

طراحی بهینه کنترل کننده ولتاژ در تولیدهای پراکنده با مبدل واسط در عملکرد جزیره‌ای برای شرایط بار متعادل و نامتعادل

حسین شایقی^{1*}، بهروز صبحانی²

¹ دانشیار دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

hshayeghi@gmail.com

² دانشجوی دکتری برق دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

b.sobhany@gmail.com

چکیده: بیشتر تولیدهای پراکنده در شرایط اتصال به شبکه، با استفاده از واسطه‌های الکترونیک قدرت کنترل می‌شوند. در این شرایط، چون ولتاژ و فرکانس شبکه باعث تثبیت ولتاژ و فرکانس سمت تولید پراکنده می‌شود، به‌منظور کنترل بر روی توان اکتیو و راکتیو خروجی از کنترل کننده جریانی استفاده می‌شود. یکی از چالش‌های اساسی برای این تولیدها شرایط جزیره‌ای است. طبق استانداردهای موجود، شرایط جزیره‌ای باید در زمان کمتر از 2 ثانیه تشخیص داده شود و قطع گردد؛ اما اگر تولید پراکنده کنترل‌شده باشد، می‌تواند به‌عنوان یک منبع تغذیه بی‌وقفه مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله، برای طراحی بهینه کنترل کننده ولتاژ در شرایط جزیره‌ای، به‌ازای بار متعادل و نامتعادل، از الگوریتم اجتماع ذرات برای طراحی کنترل کننده استفاده می‌شود. در شرایط طراحی بار سیستم نامتعادل در نظر گرفته می‌شود و با کنترل کننده موجود در روش‌های قبلی ارائه شده مقایسه می‌گردد. همچنین این کنترل کننده بار دیگر توسط الگوریتم ژنتیک طراحی می‌گردد و نشان داده می‌شود که به‌ازای تغییرات بار روش پیشنهادی پاسخ مطلوب‌تری نسبت به کنترل کننده قبلی و همچنین الگوریتم ژنتیک دارد. نتایج مطالعات به‌ازای بارهای مختلف در حوزه زمان، جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: شرایط جزیره‌ای، کنترل تولیدهای پراکنده، الگوریتم اجتماع ذرات، طراحی کنترل کننده ولتاژ.

1. مقدمه

افزایش روزافزون قیمت انرژی فسیلی، نگرانی‌های زیاد در مورد نیروگاه‌های متمرکز و پیشرفت روزافزون تکنولوژی‌های مربوط به انرژی‌های نو، همگی از دلایلی هستند که باعث شده‌اند تا تعداد تولیدهای پراکنده متصل به شبکه، در سرتاسر جهان روزبه‌روز افزایش یابد؛ از جمله این تولیدهای پراکنده، فتوولتائیک، پیل سوختی، توربین‌های بادی و میکروتوربین‌ها هستند که بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]. بیشتر این تولیدهای پراکنده توسط مدارهای واسط الکترونیک قدرت که همان مبدل منبع ولتاژ است به شبکه متصل می‌شوند و در شرایط متصل به شبکه، توان اکتیو و راکتیو کنترل شده تحویل شبکه می‌دهند. در شرایط اتصال به شبکه این تولیدات با کنترل کننده جریانی کنترل می‌شوند؛ زیرا ولتاژ و فرکانس توسط شبکه به تولیدات پراکنده دیکته می‌شود [2]. اگر در این شرایط جریان کنترل شود، مانند این است که توان خروجی منابع تولید پراکنده کنترل شده است؛ اما بزرگ‌ترین مزیت این تولیدها آن است که علاوه بر کارکرد در شرایط متصل به شبکه، در حالت جدا از شبکه (جزیره‌ای) نیز بتواند به کار خود ادامه دهد و تولید توان کند و بارهای خود را تغذیه کند. عملکرد هماهنگ و کنترل تولیدهای پراکنده همراه با بار قابل کنترل و یک منبع ذخیره کننده انرژی مانند باتری یا خازن ساختار کلی ریزشبکه را تشکیل می‌دهد [3].

در صورتی که جزیره شامل بخشی از شبکه سراسری نباشد، در این زمینه تولید پراکنده (DG^1) مانند یک منبع بدون وقفه برای بار عمل می‌کند. چالش اصلی عملکرد یک DG با بار محلی در حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه این است که این تولید پراکنده باید به یک مبدل منبع ولتاژ قابل کنترل تجهیز شود که شرایط زیر را برآورده سازد:

- مبدل باید قادر باشد که ولتاژ و فرکانس شین اتصال ریزشبکه را در هر دو عملکرد ثابت نگه دارد.
 - مبدل منبع ولتاژ باید بدون در نظر گرفتن پارامترهای سیستم، بار از پیش تعیین شده را بتواند تغذیه کند.
 - کنترل VSC باید از روی پسخور از بار محلی باشد [4].
- در حالت متصل به شبکه، از استراتژی کنترل جریانی ابتدایی برای VSC^2 استفاده می‌شود که توان اکتیو و راکتیو را براساس مؤلفه جریانی dq تغییر می‌دهد [5]. کارهای قبلی بیشتر یک استراتژی کنترل

جریان dq برای واحدهای متعدد DG در حالت جزیره‌ای ریزشبکه، مبتنی بر نمودارهای افت توان راکتیو/ولتاژ و توان اکتیو/فرکانس، پیشنهاد داده‌اند. کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو برای مینیمم کردن حالت گذرا و نگهداری پایداری زاویه ولتاژ و کیفیت ولتاژ در مرجع [6] مورد توجه قرار گرفته است. مدل دینامیکی سیگنال کوچک و حالت گذرای ریزشبکه شامل تولیدات پراکنده با واسطه الکترونیکی در مراجع [7] و [8] بحث شده است. در این روش‌ها دینامیک بار به طور مستقیم در داخل مسیر کنترل کننده وارد نمی‌شود؛ بنابراین، این روش برای تغییرات سریع یا زیاد بار پاسخ دینامیکی ضعیفی خواهد داشت یا حتی ممکن است به ناپایداری ولتاژ و یا فرکانس بینجامد.

در مرجع [4]، یک کنترل کننده بر پایه روش کنترل کلاسیک بیان شده است. طراحی این کنترل کننده براساس روش خطی سازی سیستم بوده و طراحی آن نیز مستلزم این است که تابع تبدیل کل سیستم محاسبه شود. یک روش مقاوم در مرجع [9] برای کنترل فرکانس میکروتوربین و الکترولایزر³ در ریزشبکه پیشنهاد شده است. در این مطالعه، میکروتوربین به عنوان اصلی ترین تغذیه کننده توان بار محسوب می‌شود و الکترولایزر به عنوان جاذب توان از شبکه است که هیدروژن مورد نیاز برای تولید توان پیل سوختی را تأمین می‌کند. پارامترهای کنترل کننده نیز توسط الگوریتم جهش فوریابغه بهینه شده است. در مرجع [10] در ریزشبکه‌ها با ولتاژ پایین در مورد نگرانی‌های وجود ادوات تک فاز برای ماشین‌های الکتریکی بحث شده است که هدف ارائه راهکارایی برای بالابردن کارایی سیستم در شرایط جزیره‌ای بوده است. دو روش برای کنترل و آزمایش در این مقاله ارائه شده است که در اولی بدون وجود کابل ارتباطی و در دومی حل مسئله با استفاده از کنترل کننده مرکزی انجام شده است. برای پیاده سازی چنین روش‌هایی نیاز به یک بستر مخابراتی است که این کار را مشکل تر می‌کند. یک روش جدید با استفاده از ذخیره ساز مغناطیسی ابررسانا برای کنترل سیستم در شرایط جزیره‌ای در مرجع [11] پیشنهاد شده است. در شرایط اتصال به شبکه، نامتعادلی توان اکتیو مابین بار و تولید پراکنده توسط شبکه سراسری تأمین می‌شود. در این روش، از ابررسانا برای حل نامتعادلی توان مابین شبکه و ریزشبکه استفاده شده است. این روش هرچند از نظر تئوری ممکن است مناسب باشد، از لحاظ اجرایی ممکن است به مشکلات عمده‌ای برخورد کند که در حال حاضر اجرایی نباشد. در مرجع [12] سیستمی که شامل ریزشبکه به همراه بار

شبه‌سازی به‌ازای بارهای مختلف و تغییرات بار مختلف (متعادل و نامتعادل) در شرایط جزیره‌ای، در بخش 5 نشان داده شده است. همچنین نتایج شبه‌سازی با دو روش دیگر نیز مقایسه و نشان داده شده است که به‌ازای تغییرات بار روش پیشنهادی، پاسخ مطلوب‌تری نسبت به کنترل‌کننده قبلی و همچنین الگوریتم ژنتیک دارد. در بخش آخر نیز نتیجه‌گیری بیان شده است.

2. سیستم مورد مطالعه

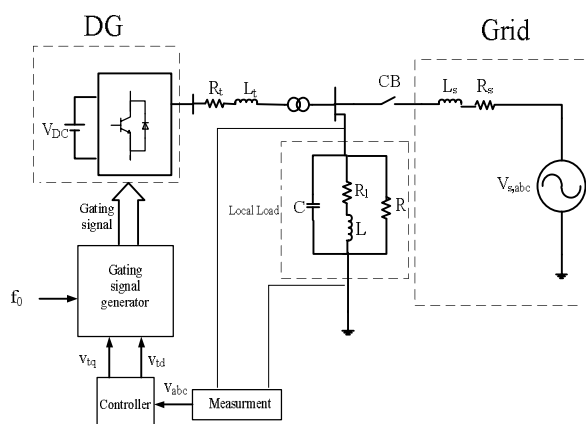
دیگرام تک‌خطی سیستم مورد مطالعه در شکل (1) نمایش داده شده است. تولید پراکنده در اینجا توسط یک منبع DC ثابت که توسط مبدل الکترونیک قدرت با یک فیلتر پایین‌گذر و یک ترانسفورماتور افزایشده به شبکه سراسری و بار محلی متصل شده، نشان داده شده است. مقاومت و امپدانس مربوط به خط توسط R_t و L_t در شکل نمایش داده شده است. پارامترهای این سیستم در جدول (1) بیان شده است.

سیستم باید بتواند در هر دو حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه (جزیره‌ای)، بار خود را تغذیه کند. در شرایطی که سیستم به شبکه اتصال یافته است، مبدل میانی به عنوان یک کنترل‌کننده جریان منبع ولتاژ (استراتژی کنترل‌کننده جریانی dq معمولی) برای تولید پراکنده عمل می‌کند. ابتدا حالت جزیره‌ای براساس [16] در زمان مشخص تشخیص داده می‌شود و سپس کنترل‌کننده پیشنهادی بهینه وارد عمل می‌گردد.

محلی است، برای عملکرد قابل قبول سیستم، هم در شرایط جزیره‌ای و هم متصل به شبکه، از یک روش مقاوم برای طراحی کنترل‌کننده استفاده شده است. برای طراحی کنترل‌کننده از تئوری کریتونو¹ در شرایط جزیره‌ای استفاده شده است که شامل یک اوسیلاتور به همراه یک کنترل‌کننده PI² برای پایداری ولتاژ است که با استفاده از قضیه کریتونو تنظیم شده است. برای تنظیم کنترل‌کننده PI رگولاتور ولتاژ نیز از روش پایداری استفاده شده است. مرجع [13] مطالعه بررسی حالت گذرای مربوط به میکروتوربین با حضور توربین بادی در حین شرایط جزیره‌ای را انجام داده و کنترل‌کننده‌ای برای کنترل زاویه پره توربین‌های بادی برای جلوگیری از نوسانات ولتاژ و فرکانس که در نتیجه نوسانات باد است، پیشنهاد شده است. این کنترل‌کننده براساس کنترل‌کننده فازی است که در حین جزیره‌ای طوری تغییر می‌کند که کمترین نوسان از باد به شبکه انتقال پیدا کند؛ اما برای این روش نیز تعیین توابع عضویت و قواعد پایه، خود مشکل بوده و براساس روش سعی - خطا بیان شده است.

با توجه به اینکه ساختار در این گونه سیستم‌ها کاملاً غیرخطی است و دینامیک آن همواره در حال تغییر است، به‌نظر می‌رسد که انتخاب روشی که مبتنی بر کنترل سیستم‌های غیر خطی بوده و در برابر این تغییرات دینامیک بتواند پاسخگو باشد، مناسب‌تر است. در این مقاله، از الگوریتم اجتماع ذرات PSO³ [14] برای طراحی یک کنترل‌کننده پس-پیش‌فاز، به‌منظور کنترل اینورتر تولید پراکنده در شرایط تغذیه، بار محلی متعادل و نامتعادل پیشنهاد می‌شود. در شرایط متصل به شبکه، توان اکتیو و راکتیو انتقالی از طریق تولید پراکنده با کنترل اینورتر از طریق کنترل‌کننده جریان dq کنترل می‌شود. هنگامی که حالت جزیره‌ای اتفاق می‌افتد، کنترل‌کننده قبلی از سیستم خارج می‌شود و کنترل‌کننده پیشنهادی فعال می‌گردد. هدف اصلی در این بخش، استفاده از روش PSO برای رسیدن به یک کنترل‌کننده مناسب و بهینه، به‌منظور کنترل تولید پراکنده برای حالت‌های مختلف بار، از جمله نامتعادلی است.

سیستم مورد مطالعه، سیستم استاندارد مرجع [15] است که در بخش بعدی مقاله بررسی خواهد شد. در بخش 3 الگوریتم PSO به‌اختصار توضیح داده شده و نحوه به‌کارگیری آن برای پیشنهاد الگوریتم مورد نظر، در قسمت 4 توضیح داده شده است. نتایج



شکل (1): سیستم مورد مطالعه شامل تولید پراکنده - شبکه سراسری - بار محلی

1. Kharitonov
2. Proportional-Integrator
3. Particle Swarm Optimization

3. الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات

تئوری اجتماع ذرات یک روش الهام گرفته از طبیعت است که در سال 1995 توسط ابرهارت و کندی معرفی شد [17]. در این الگوریتم، در ابتدا یک جمعیتی تصادفی از نقاط تشکیل می شود. با حرکت این ذرات در ناحیه حل ممکن، بهترین نقطه برای تابع هدف تعیین می شود. مسیر حرکت ذرات در هر مرحله به تجربه خود ذره و تجربه ذرات دیگر وابسته است. اگر x و v به ترتیب موقعیت ذره و بردار ذره در فضای جست و جو فرض شود، موقعیت ذره n ام در یک فضای جست و جوی d بعدی به وسیله بردار $X_n = [X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nd}]$ نشان داده می شود.

موقعیت هر ذره در مرحله بعدی تغییر می کند و به یک موقعیت جدید می رسد. بهترین موقعیتی که ذره n ام تاکنون در آن قرار گرفته و تابع هدف در آن، کمترین مقدار را نسبت به موقعیت های دیگر دارد، در $Pbest_n$ ذخیره می گردد و بهترین حرکت ذره شناخته می شود. از طرفی، مقایسه موقعیت در بین کل ذرات نیز انجام می گیرد و باهم مقایسه می شوند. هر یک از این مقادیر، تابع هدف را نسبت به بقیه کمینه تر کند، این موقعیت نیز در $gbest$ ذخیره می گردد بردار بعدی که ذره انجام می دهد، به موقعیت قبلی همان ذره و فاصله آن از مقدار $Pbest$ خود ذره و نیز به فاصله ذره از مقدار $gbest$ وابسته است. رابطه حرکت ذرات در معادله (1) آمده است و به صورت برداری در شکل (2) رسم شده است.

$$v_{nd}^{i+1} = \omega \times v_{nd}^i + c_1 \times rand() \times (Pbest_{nd} - x_{nd}^i) + c_2 \times rand() \times (gbest - x_{nd}^i)$$

$$x_{nd}^{i+1} = x_{nd}^i + cv_{nd}^{i+1} \quad (1)$$

$$|v_{nd}^{i+1}| \leq v_{max}$$

در این رابطه v_{nd}^i ، v_{nd}^{i+1} بترتیب سرعت ذره در تکرار i و $i+1$ ، x_{nd}^i ، x_{nd}^{i+1} بترتیب مکان ذره در تکرار i و $i+1$ یک مقدار اتفاقی، ثابت های c_1 و c_2 نشان دهنده سرعت یادگیری ذرات یا کشیدن هر ذره به طرف موقعیت های $gbest$ و $Pbest$ است. تابع وزنی ω نیز که در معادله (1) استفاده شده است، به صورت زیر تعریف می شود:

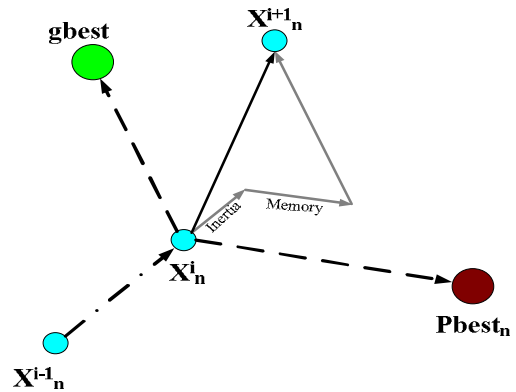
$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (2)$$

هنگامی که کلید CB نشان داده شده در شکل (1) باز می شود، شرایط جزیره به وجود آمده و واحد تولید پراکنده به صورت جدا از شبکه، بار محلی خود را تغذیه می کند. در لحظه باز شدن کلید بسته به اینکه مقدار بار چقدر باشد، ولتاژ و فرکانس شبکه می تواند افزایش یا کاهش یابد و رو به سمت ناپایداری برود. تنها در صورت بار نامی ولتاژ و فرکانس شبکه تغییر نخواهد کرد که آن هم در صورت تغییر بار در شرایط جزیره ای ممکن است باز به سوی ناپایداری برود؛ بنابراین، این یک ضرورت است که در لحظه جزیره ای، حالت جزیره ای تشخیص داده شود و کنترل کننده پیشنهادی وارد عمل گردد و ولتاژ و فرکانس را به شرایط پایدار برگرداند. در بخش بعدی، استراتژی کنترل کننده پیشنهادی بیان می شود. در این مقاله، فرض شده است که تشخیص جزیره ای همان روش استفاده شده در مرجع [16] است در این روش تشخیص جزیره ای، سیگنال نرخ تغییرات توان اکتیو در هر لحظه از زمان اندازه گیری می شود. بازه اندازه گیری برای این روش از روی ثابت زمانی سیستم تعیین می گردد. سیگنال های اندازه گیری به یک سیستم عصبی - فازی که قبلاً آموزش داده شده است، اعمال می شود. از روی نتایج خروجی این سیستم می توان شرایط عملکرد عادی و شرایط جزیره ای را تشخیص داد.

جدول (1): مقادیر پارامترهای مربوط به تولید پراکنده - بار محلی و شبکه

Parameter	Value
R	76.176 Ω
L	111.9 mH
C	62.855 μ F
Rs	1 Ω
Ls	10 mH
Rt	1.5 m Ω
Lt	300 μ H
VSC rated power	2.5 MW
PWM carrier frequency	1,980 HZ
f0	60 HZ
VSC terminal voltage	600 V
Nominal grid frequency	60 HZ
DC voltage	1500 V
Nominal grid Line-Line voltage	13.8 kV (rms)
Transformer voltage ratio	0.6/13.8 kV
Transformer rated power	2.5 MW

که ω_{\max} و ω_{\min} مقادیر وزنی ماکزیمم و مینیمم بوده که مقادیر ثابتی دارند.



شکل (2): نمودار برداری الگوریتم PSO و نحوه تغییرات ذرات

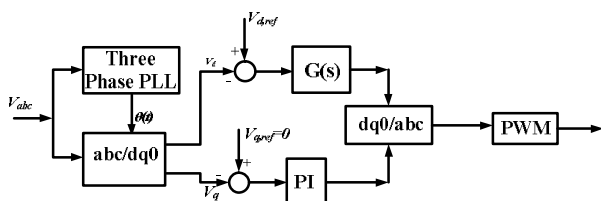
4. طراحی کنترل کننده با الگوریتم پیشنهادی

با توسعه روزافزون در سیستم‌های کنترل و نیز کاربردی کردن این کنترلرها، در سیستم‌های قدرت هنوز کنترلرهای ساده، کنترلرهای مطلوب به‌شمار می‌آیند [14]؛ زیرا اجرای این کنترل‌کننده‌ها بسیار راحت است و نیز در نقاط وسیعی از عملکرد سیستم، کارایی بالایی دارد. همچنین به‌راحتی در سیستم‌های آنالوگ و دیجیتال قابل پیاده‌سازی هستند. در این مطالعه، کنترل‌کننده پس-پیش‌فاز برای کنترل یک تولید پراکنده که توسط اینورتر به شبکه متصل شده است، در شرایط جزیره‌ای و برای انواع بارها از جمله بار نامتعادل پیشنهاد می‌شود. شماتیک کلی این کنترل‌کننده در شکل (3) آمده است. در این استراتژی، ابتدا ولتاژ بار اندازه‌گیری و سپس به حوزه dq انتقال داده می‌شود. از تخمینگر فاز برای به‌دست‌آوردن مرجع زاویه در تبدیل abc/dq مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل 3). زاویه بار در این مطالعه به‌عنوان ولتاژ مرجع به حساب می‌آید؛ پس مؤلفه q با یک کنترل‌کننده PI به مقدار صفر تنظیم می‌شود و مؤلفه d به مقدار پیک آن باید برسد؛ پس باید مطابق شکل (3) با یک مقدار ولتاژ مرجع $V_{d,ref}$ مقایسه می‌شود. سیگنال خطای به‌دست‌آمده وارد کنترل‌کننده می‌شود و خروجی کنترل‌کننده V_{td} به همراه سیگنال V_{tq} وارد تولیدکننده سیگنال کنترل برای مدارات واسط می‌گردد. تابع تبدیل $G(s)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G(s) = K \frac{(1 + sT_1)(1 + sT_3)}{(1 + sT_2)(1 + sT_4)} \quad (3)$$

این کنترل‌کننده جبرانگر دینامیکی است که شامل دو بلوک کنترل‌کننده پس-پیش‌فاز به همراه یک بهره است. پارامترهای قابل تنظیم در آن، شامل ضریب K و ضرایب زمانی $T1-T4$ می‌باشد. از مزایای این کنترل‌کننده آن است که ساختار ثابت دارد و به‌وفور در صنعت استفاده می‌شود. همچنین پیاده‌سازی آن در کاربردهای عملی آسان بوده و خصوصیات کنترل‌کننده‌های پیش‌فاز یا مشتق‌گیر در بهبود کاهش فراجهدش و افزایش سرعت سیستم و کنترل‌کننده پس‌فاز یا انتگرال‌گیر در کاهش خطای ماندگار را داراست. علاوه بر آن، باید توجه داشت که کنترل‌کننده مرجع [4] استفاده از نوشتن معادلات ریاضی در حوزه $dq0$ برای سیستم طراحی شده است؛ ولی ایراد بزرگ این روش آن است که باید بار متعادل و سیستم کلیدزنی خطی در نظر گرفته شود تا بتوان معادلات حالت را برای سیستم نوشت و از روی آن، کنترل‌کننده را طراحی کرد. همچنین طراحی نیز در روش ذکر شده براساس آزمون و خطا بوده است؛ اما روش پیشنهادی نواقص روش فوق را رفع کرده و توانسته است در شرایط نامتعادل برای سیستم کنترل‌کننده‌ای با ساختار ثابت طراحی کند. این امر ضروری به نظر می‌رسد؛ زیرا در شبکه توزیع، همواره نامتعادلی وجود خواهد داشت. خود سیستم نیز در این روش غیرخطی فرض شده و این به واقعیات نزدیک‌تر است. همچنین به‌جای روش طراحی آزمون و خطا با استفاده از یک الگوریتم هوشمند طراحی کنترل‌کننده انجام گرفته است.

باید توجه داشت که خطای حالت ماندگار سیستم و نیز شرایط گذرای سیستم به تعیین پارامترهای کنترل‌کننده وابسته است. برای تنظیم پارامترهای کنترل پیشنهادی به مقادیر بهینه آن‌ها در شرایط جزیره‌ای و در بدترین شرایط ممکن بار، الگوریتم اجتماع ذرات پیشنهاد می‌شود. شرایط وخیم بار در اینجا به‌صورت نامتعادل در نظر گرفته شده است. توان اکتیو فازها در شکل (4) نشان داده شده است.



شکل (3): بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پیشنهادی به‌منظور کنترل تولید

پراکنده در شرایط جزیره‌ای

$$K^{\min} \leq K \leq K^{\max}$$

$$T_1^{\min} \leq T_1 \leq T_1^{\max}$$

$$T_2^{\min} \leq T_2 \leq T_2^{\max}$$

$$T_3^{\min} \leq T_3 \leq T_3^{\max}$$

$$T_4^{\min} \leq T_4 \leq T_4^{\max}$$

(5)

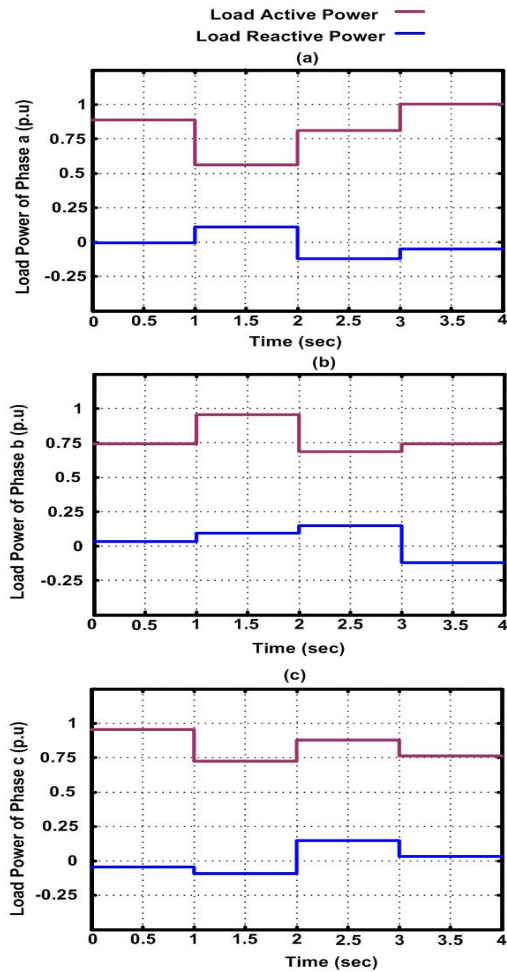
که در آن، K در بازه $[100 \ 0/01]$ و هر یک از ثوابت زمانی T_1 تا T_4 در بازه $[4 \ 0/001]$ است. با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات مسئله بهینه‌سازی مطرح شده و مقادیر به شکل زیر به دست می‌آید.

در این مسئله، بهینه‌سازی تعداد ذرات، بعد ذرات، تعداد تکرار، $C1$ ، $C2$ و C به ترتیب 35 ، 5 ، 50 ، 2 ، $1/75$ و $1/1$ انتخاب شده است. ضریب وزنی ω از $0/2$ تا $0/9$ به صورت خطی تغییر می‌کند. پس از جبرانگر تعیین می‌شود. این مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک نیز حل شده و نتایج آن‌ها با هر سه کنترل کننده (کنترل کننده مرجع [4]، کنترل کننده الگوریتم ژنتیک و کنترل کننده اجتماع ذرات) در جدول (2) آمده است.

جدول (2): ضرایب روش‌های مختلف برای کنترل کننده پس-پیش فاز

کنترل کننده	K	T_1	T_2	T_3	T_4
مرجع [4]	4000	-----	بینهایت	-----	0/01
الگوریتم ژنتیک	84/07	0/01281	2/12	0/0104	0/0112
اجتماع ذرات	78/15	0/01221	1/51	0/0115	0/00955

پاسخ فرکانسی سیستم برای شرایط متعادل بار و در شرایط جزیره‌ای با استفاده از کنترل پیشنهادی، کنترل کننده براساس الگوریتم ژنتیک و کنترل کننده مرجع [4] نیز در شکل زیر نشان داده شده است. (برای مقادیر بار نامی که در جدول (1) آمده است). مقایسه حد فاز و حد بهره با استفاده از هر سه الگوریتم نیز در جدول (3) آمده است. با توجه به شکل (5) حد بهره و حد فاز با استفاده از کنترل کننده مرجع [4] به ترتیب $3/6785$ و $58/2314$ بوده است که با کنترل کننده طراحی شده توسط الگوریتم ژنتیک حد بهره بی‌نهایت شده و حد فاز به $102/0037$ رسیده است و نیز با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، این مقدار به $108/4454$ افزایش یافته است.



شکل (4): شرایط بد بار نامتعادل در شرایط جزیره‌ای

انتخاب یک تابع هدف مهم‌ترین بخش این مسئله بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهد؛ زیرا انتخاب توابع هدف مختلف ممکن است نحوه حرکات ذرات را کاملاً تغییر دهد. در مسئله بهینه‌سازی مورد نظر در اینجا ما از مجموع حاصل ضرب زمان در سیگنال خطا (ITAE) استفاده می‌کنیم.

$$J = \int_0^{t=tsim} t |v_d - v_{d.ref}| dt \quad (4)$$

که در آن، v_d و $v_{d.ref}$ بترتیب ولتاژ محور d و ولتاژ مرجع، $tsim$ مدت زمان شبیه‌سازی است که تابع هدف در این زمان محاسبه می‌شود. یادآور می‌شویم که هر چه این تابع هدف مقدار کمی داشته باشد، در این صورت، جواب بهینه‌تر است. هر مسئله بهینه‌سازی تحت تعدادی از قیود بهینه‌سازی می‌شود. در این مسئله، قیود به صورت زیر بیان می‌گردد.

5. نتایج شبیه سازی

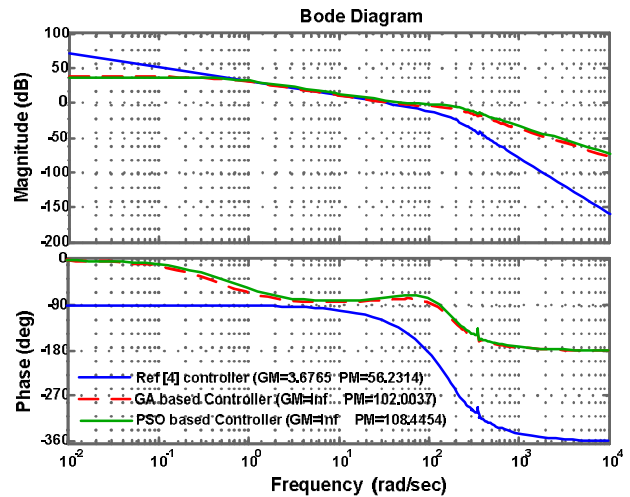
نتایج شبیه سازی در شرایط مختلف بارها (متعادل - نامتعادل) انجام گرفته و با نتایج به دست آمده با کنترل کننده پیشنهادی در [4] نیز مقایسه شده است. در هر دو حالت، ابتدا تولید پراکنده توسط کنترل کننده جریانی کنترل شده و پس از جزیره ای شدن، کنترل کننده پیشنهادی وارد عمل می شود و سیستم را کنترل می کند. برای تشخیص شرایط جزیره ای از روش ارائه در مرجع [16] استفاده شده است.

1.5. بار نامی

در این آزمایش، مقدار بار (مقاومت و سلف و خازن) به مقادیر نامی جدول (1) تنظیم شده است. در ابتدا سیستم در حالت اتصال به شبکه کار می کند و در ثانیه 1 کلید CB عمل می کند و باز می گردد و سیستم از شبکه سراسری جدا می شود و جزیره ای اتفاق می افتد. در ثانیه 1/08 شرایط جزیره ای تشخیص داده شده و کنترل کننده جریانی از مدار خارج و کنترل کننده پیشنهادی وارد عمل می شود. شکل (a-7) و شکل (b-7) نشان دهنده شکل موج های ولتاژ و جریان فاز a با کنترل کننده مرجع [4] است. شکل (c-7) و شکل (d-7) شکل موج های ولتاژ و جریان فاز a بار با کنترل کننده پیشنهادی را نشان می دهد. کاملاً واضح است که در حالت بار نامی، شکل موج های ولتاژ و جریان تقریباً هیچ حالت گذرابی نخواهند داشت. همان طور که از مقایسه نمودارهای شکل (7) نیز آشکار است، در این حالت از شبکه، این دو کنترل کننده تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

2.5. بار غیر نامی

در آزمایش بار غیر نامی، مقادیر بار محلی به گونه ای باید باشد که توان راکتیو و اکتیو بین شبکه سراسری و تولید پراکنده زیاد باشد. به این منظور فرض می شود که در حالت اتصال به شبکه، شبکه توان اکتیو 950 کیلووات (0/38 p.u.) را از تولید پراکنده جذب می کند و نیز توان راکتیو 400 کیلووار (0/016 p.u) را از بار می کشد. پارامترهای تک فاز بار در این حالت، در شکل (8) نشان داده شده است (کلید Sa باز است). در این شرایط از شبکه، در ثانیه 1/2 حالت جزیره ای اتفاق می افتد و پس از مدت زمان 0/01 ثانیه، در ثانیه 1/21 این حالت تشخیص داده می شود و کنترل کننده پیشنهادی وارد عمل می شود.

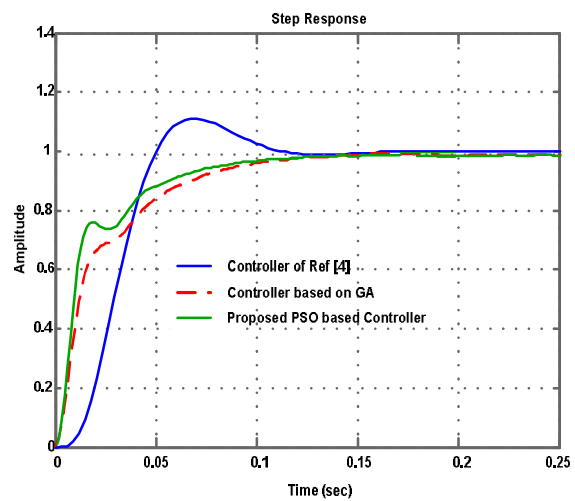


شکل (5): پاسخ فرکانسی سیستم مورد مطالعه با سه کنترل کننده مختلف

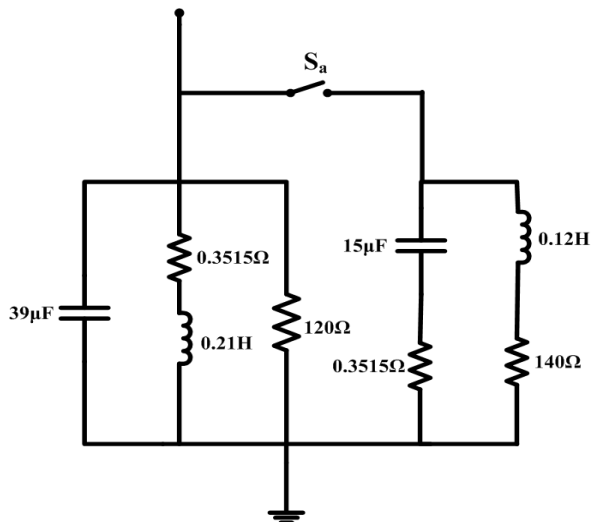
جدول (3): حد فاز و حد بهره با کنترل کننده های مورد مطالعه

کنترل کننده	حد فاز	حد بهره
مرجع [4]	56/2316	3/6765
الگوریتم ژنتیک	102/0037	بینهایت
اجتماع ذرات	108/4454	بینهایت

در شکل (6) نیز پاسخ پله سیستم در شرایط جزیره ای با هر سه کنترل کننده نشان داده شده است. از روی این شکل مشخص است که کنترل کننده پیشنهادی سریع ترین پاسخ بدون نوسان را از بین کنترل کننده های موجود دارد.



شکل (6): پاسخ پله سیستم مورد مطالعه با سه کنترل کننده مختلف

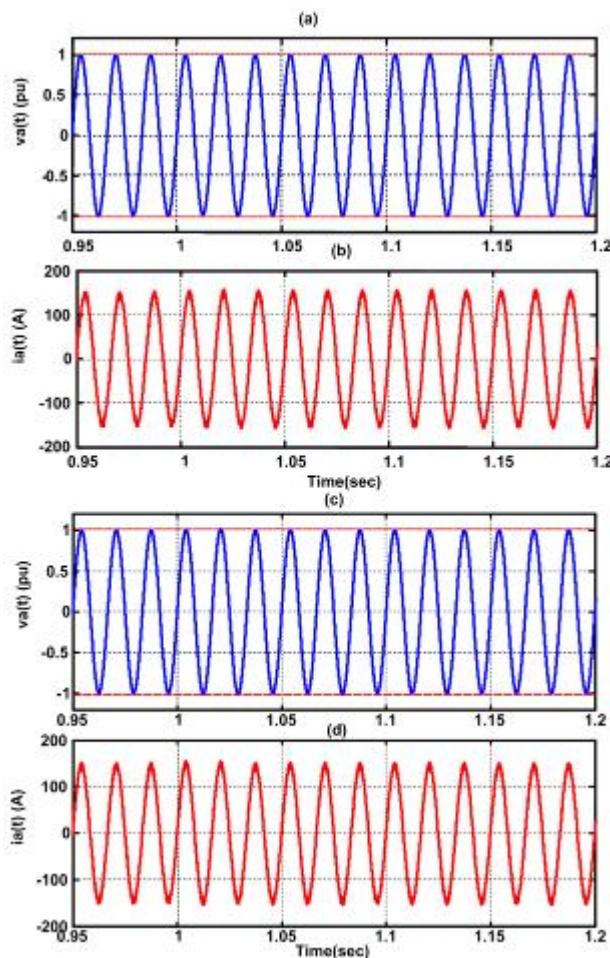


شکل (8): دیاگرام تک خطی بار محلی در شرایط بار غیرنامی

3.5. تغییرات بار در حالت جزیره‌ای

در این بخش، سیستم در حالت جزیره کار می‌کند و یک دفعه در ثانیه $1/5$ ، مقداری بار به شبکه اضافه می‌شود. مشخصات این بار در شکل (8) آمده است که تا ثانیه $1/5$ کلید S_a باز است و در ثانیه $1/5$ کلید بسته شده و مقداری بار با مشخصات نشان داده شده به شبکه اضافه می‌شود. شکل (11) نتایج کنترل کننده پیشنهادی را در مقایسه با کنترل کننده مرجع [4] به این تغییرات بار نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که این سیستم با کنترل کننده مرجع [4] پاسخ گذرای زیادی دارد و تقریباً پس از 5 سیکل، به حالت ماندگار می‌رسد و به این تغییرات بار پاسخ می‌دهد (شکل 11-a و b)؛ اما شکل (11-c و d) نتایج مربوط به کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. این پاسخ نسبت به پاسخ مربوط به مرجع [4] بسیار بهتر شده است. پس از سوئیچ بار ولتاژ یک تغییر اندکی داشته است که آن هم پس از یک سیکل به حالت ماندگار رسیده است. مقایسه در این حالت، از شبکه نیز عملکرد بهتر کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. شکل (12) نیز مؤلفه d سیگنال ولتاژ را برای سه کنترل کننده (کنترل کننده مرجع [4]، کنترل کننده الگوریتم ژنتیک و کنترل کننده اجتماع ذرات) نمایش می‌دهد. در این شکل، قدرت کنترل کننده پیشنهادی در مقدار فراجش، زمان نشست و نوسانات بیشتر مشخص می‌شود.

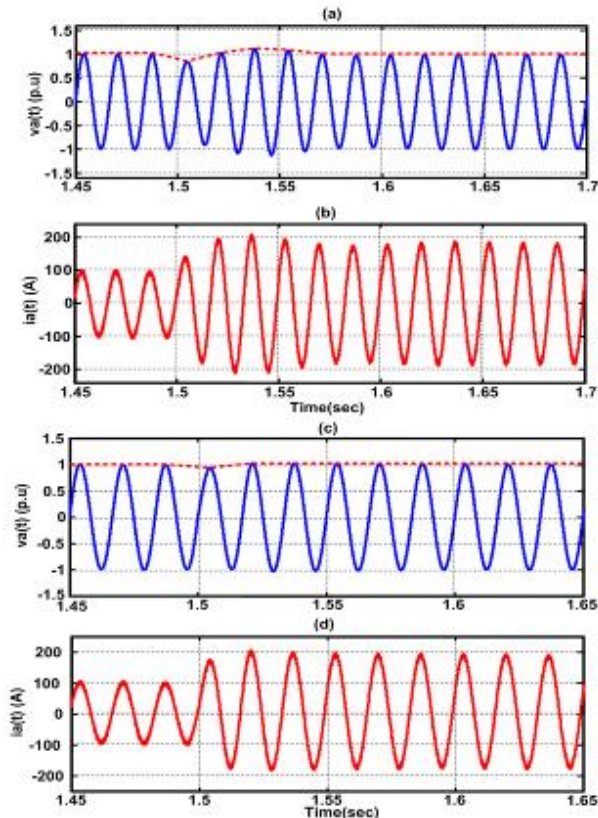
نتایج این حالت با کنترل کننده مرجع [4] در شکل (9-a و b) و با استفاده از کنترل پیشنهادی در شکل (9-c و d) آمده است.



شکل (7): نتایج به دست آمده برای ولتاژ و جریان بار با کنترل کننده مرجع [4] (a و b) و کنترل کننده پیشنهادی (c و d)

از روی نتایج شکل (9) واضح است که پس از جزیره‌ای ولتاژ بار به شدت افزایش پیدا کرده و پس از آن، کنترل کننده مربوط به [4] وارد عمل می‌شود و ولتاژ را برمی‌گرداند، ولتاژ به صورت کامل پس از 4 سیکل به مقدار نامی خود (1 p.u.) برگشته است. اما با دقت به نتایج کنترل کننده پیشنهادی شکل (9-c و d) به وضوح دیده می‌شود که ولتاژ در این حالت، پس از 2 سیکل برگشته است و مقدار آن در یک پریونیت تثبیت شده است. شکل (10) نیز مؤلفه d سیگنال ولتاژ بار را با کنترل کننده مرجع [4]، کنترل کننده الگوریتم ژنتیک و کنترل کننده پیشنهادی نمایش می‌دهد. این شکل موج‌ها قدرت عملکرد و کارایی کنترل کننده پیشنهادی را نسبت به کنترل کننده مرجع [4] و کنترل کننده الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد.

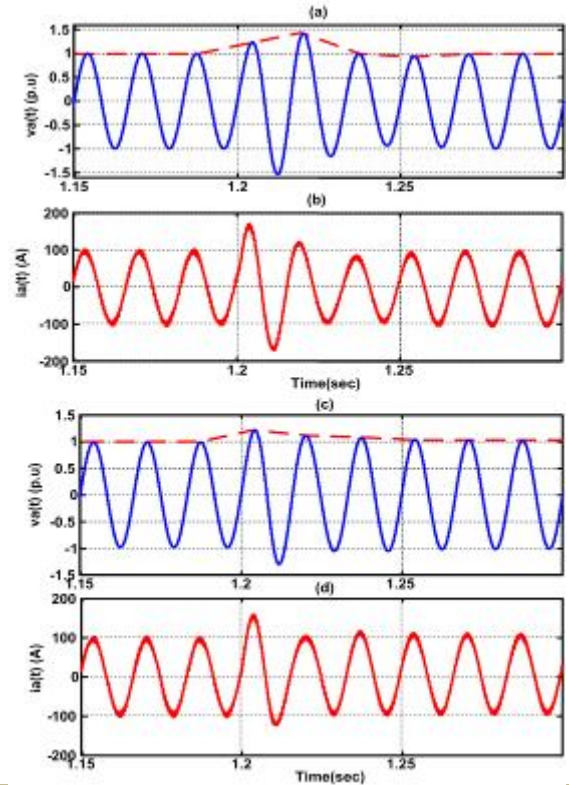
برای کنترل‌کننده پیشنهادی در شکل (13- c و d) در ثانیه $t=1/8$ نشان داده شده است. مقدار بار در این حالت، به مقادیر نامی آن‌ها که در جدول (1) آمده، تنظیم شده است. با توجه به این نتایج، واضح است که در این حالت نیز، کنترل‌کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده قبلی، خیلی سریع به این حالت پاسخ داده است. ولتاژ خروجی در کمتر از 1 سیکل به $0/82 \text{ p.u}$ افت کرده است.



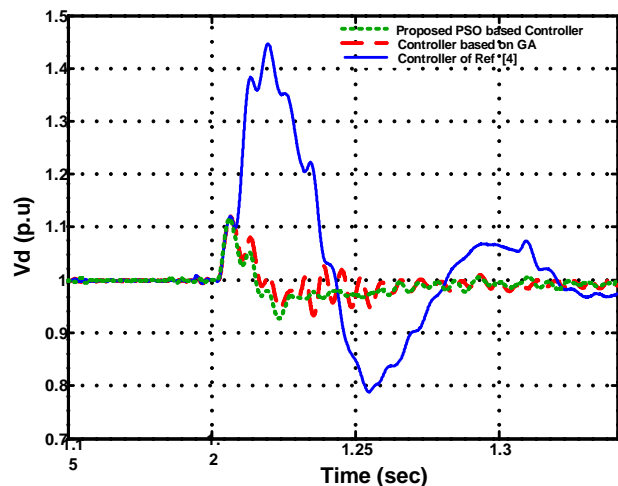
شکل (11): نتایج به دست آمده برای ولتاژ و جریان بار با کنترل‌کننده مرجع [4] (a و b) و کنترل‌کننده پیشنهادی (c و d)

4.5. بار نامتعادل

در این بخش از مطالعات، بار نامتعادل مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی برای بارهای نامتعادل، این آزمایش برای سه شرایط مختلف ناتعادلی تک‌فاز، دو فاز و سه فاز انجام گرفته است. فرض می‌شود سیستم در شرایط کم باری کار می‌کند و بار کاملاً متعادل است. در ثانیه 1 یک بار تک‌فاز به قدرت 290 کیلووات مطابق شکل (13) با بسته شدن کلید Sa به فاز a سیستم اضافه می‌شود. نتایج ولتاژ و جریان سه فاز در شکل (14) نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که کنترل‌کننده



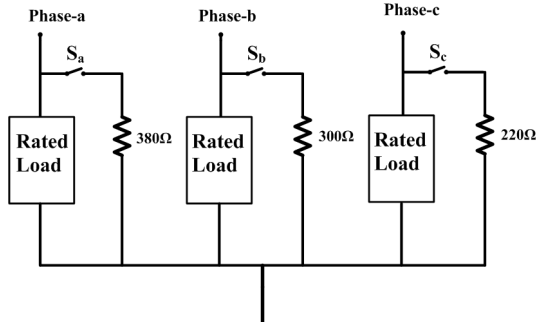
شکل (9): نتایج به دست آمده برای ولتاژ و جریان بار با کنترل‌کننده مرجع [4] (a و b) و کنترل‌کننده پیشنهادی (c و d)



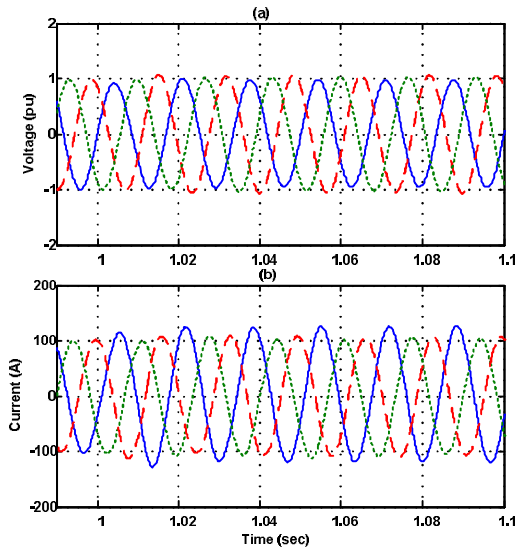
شکل (10): مؤلفه‌های d ولتاژ بار در حوزه dq0 مربوط به کنترل‌کننده [4]. کنترل‌کننده الگوریتم ژنتیک و الگوریتم پیشنهادی در بار غیرنامی

4.5. تغییرات مرجع ولتاژ

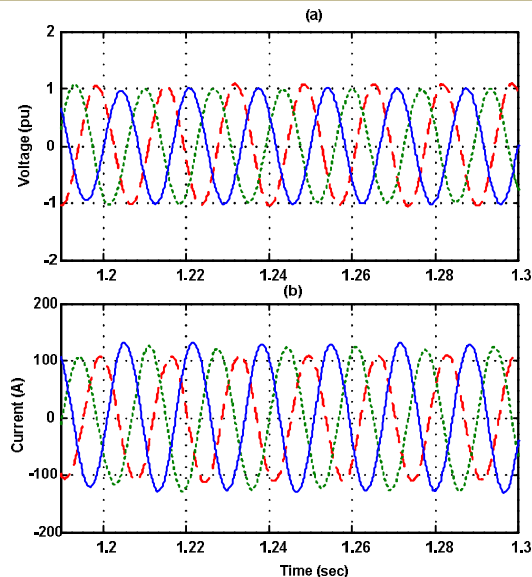
در این آزمایش، سیستم در حالت جزیره کار می‌کند و مرجع ولتاژ نیز تغییر می‌یابد. پاسخ سیستم به این شرایط با هر دو کنترل‌کننده در شکل (13) نمایش داده شده است. پاسخ سیستم برای کاهش مرجع ولتاژ از 1 p.u به $0/82 \text{ p.u}$ با کنترل‌کننده مرجع [4] در شکل (13- a و b) و



شکل (13): بار سه فاز در شرایط نامتعادل

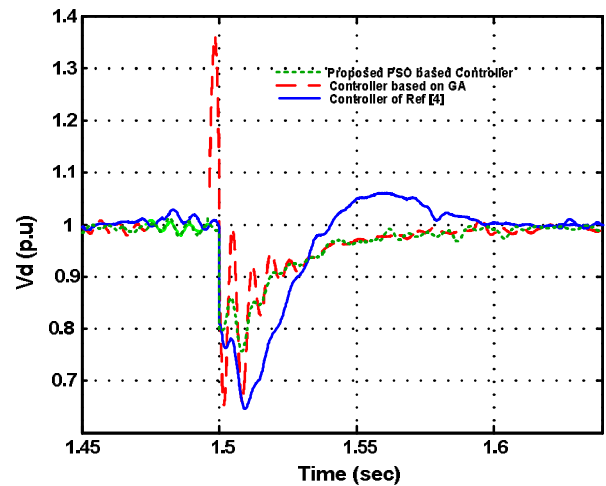


شکل (14): نتایج سیستم برای نامتعادلی تک فاز a ولتاژ سه فاز b جریان سه فاز بار



شکل (15): نتایج سیستم برای نامتعادلی دو فاز a ولتاژ سه فاز b جریان سه فاز بار

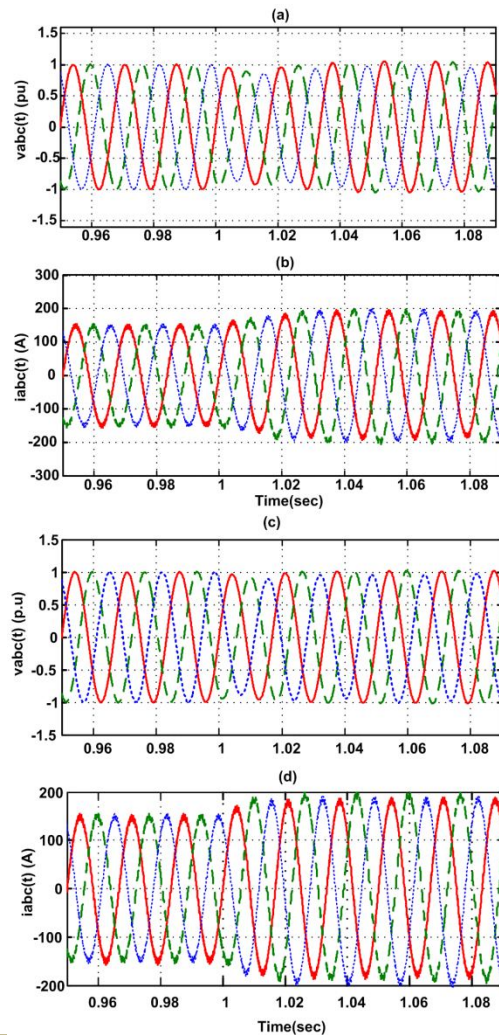
پیشنهادی توانسته است تثبیت ولتاژ را در حد مطلوبی انجام دهد. در ثانیه 1/2 نیز یک بار تک فاز دیگر به قدرت 220 کیلووات با بسته شدن کلید Sb در شکل (13)، به فاز b اضافه می شود. نتایج به ازای این شرایط نیز در شکل (15) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، کارایی کنترل کننده پیشنهادی بیشتر آشکار می شود. برای بهتر نشان دادن عملکرد سیستم، زمانی که بار نامتعادل است، یک بار تک فاز دیگر به قدرت 150 کیلووات با بسته شدن کلید Sc در شکل (13) به فاز c افزوده شده است. پاسخ دینامیکی به این بار با استفاده از هر دو کنترل کننده در شکل (16) نشان داده شده است. شکل (a-16) و (b) پاسخ دینامیکی سیستم با کنترل کننده بیان شده در [4] را نشان می دهد که شکل (a-16) ولتاژ خروجی فازهای a، b، c و شکل (b-16) جریان های خروجی فازهای a، b، c را نمایش می دهند. در شکل (c-16) و (d) نیز پاسخ دینامیکی سیستم با کنترل کننده پیشنهادی آمده است که به ترتیب، نشان دهنده ولتاژ خروجی سه فاز جریان خروجی سه فاز است. با مقایسه این شکل موجها دیده می شود که خروجی به ازای کنترل کننده پیشنهادی بهتر از پاسخ کنترل کننده مرجع [4] است؛ یعنی مقدار اندازه افت ولتاژ کمتر بوده و زمان نشست نیز با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی پایین است.



شکل (12): مؤلفه های d ولتاژ بار در حوزه dq0 مربوط به کنترل کننده مرجع [4]، کنترل کننده الگوریتم ژنتیک و الگوریتم پیشنهادی در تغییرات بار

6. نتیجه گیری

در شرایط ایجاد جزیره‌ای در تولیدهای پراکنده، کنترل‌کننده‌های جریانی باید از مدار خارج شوند؛ زیرا در این حالت، هدف اصلی کنترل ولتاژ و فرکانس این تولیدها است؛ لذا در این مقاله، یک کنترل‌کننده جدید براساس الگوریتم اجتماع پرندگان و کنترل‌کننده پس-پیش‌فاز برای کنترل تولید پراکنده که توسط مبدل به شبکه اتصال می‌گردد، پیشنهاد می‌شود. دلیل انتخاب این کنترل‌کننده، پیاده‌سازی ساده و کارایی بیشتر آن نسبت به کنترل‌کننده‌های قبلی است. از الگوریتم اجتماع ذرات نیز برای تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده در شرایط تغییرات بار نامتعادل استفاده شد تا بهینه‌ترین حالت ممکن را برای بار نامتعادل داشته باشد. در حل این مسئله، ابتدا مسئله به یک مسئله بهینه‌سازی که تابع هدف آن در حوزه زمان تعریف گردید، تبدیل شد و سپس مسئله با استفاده از الگوریتم اجتماع پرندگان حل گردید. کنترل‌کننده پیشنهادی توانست که حالت گذرای ولتاژ و جریان را در شرایط جزیره‌ای بهبود بخشد. این نتایج با مطالعات شبیه‌سازی سیستم در حوزه زمان و در نرم‌افزار متلب (MATLAB)، تحت حالت‌های مختلف بار روی سیستم نمونه استاندارد کاملاً مشهود است.



شکل (16): نتایج سیستم با استفاده از کنترل پیشنهادی و مرجع [4] برای ناعادلی سه فاز a و b ولتاژ و جریان سه فاز با کنترل مرجع [4] c و d ولتاژ و جریان سه فاز با کنترل پیشنهادی

مراجع

- [1] Nikkhajoei, H., Robert, H. L. "Distributed Generation Interface to the CERTS Microgrid", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp.1598-1608, July 2009.
- [2] Nikkhajoei, H., Irvani, R., "Steady-State Model and Power Flow Analysis of Electronically-Coupled Distributed Resource Units", Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 721-728, 2007.
- [3] Sao, CK., Lehn, P.W., "Control and Power Management of Converter Fed Microgrids", IEEE Trans. on Power Systems; Vol. 23, No. 3, pp. 1088-1098, 2008.
- [4] Karimi, H., Nikkhajoei, H., Irvani, R., "Control of an Electronically-Coupled Distributed Resource Unit Subsequent to an Islanding Event", IEEE Trans. Power Del, Vol. 23, No. 1, pp.493-501, 2008.
- [5] Chen, C.L., Wang, Y., Lai, J.S., Lee, Y. S., Martin, D., "Design of Parallel Inverters for Smooth Mode Transfer Microgrid Applications", IEEE Trans. Power Electron, Vol 25, No. 1, pp. 6-15.
- [6] Katiraei, F., Irvani, M.R., Lehn, P.W., "Micro-Grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process", IEEE Trans. Power Del, Vol. 20, No. 1, pp. 248-257, 2005.
- [7] Katiraei, F., Irvani, M.R., "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp.1821-1831, 2006.
- [8] Cheng, P.T., Chen, C.A., Lee, T.L., Kuo, S.Y., "A Cooperative Imbalance Compensation Method for Distributed-Generation Interface Converters", IEEE Trans. Industrial, Vol. 45, No. 2, pp. 805-815, Appl 2009.
- [9] Vachirasricirikul, S., Ngamroo, I., "Robust Controller Design of Microturbine and Electrolyzer for Frequency

- Stabilization in a Microgrid System with Plug-in Hybrid Electric Vehicles*", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 43, pp. 804-811, 2012.
- [10] Pecos Lopes, J.A., Polenz, S.A., Moreira, C.L., Cherkaoui, R., "Identification of Control and Management Strategies for LV Unbalanced Microgrids with Plugged-in Electric Vehicles", Electric Power Systems Research, Vol. 80, pp. 898-906, 2010.
- [11] Kim, A-R., Kim, G.-H., Heo, S., Park, M., Yu, I.-K., Kim, H.-M., "SMES Application for Frequency Control during Islanded Microgrid Operation", Physica C, in press (2012).
- [12] Habibi, F., Hesami Naghshbandy, A., Bevrani, H., "Robust Voltage Controller Design for an Isolated Microgrid Using Kharitonov's Theorem and D-stability Concept", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 44, pp. 656-665, 2013.
- [13] Kamel, Rashad.M., Chaouachi, A., Nagasaka, K., "Enhancement of Micro-grid Performance during Islanding Mode Using Storage Batteries and New Fuzzy Logic Pitch Angle Controller", Energy Conversion and Management, Vol 52, pp. 2204-2216, 2011.
- [14] Shayeghi, H., Ghasemi, M., "FACTS Devices Allocation Using a Novel Dedicated Improved PSO for Optimal Operation of Power System", Journal of Operation and Automation in Power Engineering, Vol. 1, pp. 124-135, 2013.
- [15] Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Std. 1547.1, 2005.
- [16] Hashemi, F., Ghadimi, N., Sobhani, B., "Islanding Detection for Inverter-based DG Coupled with Using an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System" Electrical Power and Energy systems, Vol. 45, pp. 443-455, 2013.