



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 1, 2024
pp. 107-122
Research Paper

Improving power quality and transient response in microgrids using state feedback controller and PSO algorithm

Mehdi Sanaei, Hamidreza Akbari, Zohreh Beheshtipour, Somaye Mosavi

Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
Department of industrial Engineering, Meybod University, Meybod, Iran

Abstract:

A microgrid has two operating modes, parallel to the grid and islanded operation modes. In the parallel operation mode, the scattered productions inside the microgrid can be powered synchronously with the production network or they can be turned off, and in the islanded operation mode, the scattered productions supply the loads inside the microgrid. The purpose of this article is to improve the power quality and transient response of a microgrid including DG sources using power electronics in islanded and grid-connected modes. For this purpose, a control method using a mode feedback controller is used to control the switching of interface converters for compensating unbalanced and non-linear loads. In this controller, a 2nd-degree linear regulator is used to produce a suitable profit margin and it will deal with optimal load allocation between scattered production sources. The proposed compensator, while providing the real power required by the network, is capable of load balancing, harmonic compensation, and reactive power control. Also, the feeding of local loads can be divided by any desired ratio between the network and DG.

Keywords: Microgrid, Power Quality, Controller, Imbalance, State Feedback, PSO.



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



<https://doi.org/10.22108/IJEE.2024.136142.1606>

بهبود کیفیت توان و پاسخ حالت گذرا در میکروگریدها با استفاده از کنترل‌کننده فیدبک

حالت و بهینه‌سازی ازدحام ذرات

مهدی ثنایی^۱، حمیدرضا اکبری^{۲*}، زهره بهشتی پور^۳، سمیه موسوی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

m.sanaei@iauyazd.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

ha.akbari@iau.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

z.beheshtipour@iauyazd.ac.ir

۴- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه میبد، میبد، ایران

mousavi@meybod.ac.ir

چکیده: یک میکروگرید به‌طور کلی می‌تواند دو حالت عملکردی داشته باشد که حالات عملکرد موازی با شبکه سراسری و عملکرد جزیره‌ای را شامل می‌شود. در حالت عملکرد موازی، تولیدات پراکنده داخل میکروگرید می‌توانند به‌صورت سنکرون با شبکه تولید توان کنند یا خاموش باشند و در حالت عملکرد جزیره‌ای تولیدات پراکنده بارهای داخل میکروگرید را تأمین می‌کنند. هدف از این مقاله بهبود کیفیت توان و پاسخ گذرا یک میکروگرید شامل منابع DG به کمک ادوات الکترونیک قدرت در حالت‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه است. برای این منظور از یک روش کنترلی با استفاده از کنترل‌کننده فیدبک حالت برای کنترل کلیدزنی مبدل‌های واسط و جبران بارهای نامتعادل و غیرخطی استفاده می‌شود. در این کنترل‌کننده از یک تنظیم‌کننده درجه ۲ خطی برای تولید یک حاشیه بهره مناسب استفاده می‌شود و به تخصیص بهینه بار بین منابع تولید پراکنده خواهد پرداخت. جبران‌ساز پیشنهادی درحالی‌که توان حقیقی مورد نیاز شبکه را تأمین می‌کند، قادر به متعادل‌سازی بار، جبران هارمونیک و کنترل توان راکتیو است. همچنین، تغذیه بارهای محلی را می‌توان با هر نسبت دلخواه بین شبکه و DG تقسیم کرد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، کنترل‌کننده، عدم تعادل، فیدبک حالت، PSO

۱- مقدمه

جدید انرژی از جمله فتوولتائیک، توربین‌های بادی و فناوری‌های ذخیره انرژی با گذشت زمان به بلوغ می‌رسند و هزینه‌های آنها به‌سرعت در حال کاهش است، ریزشبکه‌ها نیز به تدریج شروع به جلب توجه بیشتر محققان می‌کنند. برای یک شبکه بزرگ، ریزشبکه را می‌توان به‌عنوان یک واحد کامل قابل کنترل در نظر گرفت. هر منبع میکروگرید می‌تواند هنگامی که به شبکه متصل است، برق را به شبکه منتقل کند. هنگامی که شبکه از کار می‌افتد یا نیاز به تعمیر و نگهداری دارد، ریزشبکه می‌تواند مستقل عمل کند و برای تأمین برق بار خود خودکفا باشد.

ریزشبکه نوع جدیدی از شبکه برق مبتنی بر DG (تولید توزیع‌شده) است که می‌تواند به‌صورت متصل به شبکه یا خارج از شبکه راه‌اندازی شود. همان‌طور که منابع

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

نام نویسنده مسئول: حمیدرضا اکبری

نشانی نویسنده مسئول: ایران، یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد، گروه مهندسی برق

جبران بارهای نامتعادل و غیرخطی ارائه می‌شود. این کنترل‌کننده از یک تنظیم‌کننده درجه ۲ خطی (LQR)^۳ برای تولید یک حاشیه بهره مناسب استفاده کرده است و به تخصیص بهینه بار بین منابع تولید پراکنده خواهد پرداخت. در نهایت، برای بهبود عملکرد گذرای میکروگریدهای شامل یک و دو منبع تولید پراکنده، کنترل‌کننده PID را با استفاده از الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی اجتماع ذرات^۴ طراحی خواهیم کرد. در مرحله شبیه‌سازی شرایط مختلفی برای بارگذاری میکروگرید در نظر گرفته می‌شود. بارهای نامتعادل و غیرخطی که تعادل شبکه را مختل و کیفیت توان را دچار مشکل می‌کنند، توسط کنترل‌کننده پیشنهادی جبران می‌شوند و منابع تولید پراکنده توسط یک منبع ولتاژ DC ایدئال مدل‌سازی می‌شوند که به واسطهٔ مبدل‌های منبع ولتاژ به میکروگرید متصل می‌شوند و در هر دو حالت عملکرد میکروگرید، یعنی حالت‌های متصل به شبکه و جزیره‌ای بررسی خواهد شد.

مراحل کار در این مقاله شامل موارد زیر است:

۱- طراحی کنترل‌کننده فیدبک حالت با استفاده از رگولاتور درجه دوم خطی و استفاده از قاعده بریسون در انتخاب اولیه ماتریس‌ها؛

۲- مطالعه میکروگرید شامل یک DG در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای، بررسی تأثیر انتخاب پارامترهای شاخص LQR بر پاسخ گذرای شبکه و به دست آوردن پارامترهای شاخص LQR با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات؛

۳- طراحی کنترل‌کننده PID در حلقه فیدبک با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات؛

۱- طراحی کنترل‌کننده فیدبک حالت با استفاده از رگولاتور درجه دوم خطی^۵.

در طراحی کنترل‌کننده فیدبک حالت به کمک رگولاتور درجه دوم خطی شکل (۱)، فرض می‌کنیم حالت x کاملاً قابل اندازه‌گیری و برای کنترل در دسترس باشد.

ریزشبکه‌ها معمولاً ظرفیت تولید محدودی دارند؛ به طوری که نمی‌توانند کل بار شبکه را تأمین کنند و پایداری مبدل‌های داخلی آنها برای پایداری کل ریزشبکه مهم است. هنگامی که به شبکه متصل است، ولتاژ و فرکانس سیستم به راحتی تحت تأثیر حضور شبکه بزرگ‌تر قرار نمی‌گیرد؛ اما زمانی که ریزشبکه به طور مستقل کار می‌کند، ولتاژ و فرکانس آن به راحتی تحت تأثیر بار سایر عوامل قرار می‌گیرد؛ بنابراین، مطالعه عمیق پایداری و مقاومت ریزشبکه در مقابله با اختلالات و بازگشت به حالت پایدار ضروری است [۱،۲].

در مرجع [۳]، یک استراتژی کنترلی جدید مبتنی بر مفهوم کنترل فیدبک حالت برای کنترل قوی مبدل‌های توان دو طرفه در ریزشبکه‌های هیبریدی ارائه شده است. در این روش نسبت به روش کنترل افقی نتایج پذیرفتنی و مؤثری به دست آمده است و تنظیم ولتاژ و اشتراک توان به نحو مناسب‌تری انجام می‌شود.

در مرجع [۴]، ابزارها و تکنیک‌های مختلف تجزیه و تحلیل پایداری برای ریزشبکه‌ها بحث می‌شود. در این مرجع تعاریفی از مسائل پایداری ریزشبکه ارائه شده و ناپایداری در ریزشبکه‌ها بر اساس ساختار آنها طبقه‌بندی شده است. در مرجع [۵]، یک روش کنترل پیشنهاد شده است که DGها را قادر می‌کند تغییرات آتی در تقاضای بار را سریع‌تر و پیشگیرانه‌تر جبران کنند. در مرجع [۶]، روشی مطرح شده است تا عوامل گذرا را مشخص و تأثیرگذاری آنها را بر سیستم محدود کند. در مرجع [۷]، برخی از الگوریتم‌های پیشرفته برای انتقال میکروگرید به حالت جزیره‌ای و سنکرون‌سازی هنگام برگشت میکروگرید از حالت جزیره به شبکه معرفی می‌شود. در مرجع [۸]، طرح یک اینورتر متصل به شبکه یکپارچه (SGI)^۱ برای میکروگرید پیشنهاد می‌شود. SGI پیشنهادی قادر است در حالت متصل به شبکه یا حالت مستقل با کم کردن اثرات اتصال و جداسدن از شبکه کار کند.

در این مقاله یک روش کنترلی با استفاده از کنترل‌کننده فیدبک حالت^۲ برای کنترل کلیدزنی مبدل‌های واسط و

$$R_{jj} = \frac{1}{u_j^2} \quad j \in \{1, 2, \dots, m\}$$

ماکزیم مقدار قابل قبول برای u_j^2

که متناظر با معیار زیر است [۸]:

$$J_{LQR} = \int_0^{\infty} \left(\sum Q_{ii} z_i(t)^2 + \rho \sum R_{jj} u_j(t)^2 \right) dt \quad (۴)$$

در رابطه فوق، l تعداد خروجی‌های کنترلی و در اینجا تعداد حالت‌ها است و m تعداد ورودی‌ها را نشان می‌دهد. قاعده بریسون اساساً متغیرهایی را تنظیم می‌کند که در J_{LQR} ظاهر می‌شوند؛ به طوری که بیشترین مقدار پذیرفتنی برای هر عبارت یکی باشد. اگرچه این قاعده برخی اوقات نتیجه خوبی به دست می‌دهد، بیشتر به صورت یک نقطه شروع برای روش طراحی آزمون و خطا با هدف به دست آوردن مشخصه مطلوب برای سیستم حلقه بسته استفاده می‌شود.

اساس عملکرد کنترل کننده فیدبک حالت LQR برای معیار رابطه (۴)، به دست آوردن یک ماتریس بهره ساده به صورت زیر است [۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲]:

$$u = -Kx \quad (۵)$$

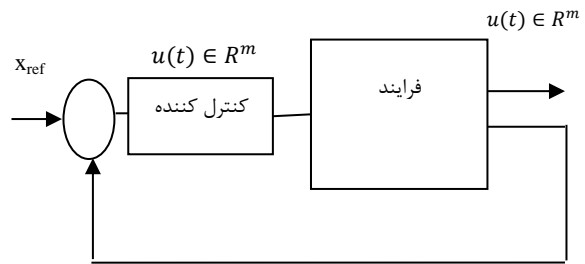
K یک ماتریس $m \times n$ به شکل زیر است:

$$K = (H^T Q H + \rho R)^{-1} (B^T P + H^T Q G) \quad (۶)$$

P یک ماتریس مثبت معین^{۱۱} و یک جواب یکتا برای معادله زیر است [۹]:

$$A^T P + P A + G^T Q G - (P B + G^T Q H)(H^T Q H + \rho R)^{-1} (B^T P + H^T Q G) = 0 \quad (۷)$$

معادله فوق به معادله جبری ریکاتی^{۱۱} معروف است. شکل کلی شاخص LQR بهینه به صورت زیر است [۳، ۴، ۵، ۶]:



شکل (۱): کنترل کننده فیدبک حالت با استفاده از رگولاتور درجه دوم خطی

در پیکربندی فوق مدل فضای حالت فرایند به صورت زیر است [۶]:

$$\dot{x} = Ax + Bu_c \quad z = Gx + Hu \quad y = Cx \quad (۱)$$

در بلوک دیاگرام شکل (۱)، $z(t)$ خروجی کنترل شده^۶ نامیده می‌شود و مربوط به سیگنالی است که می‌خواهیم در کمترین زمان ممکن به حداقل مقدار ممکن خود برسانیم. همچنین، در بلوک فوق m تعداد ورودی‌ها، n تعداد حالت‌های سیستم و l تعداد خروجی‌های کنترلی است. مسئله LQR بهینه شامل یافتن ماتریس انتقال کنترل کننده $C(s)$ به نحوی است که معیار زیر را حداقل کند [۷]:

$$J_{LQR} = \int_0^{\infty} \left(z(t)^T Q z(t) + \rho u^T(t) R u(t) \right) dt \quad (۲)$$

در رابطه فوق، ماتریس وزن دهی^۷ Q یک ماتریس معین یا نیمه معین مثبت، حقیقی و متقارن و ماتریس جریمه کنترل^۸ R نیز ماتریس مثبت معین، حقیقی و متقارن است و ρ یک عدد ثابت مثبت است.

۱-۱- قاعده بریسون^۹

انتخاب اولیه برای ماتریس‌های R و Q توسط قانون بریسون به شکل انتخاب ماتریس‌های قطری به صورت زیر مطرح می‌شود [۸]:

$$Q_{ii} = \frac{1}{z_i^2} \quad i = \{1, 2, \dots, l\}$$

ماکزیم مقدار قابل قبول برای z_i^2

۱۱۰ بهبود کیفیت توان و پاسخ حالت گذرا در میکروگریدها با استفاده از کنترل کننده فیدبک حالت و بهینه سازی ازدحام ذرات

با مقادیر مرجع خود مقایسه می شوند تا نحوه کلیدزنی مبدل را مشخص کنند. تولید مقادیر مرجع برای ولتاژ خروجی وcf و جریان ic از روی شرایط پخش بار آسان است؛ اما تولید مقدار مرجع برای جریان i1 امری دشوار است. برای سهولت این امر، بردارهای حالت جدید را به صورت زیر تعریف می کنیم [۱۶]:

$$x^T = [i_c \quad i_1 \quad v_{cf}] \quad (15)$$

بنابراین، ماتریس تبدیل حالت زیر را خواهیم داشت [۱۱]:

$$x_1 = C_p x_1 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x = \quad (16)$$

معادلات حالت تبدیل یافته با ترکیب معادلات ۱۱ و ۱۲ به صورت زیر به دست می آیند [۱۱]:

$$\dot{x} = C_p A C_p^{-1} x + C_p B u_c + C_p C v_{pcc} = \Lambda x + \Gamma_1 u_c + \Gamma_2 v_{pcc} \quad (17)$$

قانون کنترلی به صورت زیر تعریف می شود [۹]:

$$u_c(k) = -k[x_1(k) - x_{ref}(k)] \quad (18)$$

در رابطه بالا K یک ماتریس بهره^{۱۲} و xref بردار مرجع است. ماتریس بهره را می توان با استفاده از رگولاتور درجه دوم خطی گسسته^{۱۳} (LQR) با ماتریس وزن دهی^{۱۴} حالت Q و جریمه کنترلی R به دست آورد.

یک رگولاتور درجه دو خطی برای تولید یک حاشیه بهره نامحدود و حاشیه فاز حداقل ۶۰ درجه به کار گرفته می شود. یک ویژگی مهم دیگر LQR این است که در مقابل ورودی غیرخطی بسیار انعطاف پذیر است. این موضوع را از شکل (۲) می توان فهمید. وقتی خطا بزرگ باشد و کنترل بین 1 و -1 محدود شده باشد، درایه های ماتریس بهره K باید کوچک باشند. برای مجموعه هایی از مقادیر R که در حال کاهش اند، مجموعه ای متناظر از مقادیر در حال افزایش K به دست خواهیم آورد؛ بنابراین، همیشه یک مقدار برای R وجود دارد که Kx به طور مناسبی محدود شود.

$$J = \int_0^{\infty} x(t)^T \bar{Q} x(t) + u^T(t) \bar{R} u(t) + 2x(t)^T \bar{N} u(t) dt \quad (8)$$

$$\bar{Q} = G^T Q G \quad \bar{R} = \rho R = H^T Q H \quad \bar{N} = G^T Q H \quad (9)$$

در روابط فوق، ابتدا مقادیر اولیه R و Q توسط قاعده بریسون تعیین می شوند و سپس با استفاده از روابط فوق ماتریس های \bar{Q} و \bar{R} محاسبه می شوند [۵]:

$$u = -\bar{K}x \quad (10)$$

در این حالت K به صورت زیر محاسبه می شود [۹]:

$$\bar{K} = \bar{R}^{-1}(\bar{B}^T \bar{P} + \bar{N}^T) \quad (11)$$

\bar{P} پاسخ معادله جبری ریکاتی به صورت زیر است [۹]:

$$A^T \bar{P} + \bar{P} A + \bar{Q} - (\bar{P} \bar{B} + \bar{N}) \bar{R}^{-1} (\bar{B}^T \bar{P} + \bar{N}^T) = 0 \quad (12)$$

در محیط نرم افزار MATLAB، دستور $[K, P, e] = LQR$ مقدار بهینه کنترل کننده فیدبک حالت LQR را برای فرایند زیر محاسبه می کند [۹]:

$$\dot{X} = Ax + Bu_c \quad (13)$$

در رابطه بالا، K ماتریس بهره، P پاسخ معادله ریکاتی و e مقادیر ویژه حلقه بسته از رابطه زیر به دست می آید [۹]:

$$e = \text{eig}(A - B * K) \quad (14)$$

برای انتخاب ماتریس های Q و R گزینه های دیگری نیز وجود دارد؛ اما باید به این نکته توجه کرد که همواره این ماتریس ها باید مقادیر مثبت معین داشته باشند.

۲-۱- کنترل کننده فیدبک حالت

در کنترل کننده فیدبک حالت، حالت های انتخابی سیستم

ماتریس بهره K از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$K = R^{-1}b^T P, \quad b = C_p B \quad (22)$$

P یک ماتریس حقیقی متقارن مثبت معین است که معادله جبری ریکاتی زیر را برآورده می‌کند [۱۱]:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (23)$$

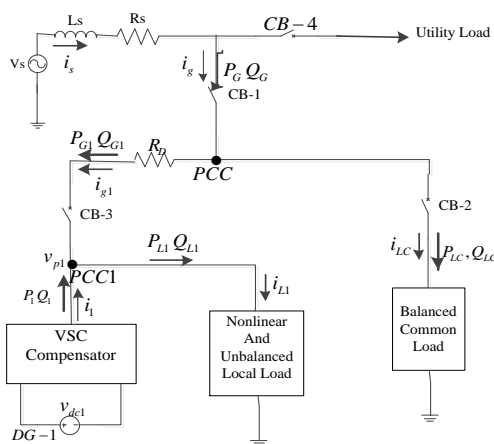
همچنین، مقدار شاخص عملکرد برابر است با [۱۱]:

$$X^T(0)PX(0) \quad (24)$$

۲- مطالعه میکروگرید شامل یک DG

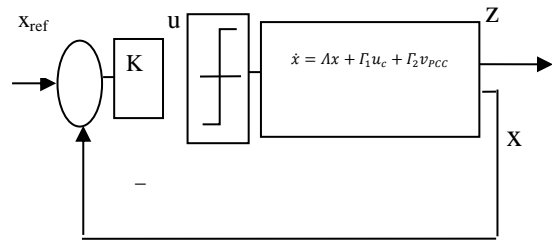
همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، سیستم در نظر گرفته شده در این بخش شامل یک منبع DG است. میکروگرید در نقطه PCC به شبکه اصلی متصل شده است. منبع DG دارای بار محلی است که شامل بارهای نامتعادل و غیرخطی است.

در حالت متصل به شبکه بار مشترک به‌طور کامل توسط شبکه تغذیه می‌شود و توان مورد نیاز بار محلی به‌طور مشترک توسط منبع DG-1 و شبکه تأمین می‌شود. در حالت جزیره‌ای، یعنی حالتی که CB-1، باز و میکروگرید از شبکه اصلی تأمین برق جدا شود، DG-1 باید تمامی توان مورد نیاز را برای بار محلی و نیز بار مشترک فراهم آورد. در بخش‌های بعدی هر دو حالت را در نظر خواهیم گرفت.



شکل (۳): دیاگرام تک خطی سیستم شامل میکروگرید، شبکه

برق اصلی و بارهای محلی و مشترک



شکل (۲): استفاده از رگولاتور درجه دوم خطی در فیدبک حالت

شکل (۲) بلوک دیاگرام یک کنترل‌کننده فیدبک حالت با حضور رگولاتور درجه دوم خطی را نشان می‌دهد. در این بلوک دیاگرام پارامتر X نمایانگر حالت‌های سیستم است و پارامتر Z خروجی کنترلی سیستم نامیده می‌شود. مقدار Z برابر است با [۸،۹،۱۰]:

$$Z = Gx + Hu \quad (19)$$

بلوک دیاگرام شکل (۲) می‌تواند دارای دو نوع خروجی مجزا باشد:

خروجی اندازه‌گیری شده $y(t)$ مربوط به سیگنالی است که قابل اندازه‌گیری است و بنابراین برای اهداف کنترلی در دسترس است. اگر $C(s)$ ماتریس انتقال کنترل‌کننده باشد، خواهیم داشت [۷]:

$$Y(s) = -C(s)U(s) \quad (20)$$

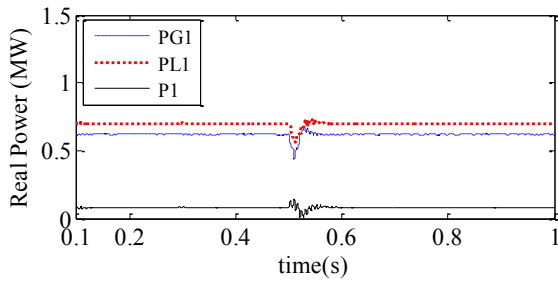
که $U(s)$ و $Y(s)$ به ترتیب تبدیل لاپلاس ورودی و خروجی اندازه‌گیری $y(t)$ را نشان می‌دهند.

خروجی کنترل‌شده $z(t)$ مربوط به سیگنالی است که می‌خواهیم در کمترین زمان ممکن به حداقل مقدار ممکن خود برسایم.

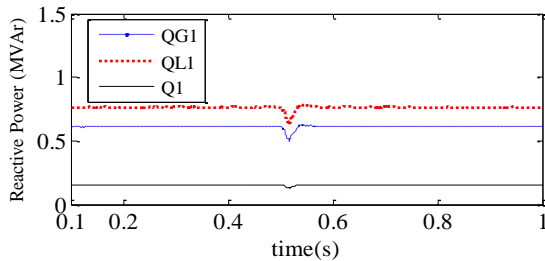
در بعضی موارد داریم: $z(t) = y(t)$ ؛ به این معنی که هدف از کنترل ما این است که کل خروجی اندازه‌گیری شده بسیار کوچک باشد. برای زمانی که خروجی $y(t)$ یک بردار باشد، اغلب یکی از نیازهای مسئله کوچک کردن یکی از خروجی‌های اندازه‌گیری شده، مثلاً $y_1(t)$ است. در این حالت خواهیم داشت [۱۱]:

$$z(t) = y_1(t) \quad (21)$$

فرض کنید در زمان $t=0.5$ (s) امپدانس بار مشترک به نصف مقدار اولیه کاهش یابد. شکل (۴) توان‌های حقیقی و غیرفعال را برای منبع DG-1 نشان می‌دهد. ولتاژ نقطه (PCC1) و جریان $ig1$ در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. تخصیص بار در همان نسبت‌های دلخواه و نیز تعادل ولتاژ حتی پس از تغییر مقدار بار مشترک نشان‌دهنده یک عملکرد پایدار برای شبکه است. گفتنی است برای برقراری تعادل در شبکه و تخصیص بهینه بار از قانون کنترلی فیدبک حالت بیان‌شده در بخش‌های قبل استفاده شده است. قانون کنترلی سیستم مطابق بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل (۳) است.

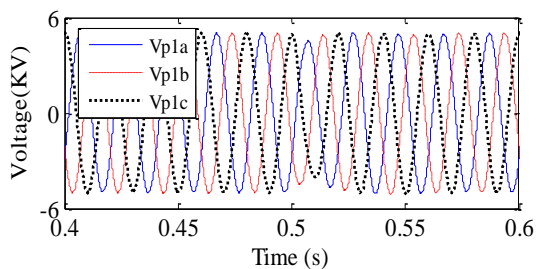


شکل (الف) توان حقیقی (MW)



شکل (ب) توان غیرفعال (MVAR)

شکل (۴): تخصیص توان‌های حقیقی و غیرفعال در حالت متصل به شبکه (برای سیستم شامل یک DG)



شکل (۵): (الف) ولتاژ سه‌فاز در نقطه PCC1

۲-۱- تغذیه بار محلی به صورت مشترک با

شبکه برق اصلی (حالت متصل به شبکه)

در این بخش تغذیه بار محلی DG به وسیله اشتراک‌گذاری این بار توسط شبکه اصلی برق و منبع DG نشان داده خواهد شد. در این حالت به دلیل اینکه منبع DG بار مشترک را تأمین نمی‌کند، خواهیم داشت [۱۲]:

$$\lambda_{1PG} = \lambda_{1QG} = 1 \quad (25)$$

فرض کنید در این حالت بخواهیم با توجه به برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده، سیستم به گونه‌ای رفتار کند که DG-1، ۱۰ درصد از توان حقیقی و ۲۰ درصد از توان راکتیو بار محلی خود را تأمین کند؛ بنابراین، در این حالت خواهیم داشت [۱۲]:

$$\lambda_{1P} = 0.1, \lambda_{1Q} = 0.2 \quad (26)$$

داده‌های سیستم شامل مشخصات بارها، مبدل منبع ولتاژ و منابع ولتاژ در جدول (۱) آمده‌اند.

جدول (۱): پارامترهای سیستم شکل (۳)

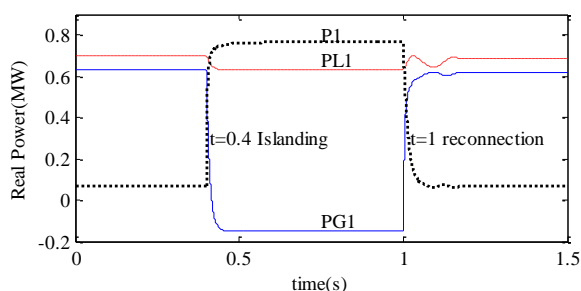
مقادیر	کمیت‌های سیستم
50 HZ	فرکانس سیستم
11 KV rms(L-L)	ولتاژ منبع (Vs)
$R_s=1.025\Omega, L_s=57.75$ mH	امپدانس فیدر
$R_{La} = 48.4\Omega, L_{Lb} = 192.6$ mH $R_{Lb} = 24.4\Omega, L_{Lb} = 100.0$ mH $R_{Lc} = 96.4\Omega, L_{Lc} = 300.0$ mH	بار محلی نامتعادل
یک یکسوساز سه‌فاز شامل بار مقاومتی - سلفی با مقادیر $R=200\Omega$ و $L=200$ mH	بار محلی غیرخطی
$R_{La} = 24.4\Omega, L_{La} = 100.0$ mH $R_{Lb} = 24.4\Omega, L_{Lb} = 100.0$ mH $R_{Lc} = 24.4\Omega, L_{Lc} = 100.0$ mH	امپدانس بار مشترک
$R_{D1} = R_{D2} = 0.2\Omega$	امپدانس خط میکروگرید
DGها و جبران‌سازها	
3.5 KV	ولتاژ DC (Vdc1)
3KV/11KV, 0.5 MVA, 2.5% reactance (Lf)	نسبت ترانسفورماتور
1.5 Ω	تلفات VSC
50 μ F	خازن فیلتر (Cf)

۲-۲- بررسی تغذیه بار محلی در حالت جزیره‌ای

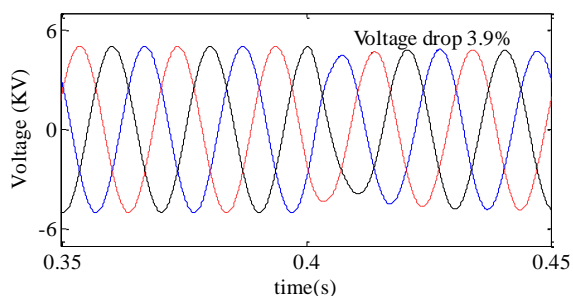
سیستم مطرح شده در بخش قبل را در نظر بگیرید. فرض می‌کنیم در زمان $t=0.4$ s، CB-1 باز شود و درحالی‌که بار مشترک همچنان به سیستم متصل است، حالت جزیره‌ای اتفاق بیفتد. در این حالت باید هم بار مشترک و هم بار محلی به‌طور کامل توسط واحد DG تأمین شود. در این حالت، خواهیم داشت [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳]:

$$\lambda_{1P} = \lambda_{1Q} = 1, \quad \lambda_{1PG} = \lambda_{1QG} = 0 \quad (28)$$

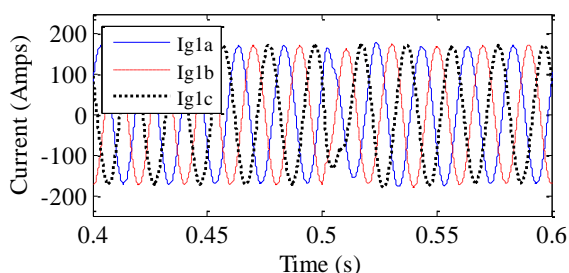
در این حالت نیز پارامترهای شاخص LQR مشابه قسمت قبل انتخاب می‌شوند. در شکل (۶)، توزیع توان‌های حقیقی و در شکل (۷) ولتاژ نقطه PCC1 نشان داده شده است. به محض اینکه حالت جزیره‌ای شدن اتفاق می‌افتد، افت ولتاژ نقطه PCC1 موجب ایجاد افت اندکی در مقدار توان مورد نیاز بار محلی PL1 می‌شود. در همین حال، توان تولیدی توسط واحد DG-1 یعنی P1 به‌منظور تأمین توان مورد نیاز بار مشترک افزایش می‌یابد که در شکل با مقدار منفی نشان داده شده است. مقدار منفی برای توان PG1 در شکل (۶) نشان‌دهنده شارش توان در جهت مخالف با جهت نشان داده شده در شکل (۳) است.



شکل (۶): تخصیص توان‌های حقیقی در DG-1 در حالت جزیره‌ای (MW)



شکل (۷): ولتاژ سه‌فاز در نقطه PCC1



شکل (۵): (ب) جریان تزریقی شبکه به نقطه PCC1

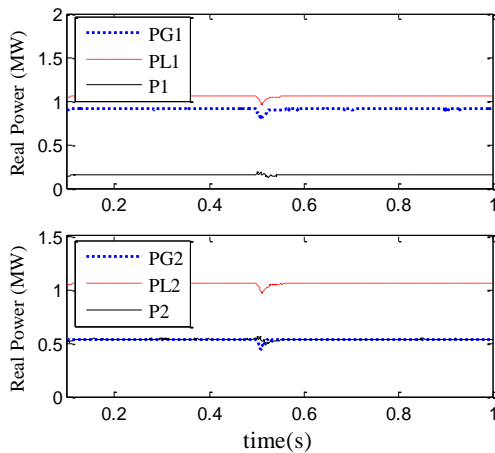
در این مثال به‌منظور عملکرد مناسب شبکه پارامترهای شاخص LQR به‌صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$K = [8.1109 \quad 3.2170 \quad 0.1170]. \quad (29)$$

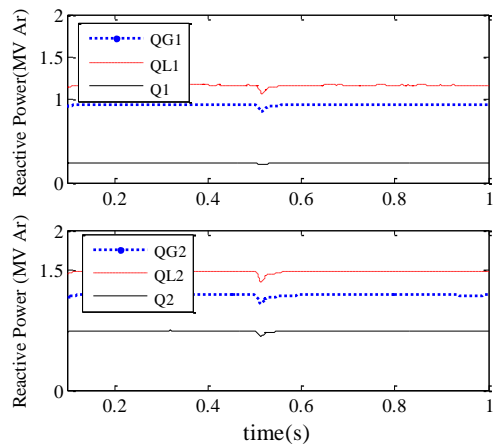
که در آن، diag یک ماتریس قطری است. دو متغیر که برای کنترل مهم‌تر از همه هستند، جریان ic و ولتاژ vcf هستند. انتخاب ماتریس Q اهمیت این حالت‌ها را نشان می‌دهد. در شکل‌های صفحه قبل افت ولتاژ^{۱۱} و در نتیجه افت توان‌های حقیقی و راکتیو در لحظه تغییر بار یعنی زمان ۰/۵ ثانیه به وضوح دیده می‌شود. پس از مدت زمان کوتاهی (حدود ۰/۲۵ ثانیه)، ولتاژ، جریان و توان‌ها مجدداً به حالت تعادل بازمی‌گردند. در جدول (۲) برخی از نتایج عددی حاصل از این نمودارها آمده‌اند.

جدول (۲): نتایج عددی حالت متصل به شبکه

شکل (۱)	توان حقیقی	مقدار اولیه (MW)	مقدار نهایی (MW)	مقدار مینیمم (t=0.5 s)	ماکزیمم فروجهش (MW)
	PL1	0.7	0.7	0.56	0.14
	PG1	0.628	0.63	0.44	0.17
P1	0.072	0.07	0.003	0.067	
شکل (۲)	توان غیرفعال	مقدار اولیه (MVA)	مقدار نهایی (MVA)	مقدار مینیمم (t=0.5 s)	ماکزیمم فروجهش (MVA)
	QL1	0.76	0.76	0.62	0.14
	QG1	0.61	0.61	0.5	0.11
QL1	0.15	0.15	0.12	0.03	
شکل (۵)	افت ولتاژ در نقطه PCC1(%)		دامنه ولتاژ (KV)	دامنه جریان (Amp)	
	4.5%		5	175	



الف) توزیع توان حقیقی (MW)



ب) توزیع توان راکتیو (MVAR)

شکل (۸): توزیع توان های حقیقی و راکتیو در DG-1 و DG-2 (حالت دوم)

جدول (۴)، برخی از نتایج عددی حاصل از شبیه سازی ها را برای حالت های اول و دوم انتخاب R و Q نشان می دهد. با توجه به این جدول و با استفاده از شکل موج های ولتاژ و توان، می توان مشاهده کرد که در حالت دوم ولتاژها و توان ها در لحظه کاهش بار مشترک نسبت به حالت اول افت کمتری خواهند داشت.

در زمان $t=1$ s دوباره بسته می شود و سیستم به حالت متصل به شبکه بازمی گردد. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود، پس از وصل دوباره مدار شکن در لحظه ۱ ثانیه، سیستم بلافاصله متعادل نمی شود و تا رسیدن توان ها به مقادیر اولیه مدت زمانی (حدود ۰/۱۷ ثانیه) وقت لازم است. علاوه بر آن، مقادیر توان های حقیقی در این لحظات، اندکی فراجهدش و فروجهش نسبت به حالت های تعادل خود دارند. در جدول (۳) برخی از ویژگی های این نمودارها آمده اند.

جدول (۳): نتایج عددی حالت جزیره ای

شکل (۶)	توان حقیقی	مقدار اولیه (MW)	مقدار میانی در حالت جزیره ای (MW)	مقدار نهایی (MW)	زمان بازیابی مجدد (ثانیه)
					(پس از اتصال دوباره CB-1)
شکل (۶)	PL1	0.7	0.63	0.695	0.17
	PG1	0.629	-0.13	0.625	0.16
	P1	0.071	0.76	0.07	0.17
شکل (۷)	افت ولتاژ (Voltage droop) در PCC1 (%)		دامنه ولتاژ KV		
		مقدار اولیه	مقدار میانی (در حالت جزیره ای)		
		3.9%	5		4.8

۳-۲- بررسی تأثیر انتخاب پارامترهای شاخص LQR بر پاسخ گذرای شبکه

با انتخاب مناسب پارامترهای شاخص LQR یعنی ماتریس های وزن دهی Q و جریمه کنترلی R می توان تا حدی این افت ولتاژها و افت توان ها در لحظه تغییر مقدار بار مشترک را بهبود بخشید. به کمک قاعده بریسون می توانیم مقادیر زیر را برای Q و R انتخاب کنیم [۱۳]:

$$Q = \text{diag}[0 \ 1 \ 5] \quad R = 0.05 \quad (29)$$

با انتخاب این مقادیر برای پارامترهای شاخص LQR مقدار ماتریس بهره به این صورت به دست می آید:

$$K = [9.536 \ 3.217 \ 0.155]$$

جدول (۴): (الف) نتایج عددی توان حقیقی

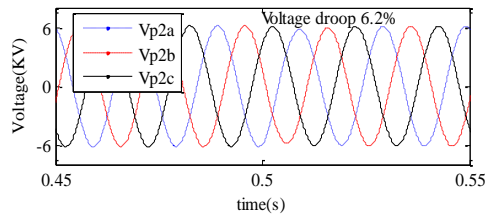
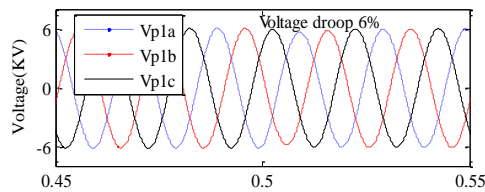
حالت	مقدار اولیه (MW)		مقدار نهایی (MW)		مقدار کمیته ($t=0.5$ s)		بیشترین افت (MW)
	1	2	1	2	1	2	
شکل‌های (۶) و (۸)	PL1	1.07	1.06	1.06	0.89	0.96	0.1
	PG1	0.86	0.84	0.85	0.66	0.75	0.1
	P1	0.21	0.22	0.21	0.13	0.19	0.02

جدول (۴): (ب) نتایج عددی توان راکتیو

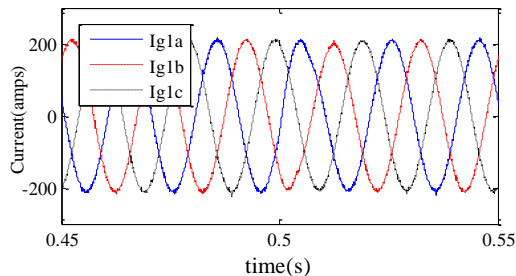
توان غیرفعال	مقدار اولیه (MV Ar)		مقدار نهایی (MV Ar)		مقدار کمیته ($t=0.5$ s)		بیشترین افت (MV Ar)
	1	2	1	2	1	2	
شکل‌های (۶) و (۸)	QL1	1.15	1.16	1.16	0.96	1.05	0.2
	QG1	0.92	0.93	0.93	0.77	0.84	0.09
	Q1	0.23	0.23	0.23	0.19	0.21	0.02

جدول (۴): (پ) نتایج عددی ولتاژ و جریان

شکل‌های (۵) و (۷)	دامنه ولتاژ (KV)		دامنه ولتاژ PCC1 (%)		دامنه جریان Igl (Amps)	
	1	2	1	2	1	2
شکل‌های (۵) و (۷)	حالت					
	PCC1 (%)	6%	12.8%	6.2%	210	210
	PCC1 (%)	13%	6%	6%	210	210



شکل (۹): (الف) ولتاژ سه فاز در نقاط PCC2 و PCC1



شکل (۹): (ب) جریان تزریقی به نقطه PCC1 (حالت دوم)

۴-۲- راهکارهای پیشنهادی برای بهبود پاسخ

گذرای میکروگرید

در بخش قبل پس از معرفی کنترل کننده فیدبک حالت LQR، چگونگی تأثیر این کنترل کننده بر عملکرد میکروگریدها بررسی شد. در آنجا دیدیم کنترل کننده پیشنهادی در حفظ تعادل و پایداری میکروگرید در حالت متصل به شبکه عملکرد مطلوبی داشت؛ اما در هنگام وقوع جزیره‌ای شدن و اتصال مجدد به شبکه قدرت، تا رسیدن میکروگرید به حالت تعادل و رسیدن توزیع توان‌ها به حالت پایدار، مدت زمانی به طول می‌انجامد و مقادیر توان در این حالت دارای اندکی فراجهش و فروجهش خواهند بود. در اینجا برای بهبود پاسخ گذرای میکروگرید، دو راهکار را معرفی می‌کنیم. این راهکارها عبارت‌اند از:

- روش اول: به دست آوردن پارامترهای شاخص LQR با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات؛
- روش دوم: طراحی کنترل کننده PID در حلقه فیدبک با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات.

$$\alpha = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (32)$$

$$\phi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (33)$$

انتخاب مناسب w سبب تعادل در جست‌وجوی محلی و جست‌وجوی کل فضای مسئله خواهد شد. عموماً برای عملکرد بهینه الگوریتم، w به صورت دینامیک تغییر داده می‌شود [۱۴]:

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{iter}_{\max}} * \text{iter}_{\max} \quad (34)$$

iter_{\max} نشان‌دهنده حد تعداد تکرار الگوریتم و iter شمارنده تکرار است. در روابط (۱) و (۲) برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم و کوچک کردن گام‌های جست‌وجو، سرعت ذره با مقدار v_{\max} محدود می‌شود [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]:

$$v \in [-v_{\max}, v_{\max}] \quad (35)$$

v_{\max} جست‌وجوی محلی را بهبود می‌دهد و در واقع فرایند یادگیری تدریجی ذره را مدل می‌کند. اگر v_{\max} بزرگ تنظیم شود، ممکن است ذره از نقطه بهینه جهش کند و اگر v_{\max} کوچک تنظیم شود، همگرایی الگوریتم کند می‌شود و ذره ممکن است در دام کمینه محلی بیفتد. معمولاً v_{\max} برای هر متغیر تصمیم بین ۱۰ درصد تا ۲۰ درصد محدوده متغیر مربوطه تنظیم می‌شود.

۲-۲-۲-۲-۲ به دست آوردن پارامترهای شاخص

LQR با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات

با انتخاب مناسب پارامترهای شاخص LQR می‌توان عملکرد گذرای سیستم را بهبود بخشید. برای این منظور، پارامترهای شاخص LQR برای میکروگرید شامل دو منبع تولید پراکنده را با استفاده از الگوریتم تکاملی اجتماع ذرات محاسبه می‌کنیم.

برای این منظور، فرض کنید پارامترهای شاخص LQR یعنی R و Q به صورت زیر در نظر گرفته شوند [۱۴، ۱۵]:

۱-۲-۲-۴- الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات^{۱۷}

در الگوریتم PSO تعدادی از موجودات وجود دارند که به آنها ذره گفته می‌شود و در فضای جست‌وجوی تابعی پخش شده‌اند که قصد کمینه کردن (یا بهینه‌کردن) مقدار آن را داریم. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا محاسبه می‌کند که در آن قرار گرفته است. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده است و نیز اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا جواب مدنظر به دست بیاید. در واقع، انبوه ذرات که مقدار کمینه یک تابع را جست‌وجو می‌کنند، همانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که به دنبال غذا می‌گردند.

برای فرموله کردن الگوریتم PSO دو متغیر x و v به ترتیب با عنوان موقعیت و سرعت ذره تعریف می‌شوند. بهترین موقعیت ذره (از لحاظ شایستگی در تابع هدف) با P_best و بهترین موقعیت بهترین ذره در کل گروه با عنوان g_best شناخته می‌شود [۱۴]. برای اطمینان از همگرایی PSO استفاده از ضرایب موسوم به ضرایب انقباض برای تنظیم مناسب پارامترهای PSO لازم است. روابط اصلاح‌شده سرعت و موقعیت ذره را با توجه به ضرایب انقباض می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۴]:

$$v_{d+1} = \alpha * (w * v_d + \phi_1 * \text{rand} * (p_{\text{best}} - x_d) + \phi_2 * \text{rand} * (g_{\text{best}} - x_d)) \quad (30)$$

$$v_{d+1} + x_{d+1} = x_d \quad (31)$$

d شماره تکرار، x_d موقعیت ذره در تکرار d ، x_{d+1} موقعیت ذره در تکرار $d+1$ ، v_d سرعت ذره در تکرار d ، w وزن اینرسی و ϕ_1 و ϕ_2 ضرایب شتاب نام دارند.

در رابطه بالا، rand یک تابع تولید عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۰ ۱] است. α تابعی از ϕ_1 و ϕ_2 است که توسط Clerk برای تقویت همگرایی و پایداری

PSO پیشنهاد شد [۱۴]

به همین نحو، چنانچه در کل جمعیت ذره‌ای بهتر از نظر میزان شایستگی در تابع هدف پیدا شد، جایگزین g_best می‌شود.

۷- مراحل ۴ تا ۷ تا رسیدن به بیشینه تعداد تکرار مشخص شده ($itermax$) انجام می‌گیرد. جواب نهایی مسئله از تعیین g_best در تکرار آخر به دست می‌آید. مقادیر پارامترهای الگوریتم PSO برای تابع هدف رابطه (۳۶) به صورت زیر انتخاب شده است:

$$w_{min} = 0.4, w_{max} = 0.9$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = 2.05, \quad Itermax=100 \quad (38)$$

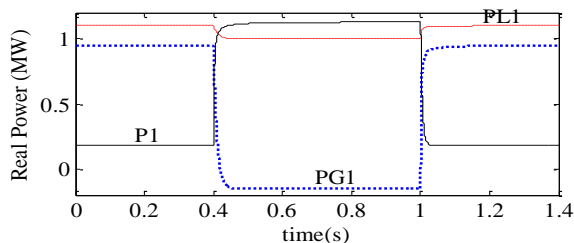
$$Popsiz=40, Npar=50$$

پس از اجرای الگوریتم PSO روی تابع هدف رابطه (۳۶) در طی ۱۰۰ تکرار نتایج زیر برای پارامترهای شاخص LQR حاصل شد:

جدول (۵): نتایج به دست آمده برای پارامترهای شاخص LQR با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات

متغیر	Q1	Q2	Q3	R
	0.0012	2.1242	9.8950	0.11

در شکل (۱۰) تخصیص توان‌های حقیقی و در شکل (۱۱) ولتاژ نقاط PCC1 و PCC2 در هنگام استفاده از مقادیر به دست آمده در جدول (۵) برای پارامترهای شاخص LQR نشان داده شده‌اند. جدول (۶) نتایج عددی حاصل از این نمودارها را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): (الف) تخصیص توان‌های حقیقی در DG-1

$$R = r, Q = \text{diag}[Q1 \ Q2 \ Q3], 0 \leq Q_1, Q_2, Q_3 \leq 10, 0 \leq r \leq 5 \quad (36)$$

در این حالت، تابع هدف که باید مینیمم شود، به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]:

$$F = \int_0^{t_{\sin}} t \sum (|P_i - P_{iss}| + |Q_i - Q_{iss}|) dt, \quad i = L_1, G_1, 1, L_2, 2 \quad (37)$$

در رابطه (۳۵)، $P1_{ss}$ ، $PL1_{ss}$ ، $PG1_{ss}$ و $P2_{ss}$ ، $PL2_{ss}$ و $PG2_{ss}$ مقادیر نهایی (ماندگار) به دست آمده برای توان‌های حقیقی در جدول (۴) هستند. $Q1_{ss}$ ، $Q2_{ss}$ و $Q3_{ss}$ نیز مقادیر نهایی (ماندگار) توان‌های راکتیو هستند. در واقع، این تابع هدف به گونه‌ای تعریف شده است که مقادیر توان‌ها کمترین میزان انحراف را از مقدار نهایی یا مقدار حالت ماندگار خود داشته باشند و در کمترین زمان ممکن به این حالت ماندگار برسند. در این حالت چون میکروگرید شامل دو منبع تولید پراکنده است، نیاز به حضور دو جبران‌ساز خواهیم داشت و در نتیجه باید برای هر جبران‌ساز یک کنترل‌کننده LQR طراحی کنیم.

مراحل اجرای الگوریتم PSO برای حل مسئله به صورت زیر انجام می‌شود:

۱- موقعیت و سرعت اولیه ذرات در محدوده مجاز به صورت تصادفی تولید می‌شود.

۲- تابع هدف رابطه (۳۵) محاسبه می‌شود.

۳- P_best برای هر ذره برابر موقعیت اولیه‌اش در نظر گرفته می‌شود (در تکرار اول). همچنین، g_best یعنی برترین ذره در میان ذرات از نظر میزان شایستگی در تابع هدف رابطه (۷) تعیین می‌شود.

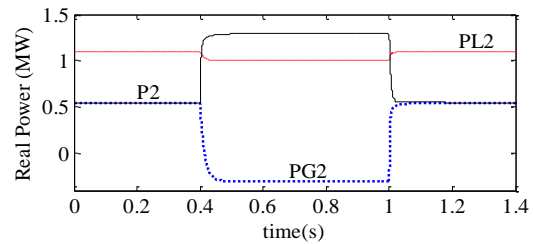
۴- سرعت و موقعیت جدید هر ذره با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.

۵- تابع هدف کلی از (۳۶) برای هر ذره محاسبه می‌شود.

۶- اگر مقدار تابع هدف کلی جدید برای هر ذره بهتر از مقدارش در P_best باشد، P_best جایگزین می‌شود.

شکل (۱۰)	توان حقیقی (MW)	مقدار اولیه (MW)	مقدار میانی در حالت چیریه‌ای MW	مقدار نهایی (MW)	زمان بازمانده مجدد حرکت چرخه وصل از پس
					(ثانیه)
PL1	1.1	1	1.1	0.01	
PG1	0.88	-0.15	0.88	0.02	
P1	0.22	1.15	0.22	0.02	
PL2	1.1	0.97	1.1	0.01	
PG2	0.55	-0.3	0.55	0.02	
P2	0.55	1.27	0.55	0.02	

شکل (۱۱)	افت ولتاژ (Voltage droop)	
	در PCC1 (%)	در PCC2 (%)
	2.7%	3.1%

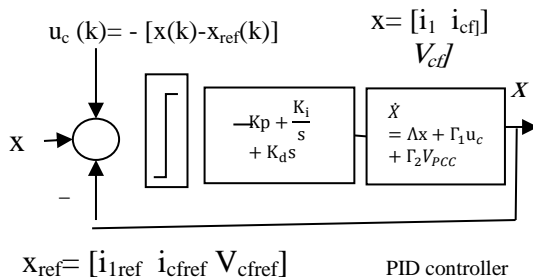


شکل (۱۰): (ب) تخصیص توان‌های حقیقی در DG-2

با مقایسه شکل موج‌های توان‌های حقیقی و ولتاژ به‌دست‌آمده در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) با شکل موج‌های مشابه به‌دست‌آمده در بخش‌های قبل و بدون استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات مشاهده می‌شود که در این حالت عملکرد گذرای شبکه بهبود چشمگیری خواهد داشت. همان‌طور که از این شکل‌ها و جدول (۹) پیداست، در این حالت پس از وصل مجدد میکروگرید به شبکه اصلی مقادیر توان‌ها به‌سرعت به حالت پایدار (ماندگار) خود می‌رسند و دیگر از نوسانات توان خبری نخواهد بود.

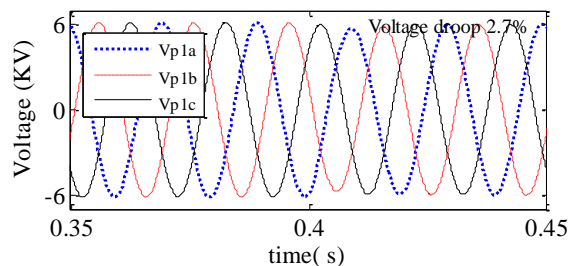
۳- طراحی کنترل‌کننده PID در حلقه فیدبک با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات

برای اصلاح عملکرد گذرای سیستم، می‌توانیم یک کنترل‌کننده PID در حلقه فیدبک طراحی کنیم. کارایی بالا، طراحی مناسب و سادگی پیاده‌سازی بعد از طراحی ازجمله عواملی‌اند که باعث کاربرد وسیع کنترل‌کننده PID در صنعت شده است. استفاده از روش‌های هوشمند در طراحی پارامترهای این کنترل‌کننده در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته است. در گذشته این طراحی توسط روش‌های کلاسیک مانند مکان هندسی ریشه‌ها، روش زیگلر - نیکولز و ... انجام می‌گرفت. در این پایان‌نامه برای به‌دست آوردن ضرایب کنترل‌کننده PID از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات کمک خواهیم گرفت. در شکل (۱۲)، بلوک دیاگرام کنترل‌کننده فیدبک حالت با حضور PID Controller نشان داده شده است [۱۴، ۱۵].



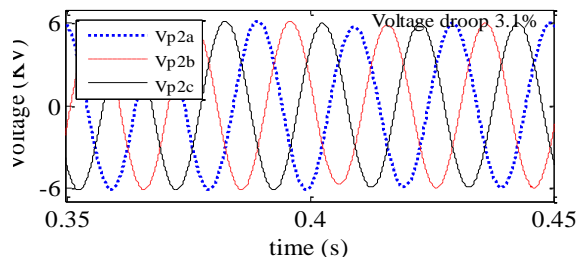
شکل (۱۲): بلوک دیاگرام کنترل فیدبک حالت با حضور

کنترل‌کننده PID



شکل (۱۱): (الف) ولتاژ نقاط PCC1

(با انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترهای R و Q)



شکل (۱۱): (ب) ولتاژ نقاط PCC2

(با انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترهای R و Q)

جدول (۶): نتایج عددی توزیع بار مشترک توسط منبع تولید پراکنده با انتخاب پارامترهای بهینه

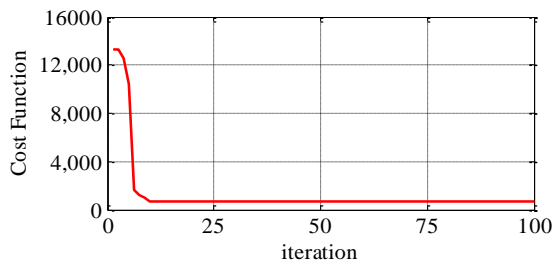
داده شده در رابطه (۴۱) در طی ۱۰۰ تکرار نتایج زیر برای ضرایب کنترل کننده PID حاصل شد.

جدول (۷): پارامترهای بهینه به دست آمده برای کنترل کننده

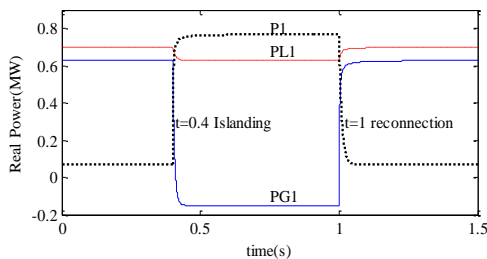
PID با استفاده از الگوریتم PSO

Kp	Ki	Kd
1.8722	1.5880	0.0220

شکل (۱۳) نمودار همگرایی تابع هدف را نشان می‌دهد. در شکل (۱۴) تخصیص توان حقیقی و در شکل (۱۵) ولتاژ نقطه PCC1 با وجود کنترل کننده PID نشان داده شده است. جدول (۸) نتایج عددی حاصل از این نمودارها را نشان می‌دهد.

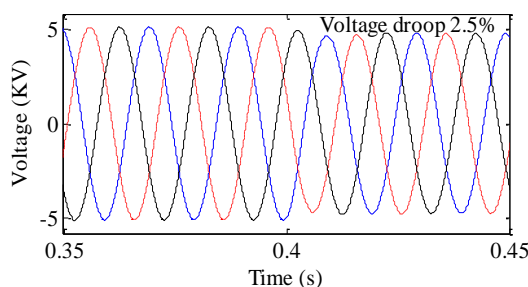


شکل (۱۳): نمودار همگرایی الگوریتم PSO برای تابع هدف رابطه (۹)



شکل (۱۴): توزیع توان‌های حقیقی DG-1 با وجود کنترل کننده

PID (به کمک الگوریتم PSO)



شکل (۱۵): ولتاژ سه فاز در نقطه PCC1 با وجود کنترل کننده

PID (به کمک الگوریتم PSO)

$$0.01 \leq K_p, K_i, K_d \leq 2 \quad (39)$$

در این حالت قانون کنترلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u_c(k) = -[x(k) - x_{ref}(k)]$$

$$\text{If } u_c(k) > h \quad u = +1$$

$$\text{If } u_c(k) < h \quad u = -1$$

$$\text{If } u_c(k) < -h \quad u = -1$$

متغیر u به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u = \begin{cases} +1 & \text{هنگامی که } S_1 \text{ و } S_2 \text{ بسته باشند} \\ -1 & \text{هنگامی که } S_1 \text{ و } S_2 \text{ باز باشند} \end{cases} \quad (41)$$

مقدار h برای حل این مسئله بهینه‌سازی برابر با ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است.

۱-۳- طراحی کنترل کننده PID برای میکروگرید شامل یک منبع تولید پراکنده

در این قسمت درصدد خواهیم بود که برای بهبود حالت گذرای سیستم، کنترل کننده PID در حلقه فیدبک را طراحی کنیم. ضرایب کنترل کننده با استفاده از الگوریتم PSO محاسبه می‌شود و تابع هدف که باید مینیمم شود، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = \int_0^{t_{\sin}} t \sum (|P_i - P_{iss}| + |Q_i - Q_{iss}|) dt, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (42)$$

در رابطه (۹)، P_{1ss} ، PL_{1ss} و PG_{1ss} مقادیر نهایی (ماندگار) به دست آمده برای توان‌ها در جدول (۳) هستند. Q_{1ss} ، QL_{1ss} و QG_{1ss} نیز مقادیر نهایی (ماندگار) توان‌های راکتیو هستند. در واقع، این تابع هدف به گونه‌ای تعریف شده است که مقادیر توان‌ها کمترین میزان انحراف را از مقدار نهایی یا مقدار حالت ماندگار خود داشته باشند و در کمترین زمان ممکن به این حالت ماندگار برسند.

مقادیر پارامترهای الگوریتم PSO برای تابع هدف رابطه به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = 2.55w_{\min} = 0.3, w_{\max} = 0.9 \quad (43)$$

$$\text{Popsiz}=40, \text{Npar}=50, \text{Itermax}=100$$

پس از اجرای الگوریتم PSO روی تابع هدف نشان

۱۲۰ بهبود کیفیت توان و پاسخ حالت گذرا در میکروگریدها با استفاده از کنترل‌کننده فیدبک حالت و بهینه‌سازی ازدحام ذرات

بازیابی توان است. این امر نشان می‌دهد روش پیشنهادی می‌تواند پاسخ گذرای میکروگرید را در شرایط مختلف بهره‌برداری به‌طور چشمگیری بهبود بخشد.

جدول (۹): مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با روش کنترل LQR با پارامترهای ثابت برای سه حالت بارگذاری مختلف

پارامتر	حالت بارگذاری کم	حالت بارگذاری متوسط	حالت بارگذاری زیاد
فراجهش توان پیشنهادی (MW)	0.0001	0.0001	0.0001
فراجهش توان LQR (MW)	.0002	.0002	0.0002
نوسان ولتاژ پیشنهادی (V)	0.002	0.002	0.002
نوسان ولتاژ LQR (V)	0.003	0.003	0.003
زمان بازیابی توان پیشنهادی (s)	0.01	0.01	0.01
زمان بازیابی توان LQR (s)	0.02	0.02	0.02

در جدول ۱۰، نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از چند مقاله دیگر در زمینه کنترل میکروگرید مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر، مقادیر کمتری برای فراجهش توان، نوسان ولتاژ و زمان بازیابی توان دارد. این امر نشان می‌دهد روش پیشنهادی می‌تواند پاسخ گذرای میکروگرید را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد.

با توجه به شکل (۱۵-۱۳) و اطلاعات نشان داده شده در جدول (۱۱)، مشاهده می‌شود با حضور کنترل‌کننده PID پاسخ گذرای سیستم تا حد مناسبی بهبود یافته است و پس از وصل شبکه، توزیع توان در مدت زمان کمی به حالت اولیه خود بازمی‌گردد.

جدول (۸): نتایج عددی حالت جزیره‌ای با حضور کنترل‌کننده PID (با استفاده از روش PSO)

شکل (۱۴)	توان حقیقی	مقدار اولیه (MW)	مقدار میانگین در حالت جزیره‌ای MW	مقدار نهایی (MW)	زمان بازیابی مجدد (ثانیه)				
					پس از وصل مجدد شبکه				
					PL1	0.7	0.64	0.7	0.03
					PG1	0.63	-0.14	0.63	0.03
P1	0.07	0.76	0.07	0.04					
شکل (۱۵)	افت ولتاژ در PCC1 (%) Voltage droop		دامنه ولتاژ KV						
	مقدار اولیه		مقدار میانگین (در حالت جزیره‌ای)						
	2.5%	5	4.89						

با مقایسه نتایج جدول (۸) با نتایج حاصل از تخصیص توان در حالت جزیره‌ای به کمک کنترل‌کننده LQR که در جدول (۳) آمده است، می‌توان دید با وجود کنترل‌کننده PID، رفتار گذرای سیستم تا حد زیادی بهبود می‌یابد و پس از اتصال دوباره میکروگرید به شبکه اصلی برق (در زمان ۱ ثانیه)، توزیع توان به‌سرعت به حالت پایدار خود می‌رسد و دیگر از نوسانات توان خبری نخواهد بود.

۳-۱- عملکرد روش پیشنهادی در شرایط مختلف بهره‌برداری و مقایسه عملکرد این روش با روش‌های دیگر

در جدول ۹، نتایج حاصل از مقایسه روش پیشنهادی با روش کنترل LQR با پارامترهای ثابت برای سه حالت بارگذاری مختلف نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در هر سه حالت بارگذاری دارای مقادیر کمتری برای فراجهش توان، نوسان ولتاژ و زمان

جدول (۱۰): مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با روش‌های دیگر در زمینه کنترل میکروگرید

زمان بازیا بی توان (s)	نوسان ولتاژ (V)	فراجهش توان (MW)	روش کنترل	مقاله
0.01	0.002	0.0001	پیشنهادی	این تحقیق
0.02	0.003	0.0002	LQR با پارامترهای ثابت	[1]
0.02	0.003	0.0002	LQR با پارامترهای متغیر	[2]
0.03	0.004	0.0003	PID	[3]

عملکرد گذرای میکروگرید را در هنگام وقوع حالت جزیره‌ای بهبود بخشید. در راهکار دوم، کارایی بالا، طراحی مناسب و سادگی پیاده‌سازی بعد از طراحی از جمله عواملی بودند که باعث استفاده از کنترل‌کننده PID برای رسیدن به هدف مدنظر شدند. به منظور بررسی صحت عملکرد کنترل‌کننده، کارایی آن در بهبود کیفیت توان میکروگریدهای شامل ۱ منبع تولید پراکنده و ۲ منبع تولید پراکنده سنجدیده شد. ضرایب کنترل‌کننده PID با استفاده از الگوریتم تکاملی اجتماع ذرات محاسبه شدند و در نهایت شکل موج‌های ولتاژ و تخصیص توان حقیقی برای هر دو حالت ترسیم شد. با مقایسه این شکل موج‌ها با شکل‌های به دست آمده با حضور کنترل‌کننده LQR، مشاهده کردیم که کنترل‌کننده PID پیشنهادی پاسخ گذرای سیستم و کیفیت توان شبکه را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. ذکر این نکته شایان توجه است که کنترل‌کننده LQR پیشنهادی در برقراری تعادل و پایداری میکروگرید در حالت متصل به شبکه عملکرد موفق‌تری داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از معرفی دو ساختار مختلف برای میکروگرید، چگونگی تأثیر کنترل‌کننده پیشنهادی بر عملکرد این میکروگریدها در حالت‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه بررسی شده است. پس از شبیه‌سازی مشاهده کردیم که کنترل‌کننده LQR در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای، تعادل سیستم را تا حد مناسبی تأمین می‌کند و تخصیص توان دلخواه را در میکروگرید برقرار می‌کند؛ اما در هنگام جدایی شبکه و وقوع حالت جزیره‌ای و رفع این حالت (اتصال مجدد به شبکه قدرت)، تا رسیدن سیستم به شرایط پایدار، مدت زمانی طول کشیده است و توان‌های حقیقی و راکتیو در این حالت‌ها دارای مقادیری فراجهش و فروجهش نسبت به حالت پایدار خود بودند. در ادامه، به منظور اصلاح عملکرد گذرای میکروگریدها در هنگام وقوع حالت جزیره‌ای، دو راهکار کنترلی معرفی شدند که عبارت بودند از: ۱- به دست آوردن پارامترهای شاخص LQR با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات و ۲- طراحی کنترل‌کننده PID در حلقه فیدبک با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات. در راهکار اول، پس از محاسبه پارامترهای شاخص LQR با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات برای میکروگرید شامل دو منبع تولید پراکنده، مشاهده کردیم که با انتخاب مناسب پارامترهای شاخص LQR می‌توان

مراجع

- [1] M. Elsis, "New design of robust PID controller based on meta-heuristic algorithms for wind energy conversion system," *Wind Energy*, Vol. 23, No. 2, 2020.
- [2] Bharat Verma, and Prabin Kumar Padhy, "Robust Fine Tuning of Optimal PID Controller With Guaranteed Robustness," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 67, No. 6, 2020.
- [3] M. Zolfaghari, M. Abedi, and G.B. Gharehpetian, "Robust Nonlinear State Feedback Control of Bidirectional Interlink Power Converters in Grid-Connected Hybrid Microgrids" *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 1, 2020.
- [4] M. Farrokhhabadi et al., "Microgrid stability definitions, analysis, and examples," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 35, No. 1, 2020.
- [5] Jae.Young Park, and Jaepil Ban, "Supplementary Feedforward Control of DGs in a Reconfigurable Microgrid for Load Restoration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 12, No. 6, 2021.
- [6] O. Basse, K. L. Butler-Purry and B. Chen, "Dynamic modeling of sequential service restoration in islanded single master microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 35, No. 1, pp. 202-214, Jan. 2020.
- [7] H. Yang, R. Tu, K. Wang et al., "Hybrid predictive control for a Current Source converter in an aircraft DC microgrid," *Energies*, Vol. 12, No. 21, 2019.

- [12] B. Chen, Z. Ye, C. Chen, and J. Wang, "Toward a MILP Modeling Framework for Distribution System Restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018.
- [13] K. P. Schneider et al., "Improving Primary Frequency Response to Support Networked Microgrid Operations," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, No. 1, pp. 659-667, 2019
- [14] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, "Feedback Control of Dynamic Systems", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 4th edition, 2002.
- [15] A. Qing, "Electromagnetic inverse scattering of multiple Two-dimensional perfectly conducting objects by the differential evolution strategy," *IEEE transactions on antennas and propagation*, Vol. 51, No. 6, June 2003.
- [16] Mohammad Mehdi Mobashsher, Reza Keypour, Mehdi Savaghebi, "Distributed optimal voltage control in islanded microgrids", *Int Trans Electr Energ Syst*. 2021.
- [8] T. Qingfang, X. Ruiqi, and H. Xiao, "Integral sliding mode-based model predictive current control with low computational amount for three-level neutral-point-clamped inverter-fed PMSM drives," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 35, pp. 2249–2260, 2020.
- [9] W. Wusen, "Model predictive torque control for dual three-phase PMSMs with simplified deadbeat solution and discrete space-vector modulation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 32, No. 2, 2021.
- [10] F. Donoso, A. Mora, R. Cardenas, A. Angulo, D. Saez, and M. Rivera, "Finite-set model-predictive control strategies for a 3L-NPC inverter operating with fixed switching frequency," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 5, pp. 3954–3965, 2018.
- [11] O. Basseby and K. L. Butler-Purry, "Modeling Single-Phase PQ Inverter for Unbalanced Power Dispatch in Islanded Microgrid," in *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, pp. 1-6, 2019.

¹ Seamless Grid-Connected Inverter

² State feedback controller

³ Linear quadratic regulator

⁴ Particle Swarm Optimization

⁵ State Feedback LQR

⁶ The controlled output

⁷ weighting matrix

⁸ control penalty

⁹ Bryson's rule

¹⁰ positive-definite

¹¹ Algebraic Riccati Equation

¹² Gain matrix

¹³ Discrete time linear quadratic regulator

¹⁴ Weighting matrix

¹⁵ The measured output

¹⁶ Voltage Droop

¹⁷ Particle Swarm Optimization (PSO)