initial value.

Keywords: Shipboard MicroGrid, Decentralized Control, Droop Control

*Corresponding Author E-mail: mr_alizadehp@mut.ac.ir

Advanced Defence Sci.& Technol., 2024, 3, 139-148.

۱. مقدمه

تأمین امنیت به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین نیازهای انسانی، می‌تواند علاوه بر تأمین نیازهای اصلی، زمینه‌ساز سایر نیازها نیز باشد. کاستن از آسیب‌پذیری نیروی انسانی، تأسیسات و تجهیزات حیاتی کشور در حملات خصمانه و مخرب دشمن و استمرار فعالیت‌ها در شرایط بحرانی ناشی از جنگ، از جمل موارد ضروری در برنامه‌ریزی‌های مربوط به شناورها و کشتی‌های نظامی است که از آن به‌عنوان پدافند غیرعامل یاد می‌شود. پدافند غیرعامل به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌گردد که مستلزم به‌کارگیری جنگ‌افزار و تسلیحات نبوده و با اجرای آن می‌تواند از وارد شدن خسارت مالی به تجهیزات و تأسیسات مهم و حیاتی جلوگیری شود و میزان خسارات را از این طریق کاهش داد. در این پژوهش به بهبود پایداری و کنترل ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه شناور پرداخته می‌شود که یک روش در پدافند غیرعامل هست و سبب می‌شود در شرایط خاص که شبکه شناور دچار مشکل می‌گردد، پایداری سیستم برقرار باشد [۱].

شناورهای سنتی از برق AC تأمین‌شده از دیزل ژنراتور برای تأمین توان الکتریکی موردنیاز استفاده می‌کردند. به‌مرور زمان با پیشرفت در حوزه مبدل‌های الکترونیک قدرت، استفاده از شبکه‌های هیبریدی و DC برای تأمین توان آن‌ها افزایش‌یافته است [۲]. این تحول، زمینه استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر نظیر منابع خورشیدی و همچنین ذخیره‌سازها را در شبکه برق شناورها فراهم ساخت [۳-۴]. در چند سال گذشته، جایگزینی سیستم‌های قدرت مکانیکی با سیستم‌های برقی در شبکه‌های برق شناورها موردتوجه زیادی بوده است. استفاده از پیشرفته‌های برقی یا دیزلی - الکتریکی در شناورهای دریایی امری عادی است [۵-۷]. برخی از شناورهای دریایی به‌عنوان مثال شناورهای پشتیبانی غواصی و کشتی‌های حمل کانتینر، از سیستم‌های محرک دی‌الکترونیک استفاده می‌کنند. این شناورها هم دارای پیشرفته‌های مکانیکی هستند که در طی عملیات دوربرد، با سرعت ثابت استفاده می‌شوند و هم از پیشرفته‌های برقی که برای کارهای مانور با سرعت پایین استفاده می‌شوند. کشتی‌های جدید کروز تمایل به استفاده از پیشرفته الکتریکی دارند که در آن از ژنراتورهای الکتریکی برای تولید برق استفاده می‌شود که پس از آن می‌توان توسط محرک‌های برقی بدون نیاز به اتصال مکانیکی بین ژنراتورها و پیشرفته‌ها استفاده کرد [۸]. لازم به ذکر است که اگرچه سیستم‌های محرکه مبتنی بر الکتریکی هستند، اما تولید برق همچنان به دیزل ژنراتور نیاز دارد. تحقیقات در حال انجام در مورد ادغام وسایل ذخیره انرژی مانند باتری و چرخ طیار در شناورهای دریایی برای تکمیل دیزل ژنراتورها وجود دارد.

باین‌حال، حتی با درنظرگرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از دیزل ژنراتور برای تولید برق موردنیاز است. این به دلیل تقاضای زیاد برق در کشتی‌های دریایی است. استفاده از پیشرفته‌های برقی برای جایگزینی پیشرفته‌های دیزلی متصل به سیستم مکانیکی به دلیل مزایای آن‌ها موردتوجه قرار گرفته است که شامل موارد زیر است:

۱. بازده بهبودیافته ژنراتورها
۲. بهبود کارایی پیشرفته‌ها در بار کم و سرعت کم
۳. پاسخ دینامیکی سریع‌تر
۴. کاهش وزن و حجم تجهیزات الکتریکی

عملکرد مناسب یک‌ریز شبکه تنها در صورت وجود یک سیستم کنترل مناسب امکان‌پذیر است. برای کنترل ریزشبکه‌ها به‌طور کلی دو روش متمرکز و غیرمتمرکز پیشنهاد شده است. در روش اول ریزشبکه دارای یک سیستم کنترل مرکزی است، که اطلاعات منابع تولید پراکنده به کنترل مرکزی فرستاده‌شده و در آنجا برای وضعیت ریزشبکه تصمیم‌گیری می‌شود [۹]. در کنترل غیرمتمرکز، هر منبع انرژی پراکنده با استفاده از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده محلی، به‌صورت مستقل از سایر منابع عمل می‌کند. عدم نیاز به لینک مخابراتی و عدم وجود منبعی به‌عنوان مرجع نیز باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد [۱۰-۱۱]. مهم‌ترین و جدیدترین روش کنترل غیرمتمرکز که تا به حال ارائه شده است بر اساس یک روش دروپ^۱ به کنترل ریزشبکه می‌پردازد. این روش بر اساس مشخصه‌های دروپ فرکانس - توان اکتیو و نیز دروپ ولتاژ - توان راکتیو برای هر واحد تولید، یک استراتژی کنترل جریان برای سیستم ریزشبکه با چندین واحد تولید ارائه می‌کند و هر واحد تولید به‌وسیله دو مشخصه دروپ مشخص می‌گردد [۱۲].

اصلی‌ترین مزیت روش‌های مبتنی بر دروپ، عدم نیاز به مخابرات (کابل‌های ارتباطی) است که این سبب افزایش قابلیت اطمینان در چنین سیستم‌هایی می‌شود؛ اما این روش به طور مستقیم دینامیک‌های بار را در حلقه کنترل در نظر نمی‌گیرد و بنابراین تغییرات سریع/ بزرگ در دینامیک‌های بار منجر به پاسخ ضعیف ریزشبکه و در موارد نیز موجب ناپایداری ولتاژ/ فرکانس می‌گردد. از سوی دیگر مصالحه بین دقت در تقسیم توان و تنظیم فرکانس و ولتاژ، منجر به پاسخ گذرای کند، سیستم کنترل ریزشبکه می‌گردد [۱۳]؛ بنابراین نیاز است تا ساختار جدیدی ارائه شود که نه تنها مزایای روش فوق را داشته باشد بلکه بتواند ضعف‌های موجود را برطرف کند.

¹ Droop Method

۱۰ درصد برای نوسانات ولتاژ و فرکانس طبق استاندارد STANAG1008 به ترتیب به ۱۶ و ۴ درصد محدود شده است. همچنین این استانداردها، محدودیت اعوجاج هارمونیک ولتاژ و جریان را در رنج ۵ تا ۸ درصد محدود می‌کنند [۱۴].

استفاده از یک کنترل‌کننده غیرمتمرکز برای کنترل واحدهای DER موجود در ریزشبهک مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. در این روش هریک از منابع تولید پراکنده وظیفه کنترل خود را به عهده‌دارند و تنها بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی فعالیت می‌کنند. این روش به دلیل عدم نیاز به یک کنترل‌کننده مرکزی یا لینک مخابراتی، از قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری خوبی برخوردار است. یک استراتژی کنترل غیرمتمرکز بر اساس منطق فازی ارائه شده که در آن سیستم‌های ذخیره انرژی پراکنده با تغییر امپدانس مجازی DC، یک ولتاژ کنترل‌شده و ذخیره‌سازی انرژی را برای کنترل‌های دروپ در حالت شارژ با واحد انرژی ارائه می‌دهد [۱۶]. همچنین در آن پژوهش، مقاومت مجازی به‌خاطر تغییرات ولتاژ در تنظیم می‌شود. روش بهبود دروپ کنترل در یک ریزشبهک در حالت جزیره‌ای ارائه شده و نتایج حاصل نشان داده که در روش پیشنهادی، با اشتراک‌گذاری دقیق جریان در کل سیستم، دستیابی به تنظیم ولتاژ در کل سیستم میسر می‌شود [۱۷].

در این مقاله یک روش کنترل خودکار مستقل برای به اشتراک گذاشتن توان راکتیو در میان منابع انرژی و تثبیت فرکانس به‌منظور بهبود پایداری و کنترل ولتاژ و فرکانس در ریزشبهک شناور به روش کنترل دروپ غیرمتمرکز ارائه می‌گردد. در این روش هیچ‌گونه لینک مخابراتی وجود ندارد و بنابراین قابلیت اطمینان بالایی دارد. همچنین در روش پیشنهادی برای از بین بردن هرگونه وابستگی به لینک مخابراتی و در نتیجه حفظ خودمختاری، سادگی و قابلیت اطمینان سیستم، هماهنگ‌سازی^۱ منابع بدون هیچ ارتباطی انجام می‌شود. به عبارتی دیگر با تشخیص محلی تغییر بارها، هماهنگی و هماهنگ‌سازی میان واحدهای تولید انرژی صورت می‌گیرد؛ بنابراین در این مقاله پس از طراحی و مدل‌سازی روش کنترلی پیشنهادی، به‌منظور بررسی نحوه عملکرد آن، سیستم کنترلی مذکور بر روی یک ریزشبهک شناور شامل منابع تولید انرژی پیاده‌سازی می‌شود و منحنی‌های مربوط به تغییرات فرکانس، توان اکتیو، ولتاژ پایانه و توان راکتیو در چند حالت مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه منحنی‌های مذکور در حالت عدم حضور کنترل‌کننده پیشنهادی نیز به دست می‌آیند تا صحت عملکرد روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد. لازم به ذکر است که کلیه مراحل شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK انجام می‌گیرد. این مقاله دارای اجزایی است که در چهار بخش تنظیم شده است. در بخش دوم، روش کنترل دروپ غیرمتمرکز و سپس روش

باتوجه به استانداردهای طبقه‌بندی و قوانین کشتی‌هایی که با مسائل مربوط به کیفیت برق مرتبط هستند، اعوجاج هارمونیک ولتاژ و جریان در شبکه‌های الکتریکی کشتی‌ها باید کمتر از ۵ درصد و در برخی موارد، اعوجاج هارمونیک ولتاژ تا ۸ درصد نیز مجاز است. همچنین ضریب توان بهره‌برداری از سیستم برق کشتی‌ها باید بیشتر از ۰/۹ باشد. رپل ولتاژ در شناورها نیز نباید به ترتیب بیش از ۶ درصد باشد. در شناورها به‌خصوص در حالت عملکرد جزیره‌ای و جدا از شبکه سراسری، به دلایلی نظیر ظرفیت محدود ژنراتورها، استفاده از ادوات الکترونیک قدرت و از طرفی باتوجه به حضور بارهای سنگین موتوری و چالش تغییرات بار مصرفی، رخداد مشکل افت ولتاژ به یک چالش اساسی تبدیل شده است. این چالش هم در شبکه‌های برق از نوع AC و هم در شبکه‌های برق از نوع DC شایع است و می‌تواند سبب آسیب رسیدن به تجهیزات، وقوع خاموشی و وقفه در عملکرد تجهیزات و حتی خطرات جانی خدمه گردد. در شبکه‌های برق AC، عمده دلیل وقوع ناپایداری ولتاژ را می‌توان وقوع خطای اتصال کوتاه سه‌فاز و نوسانات بار مصرفی با توان بالا نظیر موتورهای پمپ‌ها دانست. در شبکه‌های DC نیز عمده دلیل افت ولتاژ، تغییرات بارهای مصرفی است. با وقوع افت ولتاژ، بسیاری از موتورهای الکتریکی در کشتی‌ها که از نوع القایی هستند، ممکن است با کاهش سرعت روتور، در آستانه ناپایداری فرکانس قرار گرفته و زیر بار بمانند و توانایی راه‌اندازی مجدد را نداشته باشند. درایوهای موتورهای پیشران و رانشگر کشتی‌ها ممکن است با وقوع افت ولتاژ، از مدار خارج شوند و کنترل روی دور موتورهای از بین برود و در نتیجه، تعادل حرکت کشتی با خطر مواجه شود. باتوجه به اینکه طول کابل‌های الکتریکی در شبکه برق کشتی‌ها نیز کوتاه است، سطح اتصال کوتاه مدار الکتریکی آن‌ها نسبتاً بالا بوده و حساسیت گذرهای جریان در مدار الکتریکی به افت و خیز ولتاژ خصوصاً زمانی که دامنه جریان مؤلفه اصلی ناچیز است، نسبتاً زیاد است. به این ترتیب میزان اعوجاج هارمونیک جریان در شناورها در حالت تغذیه بارهای الکتریکی کم، بیشتر تحت تأثیر افت ولتاژ قرار گرفته و می‌تواند با افزایش تلفات الکتریکی، ناپایداری ولتاژ را شدیدتر کند. با افزایش هارمونیک‌های جریان در نتیجه وقوع نوسانات ولتاژ، موتورهای الکتریکی از جمله رانشگرهای کشتی با برق هارمونیک تغذیه شده و تلفات فوکو و هیستریزیس هسته آن‌ها افزایش یافته و همین سبب افزایش دمای عملکرد آن‌ها می‌شود که در بلندمدت، سبب کاهش عمر تجهیزات موتوری می‌گردد و قابلیت اطمینان سیستم‌های پیشران کشتی را با چالش مواجه می‌سازد. مطابق استانداردهای مختلف، محدودیت نوسانات ولتاژ در نتیجه تغییرات بار در شبکه الکتریکی شناورها نباید بیش از ۲۰ درصد باشد و افت و خیز ولتاژ باید در مدت زمان ۱/۵ ثانیه مرتفع گردد. تغییرات گذرهای فرکانس نیز نباید از ۱۰ درصد تجاوز کند و فرکانس در مدت زمان ۵ ثانیه باید به حالت عادی بازگردد. اعداد ۲۰ درصد و

^۱ Coordination

ساختارهای متفاوت برای واسط الکترونیک قدرت معرفی شده است. برای طراحی حلقه های کنترلی داخلی از معادلات حاکم بر رفتار فیلتر خروجی اینورتر استفاده می شود. معادلات فیلتر LC خروجی اینورتر در چارچوب سنکرون dq به صورت زیر به دست می آیند [۱۹].

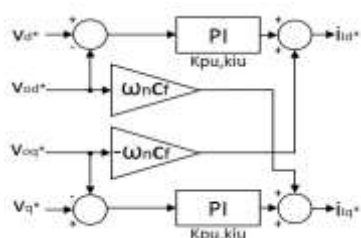
$$C \frac{dv_{od}}{dt} = i_{id} - i_{od} + C\omega v_{oq} \quad (۱)$$

$$C \frac{dv_{oq}}{dt} = i_{iq} - i_{oq} + C\omega v_{od} \quad (۲)$$

$$L \frac{dv_{id}}{dt} = v_{id} - v_{od} + L\omega i_{iq} \quad (۳)$$

$$L \frac{dv_{id}}{dt} = v_{id} - v_{od} + L\omega i_{iq} \quad (۴)$$

در روابط فوق، C و L خازن و سلف فیلتر خروجی اینورتر، ω فرکانس زاویه ای است. i_o و i_i به ترتیب جریان و ولتاژ خروجی اینورتر و v_i و v_o ولتاژ ورودی هستند. به منظور طراحی کنترل کننده، دو زیرسیستم بر اساس معادلات فوق در نظر گرفته می شود. معادلات (۱) و (۲) که مربوط به مؤلفه های ولتاژ خازن فیلتر است، به عنوان زیرسیستم اول و معادلات (۳) و (۴) که مربوط به مؤلفه های جریان سلف فیلتر در خروجی اینورتر است به عنوان زیرسیستم دوم در نظر گرفته می شوند. در طراحی، برخی متغیرهای حالت سیستم به عنوان ورودی های کنترلی مجازی در نظر گرفته می شوند و مقادیر مرجع مناسب برای آن ها به نحوی انتخاب می گردد که خروجی های سیستم مقادیر مرجع خود را تعقیب نمایند. شکل (۲) بلوک دیاگرام کنترلی ولتاژ داخلی نشان می دهد.



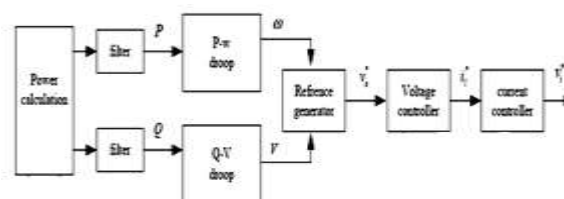
شکل ۲. حلقه کنترل ولتاژ

مطابق شکل (۲)، در زیرسیستم اول، مؤلفه های جریان سلف طرف اینورتر، i_{id} و i_{iq} به عنوان ورودی در نظر گرفته می شوند و مقدار مرجع برای آن ها به نحوی تعیین می گردد که مؤلفه های ولتاژ خروجی مقادیر مرجع خود را در حضور نامعینی در پارامترهای این زیرسیستم تعقیب نمایند. شکل (۳) ساختار کنترلی حلقه جریان داخلی که به منظور جلوگیری از اضافه جریان و ایجاد محدودیت در هنگام مواجه با خطاها اتخاذ شده است را نشان می دهد. در اینجا نیز از یک کنترل کننده PI استاندارد به منظور دستیابی به کنترل جریان سلف فیلتر خروجی استفاده شده است.

پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم نتایج شبیه سازی ارائه و تحلیل شده است. سرانجام، در بخش چهارم نتیجه گیری ارائه شده است.

۲. روش کنترل دروپ غیرمتمرکز

مهم ترین و جدیدترین روش کنترل غیرمتمرکزی که تا به حال ارائه شده است، روش دروپ^۱ کنترل ریزشبه است. این روش بر اساس مشخصه های دروپ فرکانس - توان اکتیو و نیز دروپ ولتاژ - توان راکتیو برای هر واحد تولید پراکنده، یک استراتژی کنترل جریان برای سیستم ریزشبه جزیره ای با چندین واحد تولید پراکنده ارائه می کند و هر واحد تولید پراکنده به وسیله دو مشخصه دروپ مشخص می گردد. در این روش، جریان و ولتاژ خروجی توسط سنسور محاسبه شده و سپس توسط روابط موجود در مرجع dq، مقدار توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده و پس از فیلتر شدن توسط یک فیلتر پایین گذر، در کنترلر دروپ به کار گرفته می شود تا فرکانس و دامنه ولتاژ را تولید کند. سپس، مقادیر مرجع ولتاژ در کنترل کننده ولتاژ به کار گرفته می شود و در نهایت در کنترل کننده جریان به کار گرفته می شود تا از این طریق پالس های سوئیچ زنی مناسب مربوط به مبدل ایجاد شود [۱۸]. شکل (۱) دیاگرام کلی سیستم مورد بررسی در این مقاله را نشان می دهد.



شکل ۱. ساختار کنترل دروپ غیر متمرکز

همان گونه که مشاهده می شود در این روش، جریان و ولتاژ خروجی توسط سنسور محاسبه شده و سپس توسط روابط موجود در مرجع dq، مقدار توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده و پس از فیلتر شدن توسط یک فیلتر پایین گذر، در کنترلر دروپ به کار گرفته می شود تا فرکانس و دامنه ولتاژ را تولید کند. سپس، مقادیر مرجع ولتاژ در کنترل کننده ولتاژ به کار گرفته می شود و در نهایت در کنترل کننده جریان به کار گرفته می شود، تا از این طریق پالس های سوئیچ زنی مناسب مربوط به مبدل ایجاد شود. در ادامه بخش های مختلف کنترل کننده متمرکز مورد استفاده در این پژوهش به تفکیک و با استفاده از روابط تشریح می گردد. برای تعقیب فرمان های مرجع توان و دستیابی به انرژی الکتریکی با کیفیت مطلوب در خروجی منابع ولتاژ اینورتری، استفاده از یک سیستم کنترل ولتاژ و جریان مناسب برای مبدل الکترونیک قدرت منابع DER ضروری است. به همین منظور روش های کنترلی با

^۱ Droop Method

مستقل از بار است، لازم است تقسیم توان اکتیو به نحو درست اطمینان حاصل شود. برای این کار یک شیفت در داخل منحنی دروپ کنترل نیاز است که به آن فرایند بازیابی فرکانسی (FRP)^۱ می‌گویند تا فرکانس را به مقدار اسمی‌اش بازیابی کند. حال باتوجه به شکل (۴) و محاسبه معادله مربوط به هر یک از خطوط شیب‌دار می‌توان رابطه (۵) را ارائه کرد.

$$\omega_i = \omega_0 + \delta\omega_i - m_i P_i \quad (5)$$

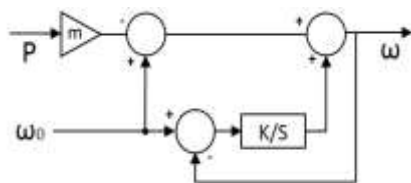
باتوجه به معادله فوق، برای تنظیم فرکانسی ω_i روی فرکانس اسمی ω_0 باید برابر با $m_i P_i$ باشد؛ یعنی در حالت پایدار می‌توان رابطه (۶) را نوشت:

$$\delta\omega_i = m_i P_i \quad (6)$$

بنابراین، در حالتی که تغییرات کوچک باشد می‌توان رابطه (۷) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{d(\delta\omega_i)}{dt} = k\Delta\omega_i \quad (7)$$

که در رابطه بالا، $\Delta\omega_i$ اختلاف فرکانس ω_i و ω_0 است و k مقدار ثابتی است که نشان‌دهنده نرخ کلی بازیابی فرکانس است؛ بنابراین بلوک دیگرام مربوط به تثبیت و بازیابی فرکانس سیستم در این حالت و باتوجه به روابط فوق به صورت شکل (۵) ارائه می‌گردد.



شکل ۵. نحوه تثبیت و بازیابی فرکانس در ریز شبکه‌ها

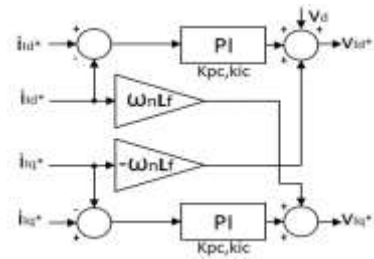
۲-۲. اشتراک توان راکتیو در کنترل‌کننده دروپ

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، اشتراک‌گذاری توان اکتیو در سیستم قدرت توسط کنترل دروپ $p=f$ صورت می‌گیرد؛ اما برای اشتراک‌گذاری و تقسیم توان راکتیو DER باید از کنترل دروپ $Q-V$ استفاده شود با این تفاوت که در این حالت مقادیر تحت‌تأثیر پارامترهایی همچون افت ولتاژ روی فیدرهای DER و بارهای محلی نزدیک DER هستند. رابطه (۸) بیانگر این موضوع است.

$$V_i = V_{pcc} + \frac{R}{V_{pcc}} P_i + \frac{X}{V_{pcc}} Q_i \quad (8)$$

که در آن V_i و V_{pcc} به ترتیب دامنه ولتاژ DER و نقطه اتصال (PCC)^۲ است و $P_i + jQ_i$ توان تزریقی توسط DER است. همچنین $R + jX$ در این رابطه، مقدار امپدانس خط بین DER و PCC است. حال با فرض کوچک بودن مقدار مقاومت خط می‌توان رابطه بالا را به صورت رابطه (۹) بازنویسی کرد.

$$\Delta V_i = V_i - V_{pcc} = \frac{X}{V_{pcc}} Q_i = K Q_i \quad (9)$$

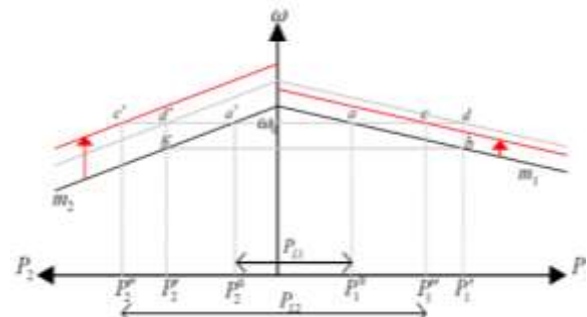


شکل ۳. حلقه کنترل جریان

مطابق شکل (۳)، در زیرسیستم دوم مؤلفه‌های ولتاژ خروجی اینورتر، v_{iq} و v_{id} ورودی‌های کنترل اصلی سیستم هستند. ضابطه این ورودی‌های کنترلی به نحوی تعیین می‌شود که جریان سلف طرف اینورتر مقادیر مرجع خود را در حضور نامعینی در پارامترهای این زیرسیستم تعقیب نمایند. وجود حلقه‌ی جریان اجازه می‌دهد تا شکل جریان تنظیم‌شده و محدودیت‌های جریان به صورت هم‌زمان، یا پاسخ‌های بسیار سریع انجام شود. لازم به ذکر است که اگر حلقه‌های جریان و ولتاژ داخلی از این مدل حذف شود، تنظیم و محدودساز جریان از بین می‌رود و این شاید منجر به تزریق جریان بسیار بالا در طی شرایط بسیار اضطراری و تأثیر بر کیفیت جریان خالص شود. اگر حلقه‌های داخلی با سیستم ترکیب داده شود، ممکن است سیستم در سرتاسر حالت پایداری و پاسخ سریع، افت کند. اگر یک حلقه کنترلی دامنه ولتاژ با مدیریت توان راکتیو توصیف شود، ممکن است بتوان آن حلقه ولتاژ را حذف کرد و بردار ولتاژ را مستقیماً به PWM متصل کرد. هرچند این کار کیفیت جریان را پایین می‌آورد زیرا هیچ تنظیم جریان و حلقه‌ی فیدبکی برای جریان وجود نخواهد داشت. در این روش خروجی مدیریت توان می‌تواند هم به صورت چارچوب $d-q$ و یا هم به صورت دامنه ولتاژ و فرکانس باشد.

۲-۱. تثبیت فرکانس در کنترل‌کننده دروپ

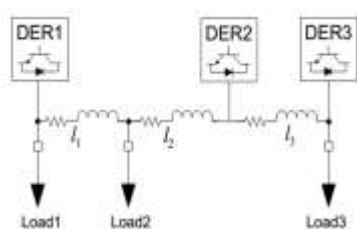
شکل (۴) نحوه تثبیت فرکانس را برای دو DER نشان می‌دهد که برای ساده‌سازی منحنی‌های دروپ به شکل پشت‌به‌پشت در شکل نشان داده شده‌اند.



شکل ۴. نحوه اشتراک توان در واحدهای DER به منظور تثبیت فرکانس در شکل (۴)، نقاط a و a' شرایط را قبل از تغییر بار نشان می‌دهد که در این حالت فرکانس کاری ω_0 است. بعد از تغییر بار، از P_{L1} به P_{L2} ، نقاط کاری به b و b' شیفت پیدا می‌کنند که فرکانس کاری کمتری را دارد. برای داشتن یک فرکانس کاری حالت پایداری که

^۱ Frequency Restoration Process

^۲ Point of Common Coupling



شکل ۶. سیستم مورد استفاده در مقاله به منظور شبیه سازی

مقادیر پارامترهای مربوط به بخش قدرت مورد استفاده در سیستم شبیه سازی مطابق جدول (۱) است. همچنین مقادیر پارامترهای مربوط به بخش کنترلی مورد استفاده در سیستم شبیه سازی به مطابق جدول (۲) است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای بخش قدرت در شبیه سازی [۱۹]

بخش قدرت	پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی (خط - خط)	V_{LL}	۵۰ میکرو فاراد
		۱/۳۵ میلی هانری
فرکانس نامی	f_n	۰/۳ میلی هانری
بار	Load1	۴ کیلو وات
	Load2	۲ کیلو وات
	Load3	۲ کیلو وات
امپدانس خط	l_1	۰/۴ اهم
	l_2	۰/۲ اهم
	l_3	۰/۲ اهم

جدول ۲. مقادیر پارامترهای بخش کنترلی در شبیه سازی [۱۹]

بخش کنترلی	پارامتر	مقدار
فیلتر خروجی	C_f	۵۰ میکرو فاراد
	L_f	۱/۳۵ میلی هانری
	r_f	۰/۱ اهم
امپدانس خروجی	L_c	۰/۳۵ میلی هانری
	r_{Lc}	۰/۰۳ اهم
کنترلر ولتاژ	K_{pv}	۰/۰۵
	K_{iv}	۳۹۰
کنترلر جریان	K_{pc}	۱۰/۵
	K_{ic}	۱۶۰۰۰
کنترل دروپ	m_1	۰/۰۰۰۱
	m_2	۰/۰۰۰۰۵
	m_3	۰/۰۰۰۱
	n_1	۰/۰۰۱
	n_2	۰/۰۰۰۵
	n_3	۰/۰۰۱

در این مقاله به منظور بررسی صحت نتایج و درستی عملکرد سیستم کنترلی دو شاخص در نظر گرفته می شود که عبارت اند از: شاخص فرکانس زاویه ای: این شاخص برای بررسی عملکرد سیستم در تثبیت فرکانس در حالت های مختلف مورد استفاده قرار

این معادله رابطه بین اختلاف دامنه ولتاژ (بین ولتاژ خروجی DER و PCC) و توان راکتیو خروجی DER را نشان می دهد. از آنجاکه V_{PCC} می بایست در گستره کوچکی تغییر کند و اندوکتانس بین دو ولتاژ اساساً ثابت هستند، بنابراین منطقی است که فرض کنیم که K مقدار ثابتی باشد. لازم به ذکر می باشد که کلیه معادلات نوشته شده در این بخش باتوجه به معادله خط شیب دار ارائه شده اند.

۳-۲. اشتراک گذاری توان و بازبایی فرکانس

همان گونه که بیان شد فرکانس یک ریز شبکه در حالت ماندگار، یکتا است و بنابراین، توان اکتیو توسط کنترل دروپ P-f به اشتراک گذاشته می شود. این مفهوم می تواند خطای تقسیم توان راکتیو را در طی فرایند جبران سازی توان راکتیو (RCP)^۱ حذف کند. این به این معنی است که در طی RCP، فرکانس نقشی حیاتی برای متصل شدن DERها به هم دارد. در RCP به جای روابط اصلی دروپ کنترل از روابط زیر استفاده می شود.

$$\omega_i = \omega_o - m_i P_i + G k_q (n_i Q_i) \quad (10)$$

$$V_i = V_o - n_i Q_i + \frac{k_L}{s} G (P_i - P_{i,avg})$$

که در آن K_q و K_L ثابت های توان راکتیو و بهره انتگرال گیر هستند که به گونه ای انتخاب می شوند که برای تمام DERها برابر باشند، G بهره جبران ساز است که نوسانات توان را در طی فرایند جبران سازی حداقل می کند و $P_{i,avg}$ توان خروجی متوسط i امین DER است. همچنین باتوجه به اینکه در نهایت فرکانس ثابت (یکتا) و در تمام DERها یکسان است، می بایست رابطه (۱۱) برقرار باشد.

$$n_1 Q_1 = n_2 Q_2 = \dots = n_N Q_N \quad (11)$$

مطابق شکل (۵) کنترل کننده غیر متمرکز پیشنهادی، به دلیل وجود واحدهای RCP و FRP، با اشتراک گذاری توان راکتیو در سیستم، علاوه بر کنترل ولتاژ، فرکانس سیستم به مقدار اولیه بازبایی شده است. نحوه عملکرد سیستم بدین نحو است که کنترل کننده پیشنهادی بلافاصله پس از ایجاد تغییر در سیستم مانند ورود بار و یا خروج بار از شبکه، تغییر را احساس کرده، سپس به واحدهای تولید پراکنده پیام می دهد که با اشتراک گذاری توان راکتیو در سیستم علاوه بر جبران سازی ولتاژ و تنظیم محدوده آن، مقدار فرکانس سیستم نیز به مقدار اولیه خود بازگردد. درواقع تقسیم توان مناسب باعث بهبود عملکرد ریز شبکه و قدرت مانور آن در زمان خطا می شود و عملکرد ریز شبکه را در شرایط جزیره ای تضمین می کند.

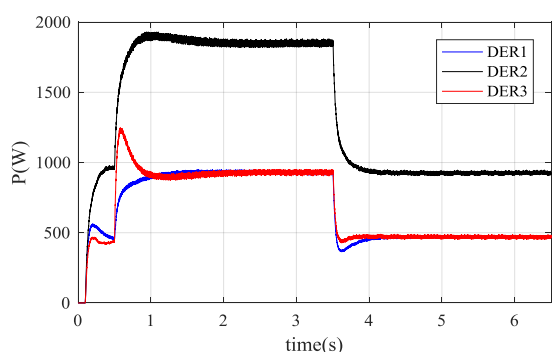
۳. شبیه سازی مدار پیشنهادی

شکل (۶) ساختار سیستم شبیه سازی شده در این مقاله مربوط به ریز شبکه شناور را نشان می دهد که شامل سه منبع تولید توان و سه بار متصل به آن است.

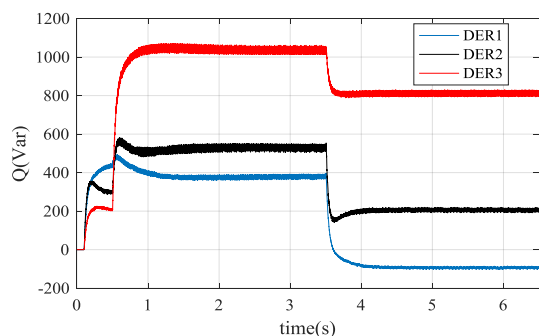
¹ Power Compensation Process

شکل ۷. منحنی فرکانس زاویه‌ای سیستم (سناریو اول)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود فرکانس زاویه‌ای در ابتدا برابر ۳۱۴/۱۶ است و پس از ورود بار شماره ۲ در لحظه ۰/۱ فرکانس کاهش می‌یابد. این کاهش با ورود بار شماره ۳ در لحظه ۰/۵ ثانیه بیشتر شده و سپس با خروج بار شماره دو در لحظه ۳/۵ ثانیه مقداری فرکانس افزایش می‌یابد، اما درنهایت به دلیل عدم حضور کنترل‌کننده مناسب، فرکانس سیستم به مقدار اولیه بازمی‌گردد که سبب وجود مشکلاتی خواهد شد. شکل (۸) و (۹) به ترتیب منحنی‌های توان اکتیو و راکتیو مربوط به واحدهای DER را نشان می‌دهد.

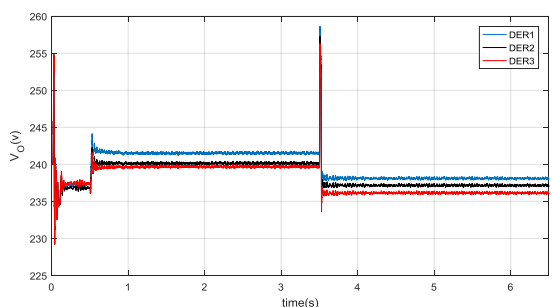


شکل ۸. منحنی فرکانس زاویه‌ای سیستم (سناریو اول)



شکل ۹. منحنی توان راکتیو واحدهای DER (سناریو اول)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود منحنی‌های توان اکتیو و راکتیو کاملاً وابسته به بارهای ورودی و خروجی از مدار هستند به‌نحوی که با ورود بار به سیستم میزان توان اکتیو و راکتیو DERها افزایش می‌یابد و با خروج بار از سیستم، توان‌های DERها کاهش می‌یابد. همچنین شکل (۱۰) منحنی ولتاژ پایانه مربوط به DERها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. منحنی ولتاژ ترمینال (خروجی) DERها (سناریو اول)

می‌گیرد که به‌واسطه اینکه سیستم همواره می‌بایست در فرکانس ۵۰ هرتز کار کند، مقدار فرکانس زاویه‌ای ۳۱۴ در نظر گرفته می‌شود که این مقدار شاخص فرکانسی است. اختلاف مقادیر به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی با مقدار مذکور نشان‌دهنده دقت نتایج است.

شاخص مربوط به ولتاژ: باتوجه‌به اینکه ولتاژ سیستم در حالت عملکرد نرمال ۲۳۷ ولت است، بنابراین این مقدار به‌عنوان شاخص ولتاژ در نظر گرفته می‌شود و سیستم کنترلی باید به نحوی عمل کند که با تزریق توان راکتیو در حالت‌های مختلف این ولتاژ را قابل‌دستیابی کند؛ بنابراین اختلاف ولتاژ با این مقدار نشان‌دهنده خطای سیستم کنترلی است که در شبیه‌سازی‌ها به آن اشاره می‌شود [۱۹].

برای بررسی نتایج شبیه‌سازی در این مقاله سناریوهای مختلف در نظر گرفته‌شده است که به‌صورت زیر است.

سناریو اول: نتایج شبیه‌سازی در حالت عدم حضور کنترل‌کننده دروپ غیرمتمرکز جزیره‌ای

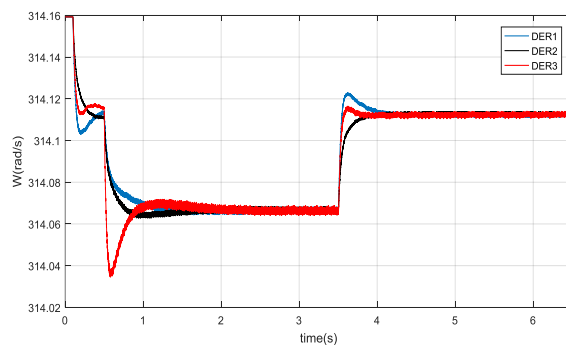
سناریو دوم: نتایج شبیه‌سازی در حالت حضور کنترل‌کننده دروپ غیرمتمرکز جزیره‌ای

سناریو سوم: نتایج شبیه‌سازی در حالت حضور کنترل‌کننده دروپ غیرمتمرکز جزیره‌ای برای تغییر بار ناگهانی

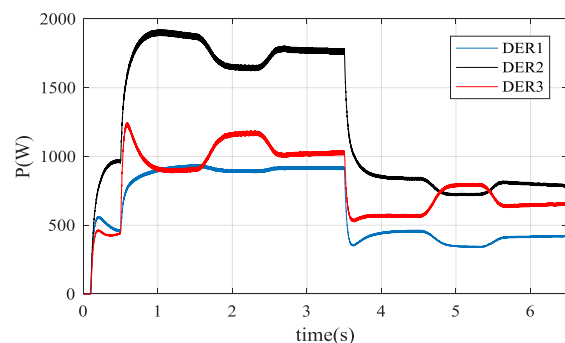
لازم به ذکر است که کنترل‌کننده موردنظر می‌بایست علاوه بر اشتراک‌گذاری توان راکتیو در سیستم، مقدار فرکانس زاویه‌ای را در حالت اولیه که مساوی ۳۱۴ رادیان بر ثانیه است برگرداند (بازیابی فرکانس).

۳-۱. سناریو اول: عدم حضور کنترل‌کننده دروپ غیرمتمرکز جزیره‌ای

در حالت اول شبیه‌سازی، بار شماره ۲ در ثانیه ۰/۱ وارد مدار شده و در ثانیه ۳/۵ از مدار خارج می‌شود. همچنین بار شماره ۳ در این حالت در ثانیه ۰/۵ وارد مدار می‌شود. در این حالت همان‌گونه که قبلاً بیان شد کنترل‌کننده متمرکز مجهز به FRP و RPC وجود ندارد. شکل (۷) منحنی فرکانس زاویه‌ای سیستم در این حالت را نشان می‌دهد.

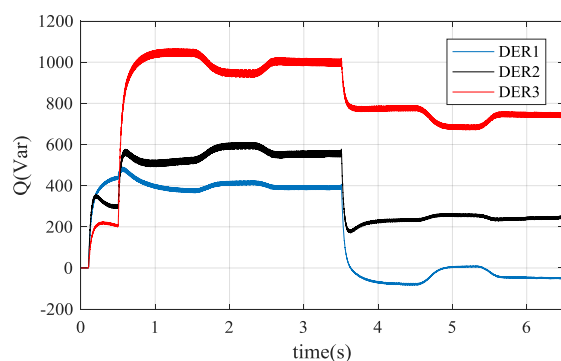


همان‌گونه که مشاهده می‌شود فرکانس زاویه‌ای به مقدار اولیه و موردنظر می‌رسد که این درواقع نشان‌دهنده تثبیت فرکانس و عملکرد مناسب کنترل‌کننده پیشنهادی است. شکل (۱۳) و (۱۴) به ترتیب منحنی‌های توان اکتیو و راکتیو مربوط به واحدهای DER را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. منحنی توان اکتیو واحدهای DER (سناریو دوم)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هنگامی که در ثانیه ۱٫۵ بار شماره ۲ و ۳ وارد مدار هستند، قبل از عمل کردن FRP-RCP، مقدار توان راکتیو DER1 برابر ۳۵۰ وار، DER2 برابر ۴۵۰ وار و DER3 برابر ۱۰۵۰ وار است؛ همچنین در این حالت فرکانس زاویه‌ای ۳۱۴ رادیان بر ثانیه است. پس از وارد شدن واحدهای FRP-PRC، همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار توان راکتیو واحد DER1 برابر ۴۰۰ وار، DER2 برابر ۶۰۰ وار و DER3 برابر ۹۵۰ وار می‌شود؛ همچنین در این حالت فرکانس زاویه‌ای به ۳۱۴/۱۶ رادیان بر ثانیه می‌رسد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب کنترل‌کننده متمرکز در اشتراک‌گذاری توان راکتیو و بازیابی فرکانس اولیه است. همچنین شکل (۱۵) منحنی تغییرات ولتاژ ترمینال مربوط به DER ها را در این حالت نشان می‌دهد.

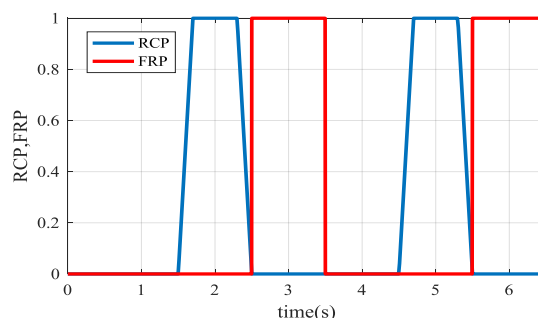


شکل ۱۴. منحنی توان راکتیو واحدهای DER (سناریو دوم)

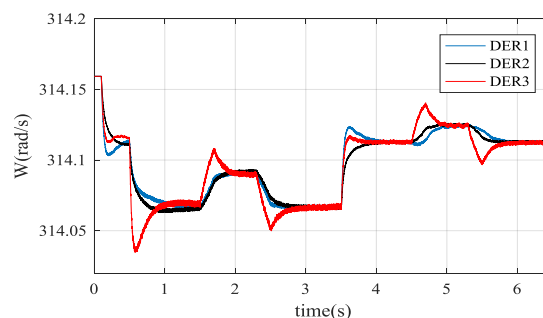
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، منحنی ولتاژ نیز در این حالت به‌شدت تحت‌تأثیر ورود خروج بارهای مختلف است که نشان‌دهنده ضعف در سیستم کنترل است.

۳-۲. سناریو دوم: حضور کنترل‌کننده دروپ غیرمتمرکز جزیره‌ای

در این حالت کنترل‌کننده غیرمتمرکز مورد استفاده قرار می‌گیرد و بخش تثبیت‌کننده فرکانس که در این مقاله مورد استفاده و پیشنهاد قرار گرفته است، وجود دارد. در ادامه نتایج شبیه‌سازی در این مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است شرایط ورود و خروج بارها مطابق حالت قبل (حالت اول) است. شکل (۱۱) نحوه عملکرد بخش‌های اشتراک‌گذاری توان (RCP) و تثبیت‌کننده فرکانس (FRP) را نشان می‌دهد. در این مقاله طراحی به نحوی صورت گرفته است که RCP دقیقاً یک ثانیه پس از وقوع تغییر در سیستم عمل می‌کند و بخش FRP بلافاصله پس از اتمام کار RCP شروع به کار می‌کند که در شکل نیز کاملاً مشهود است. حال باتوجه به آنچه بیان شد شکل (۱۲) منحنی فرکانس زاویه‌ای سیستم را در این حالت نشان می‌دهد.

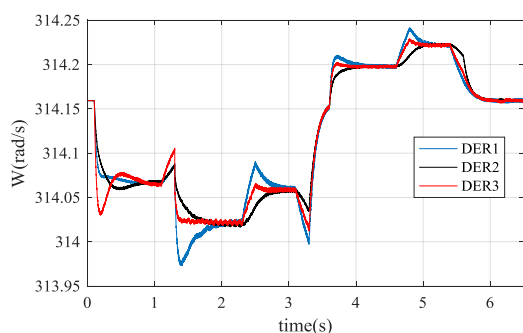


شکل ۱۱. نحوه عملکرد دو بخش RCP و FRP (سناریو دوم)

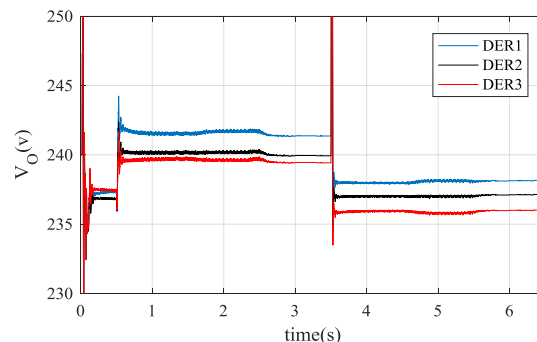


شکل ۱۲. منحنی فرکانس زاویه‌ای سیستم (سناریو دوم)

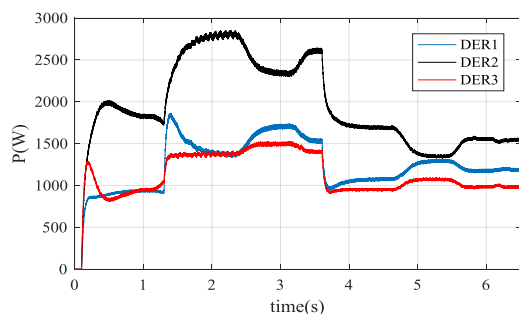
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در لحظه ۰/۱ که بار شماره دو وارد مدار می‌شود، دقیقاً یک ثانیه بعد از آن می‌باید RCP عمل کند اما قبل از آن بار شماره ۳ نیز در ثانیه ۰/۵ وارد مدار می‌شود و به همین دلیل دقیقاً در ثانیه ۱/۵، RCP عمل می‌کند و بلافاصله بعد از آن FRP عمل می‌کند و سبب افزایش فرکانس زاویه‌ای می‌شود. در خلال افزایش فرکانس، بار شماره ۲ در ثانیه ۳/۵ از مدار خارج شده و به دلیل وجود این تغییر باز RCP یک ثانیه پس از دیدن این تغییر عمل کرده و سپس FRP عمل می‌کند. در نهایت



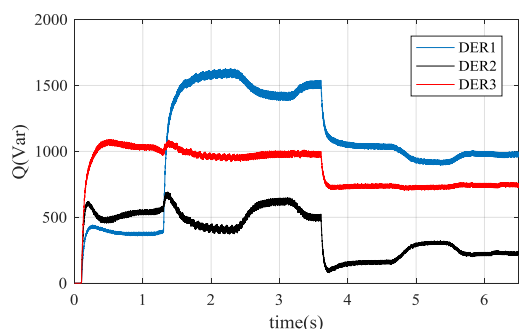
شکل ۱۷. منحنی فرکانس زاویه‌ای سیستم (سناریو سوم)



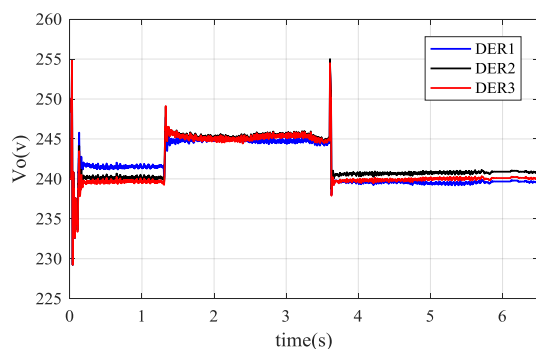
شکل ۱۵. منحنی ولتاژ ترمینال (خروجی) DER ها (سناریو دوم)



شکل ۱۸. منحنی توان اکتیو واحدهای DER (سناریو سوم)



شکل ۱۹. منحنی توان راکتیو واحدهای DER (سناریو سوم)

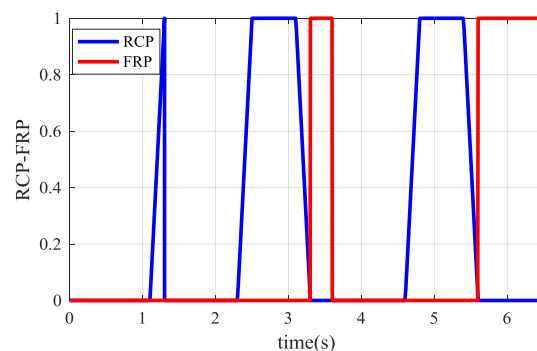


شکل ۲۰. منحنی ولتاژ ترمینال (خروجی) DER ها (سناریو سوم)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود کنترل‌کننده غیرمتمرکز پیشنهادی که دارای بخش‌های اشتراک‌گذاری توان و تثبیت توان است در این حالت نیز به‌خوبی عمل کرده است و توانسته است با اشتراک‌گذاری توان راکتیو هم کنترل ولتاژ و هم تثبیت فرکانس را انجام دهد و از این طریق تأثیر ورود خروج بارها در سیستم جزیره‌ای به حداقل مقدار خود برسد.

۳-۳. سناریو سوم: حضور کنترل‌کننده دروپ غیرمتمرکز جزیره‌ای برای تغییر بار ناگهانی

در حالت قبل عملکرد کنترل‌کننده در حالتی انجام گرفت که ورود خروج بارها قبل و بعد از عملکرد بخش FRP-RPC صورت گرفت؛ اما در حالت سوم هدف بررسی عملکرد سیستم در حالتی است که ورود یا خروج بارها در حین عمل کردن بخش FRP-RPC صورت می‌گیرد تا بررسی شود که چه اتفاقی برای سیستم خواهد افتاد. در این حالت، بارهای شماره ۲ و ۳ در ثانیه ۰/۱ و بار شماره ۱ در ثانیه ۱/۳ وارد مدار می‌شوند. در ادامه بار شماره ۲ در ثانیه ۳/۶ از مدار خارج می‌شود. نحوه عملکرد واحدهای FRP-RPC به‌صورت شکل (۱۶) است. همچنین شکل (۱۷) منحنی فرکانس زاویه‌ای سیستم را در این حالت نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در لحظه ۰/۱ ثانیه بارهای شماره ۲ و ۳ وارد مدار می‌شوند و RCP می‌باید ۱ ثانیه بعد عمل کند که همین اتفاق هم می‌افتد؛ اما به دلیل وارد شدن بار شماره ۱ در لحظه ۱/۳ ثانیه، RCP متوقف می‌شود و یک ثانیه بعد در لحظه ۲،۳ ثانیه عمل می‌کند و پس از آن FRP شروع می‌شود که بار شماره ۲ در لحظه ۳/۶ از مدار خارج شده و FRP متوقف می‌شود و در آخر پس از یک ثانیه یعنی در لحظه ۴/۶ ثانیه دوباره RCP و FRP عمل می‌کند و چون تغییری در مدار ایجاد نمی‌شود در نهایت مقدار فرکانس زاویه‌ای به مقدار اولیه ۳۱۴/۱۶ رادیان بر ثانیه می‌رسد. در این حالت منحنی‌های توان اکتیو، راکتیو و ولتاژ مربوط به DERها به ترتیب در شکل‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) آورده شده است.



شکل ۱۶. نحوه عملکرد دو بخش RCP و FRP (سناریو سوم)

- [6] Akbarzadeh Aghdam, P.; Khoshkhoo, H. "Prediction of Voltage Stability Status Considering the Impact of the Protection System"; *J. Defence Sci. Technol.* 2021, 3, 251-263 (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1400.12.4.3.5>
- [7] Terriche, Y. "Effective Controls of Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactors for Power Quality Improvement in Shipboard Microgrids"; *IEEE Trans. Ind. Appl.* doi: 10.1109/TIA.2021.3058595.
- [8] Lan, H.; Wen, S.; Hong, Y.; Yu, D. C.; Zhang, L. "Optimal Sizing of Hybrid PV/Diesel/Battery in Ship Power System"; *Appl. Energ.* 2015, 158, 26-34. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.031
- [9] Zhang, B.; Gao, F.; Zhang, Y.; Liu, D.; Tang, H. "An AC-DC Coupled Droop Control Strategy for VSC-Based DC Microgrids"; *IEEE Trans. Power Electron.* 2022. doi: 10.1109/TPEL.2022.3141096.
- [10] Han, Y. "Consensus-Based Enhanced Droop Control Scheme for Accurate Power Sharing and Voltage Restoration in Islanded Microgrids"; *IEEE Trans. Power. Syst.* doi: 10.1007/978-3-030-74513-4-7.
- [11] Han, H.; Liu, Y.; Sun, Y.; Su, M.; Guerrero, J. "An Improved Droop Control Strategy for Reactive Power Sharing in Islanded Microgrid"; *IEEE Trans. Power Electron.* 2015. doi: 10.1109/TPEL.2014.2332181.
- [12] Kosari, M.; Hosseini, S. H. "Decentralized Reactive Power Sharing and Frequency Restoration in Islanded Microgrid"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2017. doi: 10.1109/TPWRS.2016.2621033.
- [13] De Godoy, P.; Felisberto, K. D. R.; Poloni, P.; De Almeida, A. B.; Marujo, D. "Microgrid Operation and Control: From Grid-Connected to Islanded Mode"; *IEEE Sensors J.* 2022. doi: 10.1007/978-3-030-90812-6-9.
- [14] Terriche, Y. "Power Quality and Voltage Stability Improvement of Shipboard Power Systems with Non-Linear Loads"; *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2019. doi: 10.1109/IEEEIC.2019.8783356.
- [15] Joao Abel, L.; Moreira, C.; Madureira, A. "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2006. doi: 10.1109/TPWRS.2006.873018.
- [16] Han, Y.; Li, H.; Shen, P.; Coelho, E.; Guerrero, J. M. "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids"; *IEEE Power Electron. Lett.* 2016. doi: 10.1109/TPEL.2016.2569597.
- [17] Lu, X.; Yu, J.; Lai, Y.; Wang, Y.; Guerrero, J. M. "A Novel Distributed Secondary Coordination Control Approach for Islanded Microgrids"; *IEEE Trans. Smart Grid* 2018. doi: 10.1109/TSG.2016.2618120.
- [18] Xu, L.; Guerrero, J. M.; Lashab, A.; Wei, B.; Bazmohammadi, N.; Vasquez, J.; Abusorrah, A. "A Review of DC Shipboard Microgrids Part I: Power Architectures, Energy Storage, and Power Converters"; *IEEE Trans. Power Electron.* 2022. doi: 10.1109/TPEL.2021.3128417.
- [19] Pérez-Estévez, D.; Doval-Gandoy, J.; Crego-Lourido, A. "Grid Current Control for Active-Front-End Electric Propulsion Systems in AC Ship Microgrids"; *IEEE Trans. Power Electron* 2021. doi: 10.1109/JESTPE.2021.3133271.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش کنترل خودکار مستقل برای به اشتراک گذاشتن توان راکتیو در میان منابع انرژی و تثبیت فرکانس به‌منظور بهبود پایداری و کنترل ولتاژ و فرکانس در ریزشیکه شناور به روش کنترل دروپ غیرمتمرکز ارائه شده است. روش کنترل غیرمتمرکز مستقل است و نیازی به لینک‌های مخابراتی و ارتباطی بین واحدهای DER ندارد و بنابراین سادگی و قابلیت اطمینان سیستم را حفظ می‌کند. اساس کنترل‌کننده، تشخیص لحظه تغییر بار در هر DER است. نتایج شبیه‌سازی برای حالتی که کنترل‌کننده غیرمتمرکز وجود نداشت مورد بررسی قرار گرفت که نشان می‌داد، منحنی فرکانس زاویه‌ای سیستم بسیار به تغییرات بارها حساس بوده و در نهایت بازایی فرکانس صورت نگرفته و فرکانس سیستم تغییر می‌کند. هنگامی که کنترل‌کننده غیرمتمرکز بر روی سیستم پیاده شد، به دلیل وجود واحدهای RCP و FRP، با اشتراک‌گذاری توان راکتیو، علاوه بر کنترل ولتاژ، فرکانس سیستم به مقدار اولیه بازایی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی بلافاصله پس از ایجاد تغییر در سیستم مانند ورود بار و یا خروج بار از شبکه، خطا را احساس کرده، سپس به واحدهای تولید پراکنده با اشتراک‌گذاری توان راکتیو در سیستم علاوه بر جبران‌سازی ولتاژ و تنظیم محدوده آن، مقدار فرکانس سیستم را به مقدار اولیه خود بازمی‌گرداند. نتایج نشان داد که اگر در هنگام عملکرد کنترل‌کننده، ناگهان تغییری در سیستم رخ دهد، کنترل‌کننده عملیات را انجام متوقف و دوباره بر اساس تغییرات جدید عملیات کنترلی را انجام می‌دهد که این نشان‌دهنده سرعت و آنلاین بودن کنترل‌کننده نسبت به کوچک‌ترین تغییرات به وجود آمده در سیستم است.

۵. مراجع‌ها

- [1] Al-Falahi, M. A.; Tarasiuk, T.; Jayasinghe, S. G.; Jin, Z.; Enshaie, H.; Guerrero, J. M. "AC Ship Microgrids: Control and Power Management Optimization"; *IEEE Control Syst. Mag.* 2018. doi: 10.3390/en11061458.
- [2] Fang, S.; Xu, Y.; Li, Z.; Zhao, T.; Wang, H. "Two-Step Multi-Objective Management of Hybrid Energy Storage System in All-Electric Ship Microgrids"; *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2019. doi: 10.1109/TVT.2019.2898461.
- [3] Khazadeh, M. "Decentralized Control of Electrical Energy for Sensitive Areas as Inverter-Based Islanded Microgrid without Frequency Change"; *J. Defence Sci. Technol.* 2019, 2, 105-117 (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1394.6.2.4.0>
- [4] Akbarian, H.; Sedaaghi, M. "Recognition of Acoustic Emitted from Surface Vessels Using MobileNet Convolutional Algorithm"; *J. Adv. Defence Sci. Technol.* 2023, 1, 39-50 (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.1.4.4>
- [5] Khazadeh, M.; Nabatirad, M. R.; Ashrafi, A. "Improving Power System Stability After Contingency Occurrence on the Basis of Distributed Artificial Intelligence"; *J. Adv. Defence Sci. Technol.* 2019, 4, 245-253 (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1394.6.4.3.3>