

مدل سازی دینامیکی ریزشبکه جزیره‌ای و بهبود پایداری سیگنال کوچک آن با فیدبک کنترل کننده حالت

کمال سعادت^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ رضا نوروزیان^۲، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - kamalsaadati7@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - noroozian@znu.ac.ir

چکیده: ریزشبکه‌ها چالش‌های فراوانی از جمله خاصیت تصادفی بودن را در تولیدات خود دارند در نتیجه تولید انرژی از منابع تولید پراکنده دائماً در حال نوسان خواهد بود، به همین دلیل مطالعه بر روی پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه از اهمیت خاصی برخوردار است. این مقاله، به مدل سازی دینامیکی ریزشبکه جزیره‌ای و استفاده از فیدبک کنترل کننده حالت^۱ به عنوان پایدار ساز سیستم قدرت، جهت بهبود پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه و میرایی نوسانات فرکانس پایین دیزل ژنراتور ریزشبکه، می پردازد. پارامترهای کنترل کننده‌های منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و فیدبک کنترل کننده حالت، به منظور پایداری سیگنال کوچک و میرایی نوسانات فرکانس پایین، با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شده‌اند. نتایج شبیه سازی صحت و اثر بخشی پایدار ساز سیستم قدرت ارائه شده را با استفاده از تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه ریزشبکه و برخی از شاخص های مطالعات (مانند سرعت رتور و زاویه رتور)، نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، پایداری سیگنال کوچک، پایدار ساز سیستم قدرت، مقادیر ویژه.

Dynamic Modeling of the Island Microgrid and Improve Small Signal Stability with State Feedback Controller

K. Sa'adati¹, Msc Student; R. Noroozian², Associate Professor

1- Department of Electrical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: kamalsaadati7@gmail.com

2- Department of Electrical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: noroozian@znu.ac.ir

Abstract: The microgrids have abundant challenges included random properties inside their productions in which as a result of energy generation of distributed generators will be subsequently fluctuated. So this is why studying about small signal stability in microgrids has great importance of us. Therefore, in this paper, the microgrid based small signal stability performance is investigated. Also, this paper focus on the dynamic modeling of island microgrid in use of state feedback controller as a power system stabilizer in case of small signal stability of microgrids and making damped diesel generator's low frequency fluctuations improvement. Distributed generation resources controller's parameters based on the inverter and state feedback controller for the damped and sustainability of signals low frequency fluctuations purpose has been optimized by genetic algorithms. Upcoming simulation results obviously show the correctness and the impact on power system stabilizer by using of eigenvalues of microgrid analysis and some studies criteria.

Keywords: Microgrid, Small Signal Stability, Power System Stabilizer, Eigenvalues

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۴

نام نویسنده مسئول: رضا نوروزیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - بلوار دانشگاه - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

کمبود سوخت‌های فسیلی، آسیب‌پذیری شبکه‌های قدرت بزرگ و خاموشی‌های ناشی از آنها روزبه‌روز به عامل جدی بدل می‌شود. بنابراین منابع تولید تجدیدپذیر مانند باد، خورشید و غیره، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال به دلیل تولید تصادفی و عدم قطعیت ناشی از شرایط اقلیمی، اتصال این منابع به شبکه سراسری بسیار مشکل است [۱، ۲].

با یکپارچه‌سازی منابع تولید پراکنده، منابع ذخیره‌سازی انرژی، انواع بارها، دستگاه‌های کنترل و اتوماسیون در ریزشبه، ارتباط بین منابع تجدیدپذیر و شبکه برق تحقق پیدا می‌کند. به عبارتی ریزشبه سیستم قدرت کوچکی شامل منابع تولید پراکنده (توربین‌های بادی، موتور دیزلی و غیره)، بارها و کنترل‌کننده‌ها است که توانایی عملکرد مستقل از شبکه سراسری را دارد. [۳].

در حال حاضر، تحقیقات روی ریزشبه‌ها عمدتاً بر روی ظرفیت و طراحی بهینه سیستم، کنترل تولیدکننده‌ها، مدل‌سازی و شبیه‌سازی و کیفیت توان و غیره بوده در حالی که مطالعات اندکی روی پایداری آن صورت گرفته است. این در حالی است که پایداری و قابلیت اطمینان تولیدات، برای بارها و شبکه سراسری اساس کار ریزشبه است. بنابراین مطالعه پایداری ریزشبه‌ها امری مهم و ضروری می‌باشد [۴]. پایداری ریزشبه شامل دو بخش است: یکی پایداری سیگنال کوچک و دیگری پایداری گذرا در مفهوم اختلالات بزرگ است. به جز اختلالات بزرگ، قدرت خروجی از توربین‌های بادی، آرایه‌های فتوولتائیک و دیگر منابع تجدیدپذیر متغیر با زمان می‌باشند، که می‌توانند به عنوان اختلالات کوچک لحاظ گردند. این نوسانات بسیار رایج هستند به طوریکه موجب وقوع نوسانات فرکانس پایین در ریزشبه‌ها می‌شوند و به صورت پیوسته نحوه کار ریزشبه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این مشکل مربوط به میرایی ناکافی نوسان‌های سیستم است و معمولاً با به کارگیری پایدارسازهای سیستم قدرت جهت کنترل تحریک سیستم‌های ژنراتور که اقتصادی‌ترین روش تقویت پایداری است، میرایی این نوسانات را افزایش داد [۵]. کار پایدارساز سیستم قدرت افزودن میرایی به نوسان‌های رتور ژنراتور به وسیله کنترل تحریک آن با استفاده از سیگنال‌های پایدارساز کمکی است. در واقع پایدارساز با مدوله کردن تحریک ژنراتور، یک مؤلفه گشتاور الکتریکی میراکننده جهت میرایی نوسانات به وجود می‌آورد.

مدل‌های دینامیکی متنوعی برای بررسی پایداری سیگنال کوچک ریزشبه با منابع معمولی و الکترومکانیکی ارائه شده‌اند [۶، ۷]. یک مدل دینامیکی از یک اینورتر برای مطالعات پایداری سیگنال کوچک در مرجع [۸] مورد بررسی قرار گرفته است و اهمیت ساختار سیستم، تنوع منابع و انرژی ذخیره شده در مرجع [۹] بیان شده است. تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه و مکان هندسی ریشه‌ها به صورت گسترده‌ای برای تحلیل پایداری سیگنال کوچک در مقالات استفاده شده است. در این مقاله نیز از مقادیر ویژه استفاده شده است. با استفاده از مقادیر ویژه،

ریزشبه زمانی پایدار است که قسمت حقیقی تمام مقادیر ویژه آن سمت چپ محور موهومی باشند، اگر حداقل یک مقدار ویژه هم دارای قسمت حقیقی مثبت باشد، ریزشبه ناپایدار است.

در مطالعات متعددی تأثیر انواع پایدارساز سیستم قدرت بر بهبود پایداری سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون متصل به شین بی‌نیاهیت بررسی شده است، در این مقاله تأثیر فیدبک کنترل‌کننده حالت، به عنوان پایدارساز سیستم قدرت دیزل ژنراتور، بر پایداری سیگنال کوچک دیزل ژنراتور و ریزشبه مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل پایداری سیگنال کوچک به منظور خطی‌سازی معادلات سیستم، فرض می‌شود اغتشاشات به اندازه کافی کوچک هستند و بدین ترتیب معادلات را می‌توان حول نقطه کار اولیه خطی کرد در این راستا این مقاله ابتدا مدل خطی کامل ریزشبه مورد مطالعه را جهت بررسی پایداری سیگنال کوچک به دست می‌آورد و سپس برای بهبود پایداری سیگنال کوچک ریزشبه، پیشنهاد استفاده از فیدبک کنترل‌کننده حالت را به عنوان پایدارساز سیستم قدرت در دیزل ژنراتور، می‌دهد. صحت و کارایی پایدارساز پیشنهادی در ریزشبه نمونه بررسی شده است. از الگوریتم ژنتیک نیز برای بهینه‌سازی پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت و کنترل‌کننده‌های منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر استفاده شده است.

ساختار مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲، مدل خطی کامل و ماتریس فضای حالت را برای ریزشبه مورد مطالعه در مد جزیره‌ای ارائه شده و در بخش ۳، به طراحی پایدارساز سیستم قدرت دیزل ژنراتور پرداخته شده است. در بخش ۴، نحوه تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده‌های منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و پایدارسازهای سیستم قدرت بیان شده است. در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده و در بخش ۶، نتیجه گیری آورده شده است.

۲- مدل‌سازی سیگنال کوچک ریزشبه در مد جزیره‌ای

یکی از ویژگی‌های ریزشبه امکان عملکرد آن در دو حالت متصل به شبکه و مستقل از شبکه (جزیره‌ای) می‌باشد. در مد عملکرد مستقل، منابع تولید پراکنده به منظور تغذیه تمام توان مورد نیاز بارهای محلی در حالتی که ولتاژ و فرکانس در محدوده مجاز می‌باشند، کنترل شده‌اند. در زمان عملکرد جزیره‌ای ریزشبه، منابع تولید پراکنده، که در حال تغذیه سیستم هستند، وظیفه نگهداری ولتاژ و فرکانس ریزشبه را در حد مطلوب دارند. در این مقاله از روش کنترلی بر مبنای اندازه‌گیری‌های محلی برای منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر استفاده شده است.

شیوه مدل‌سازی ارائه شده برای ریزشبه مورد مطالعه شکل ۱ به این صورت است که، سیستم را به ۴ زیر سیستم اصلی تقسیم می‌کند. دیزل ژنراتور، منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر، شبکه و بارها.

منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و دیزل ژنراتور هر کدام در قالب مرجع خودش مدل شده است. مدل منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر شامل دینامیک‌های کنترل‌کننده توان، فیلترخروجی، الفاکر

که δ زاویه رتور، ω_0 سرعت نامی، ω سرعت زاویه ای رتور، P_e توان الکتریکی خروجی، P_m توان مکانیکی ورودی، D ضریب میرایی، M ثابت لختی، T_{d0} ثابت زمانی گذر (ثابت زمانی مدار باز)، E_{fd} ولتاژ خروجی سیستم تحریک، X_d و X'_d به ترتیب راکتانس سنکرون و گذرای محور طولی، I_{d0} جریان استاتور در محور طولی، I_{q0} جریان استاتور در محور عرضی، e'_q ولتاژ گذرای محور عرضی و e'_d ولتاژ گذرای محور طولی و K_A و T_A گین و ثابت زمانی سیستم کنترل ولتاژ هستند.

مدل کامل فضای حالت (سیگنال کوچک) دیزل ژنراتور با استفاده

از روابط (۳) تا (۸) به صورت زیر نوشته می شود:

$$[\Delta \dot{X}_G] = A_g [\Delta X_G] + B_{lg} [\Delta I_{dqq}] \quad (9)$$

$$[\Delta V_{dqq}] = P_g [\Delta X_G] + Z_g [\Delta I_{dqq}] \quad (10)$$

ماتریس های روابط (۹) و (۱۰) به شکل زیر می باشند:

$$[\Delta X_G] = [\Delta \omega \quad \Delta \delta \quad \Delta e'_q \quad \Delta E_{fd}]^T \quad (11)$$

$$[\Delta V_{dqq}] = \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[\Delta I_{dqq}] = \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$A_g = \begin{bmatrix} \frac{-D}{M} & \frac{-K_1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_4}{T'_{d0}} & \frac{-1}{T'_{d0} \cdot K_3} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & \frac{-K_A \cdot K_5}{T_A} & \frac{-K_A \cdot K_6}{T_A} & \frac{-1}{T_A} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B_{lg} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_{lg2,1} & B_{lg2,2} \\ 0 & \frac{X'_q - X_d}{T'_{q0}} \\ \frac{X'_d - X_q}{T'_{d0}} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B_{lg2,1} = \frac{-1}{M} (V_{d0} + R_a I_{d0} + X'_q I_{q0}) \quad (16)$$

$$B_{lg2,2} = \frac{-1}{M} (V_{q0} + R_a I_{q0} + X'_d I_{d0}) \quad (17)$$

$$Z_g = \begin{bmatrix} -R_a & -X'_q \\ -X'_d & -R_a \end{bmatrix} \quad (18)$$

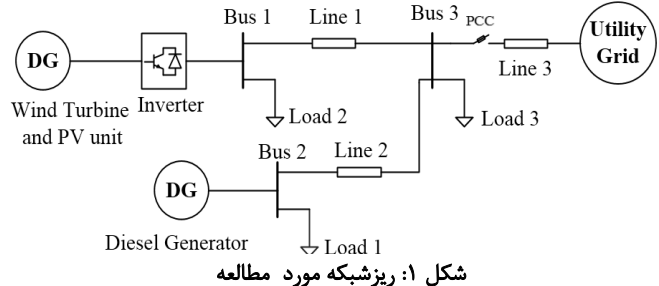
$$P_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

K_1 تا K_6 مقادیر ثابتی هستند و R_a مقاومت استاتور است.

با کمک روابط (۱) و (۲)، روابط (۱۲) و (۱۳) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} = [T_{s0}^{-1}] \begin{bmatrix} \Delta V_D \\ \Delta V_Q \end{bmatrix} + [R_{Vg}] \Delta X_g \quad (20)$$

کوپلینگ و کنترل کننده ولتاژ و جریان می باشد. در این مقاله معادلات حالت شبکه و بارها، در قاب مرجع دیزل ژنراتور در نظر گرفته شده است. منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر به کمک تکنیک های انتقال که در رابطه ۱ نشان داده شده است، به قاب مرجع مشترک انتقال داده شده است. رابطه ۲ ماتریس تابع انتقال است.



شکل ۱: ریزشکبه مورد مطالعه

$$[f_{DQ}] = [T_i] f_{dq} \quad (1)$$

$$[T_i] = \begin{bmatrix} \cos(\delta_i) & -\sin(\delta_i) \\ \sin(\delta_i) & \cos(\delta_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

در رابطه (۱) دستگاه D-Q قاب مرجع دیزل ژنراتور و $(d-q)_i$ قاب مرجع اینورتر می باشند و δ_i زاویه قاب مرجع اینورتر نسبت به قاب مرجع دیزل ژنراتور است.

۲ + مدل فضای حالت دیزل ژنراتور

برای مدل خطی دیزل ژنراتور از [۱۰-۱۲] استفاده شده است. پارامترهای دیزل ژنراتور در جدول ۱ آورده شده است. معادلات ولتاژ استاتور دیزل ژنراتور عبارتند از:

$$\begin{aligned} V_d &= e'_d - R_a I_d - X'_q I_q \\ V_q &= e'_q - R_a I_q + X'_d I_d \end{aligned} \quad (3)$$

توان اکتیو و راکتیو به صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} P &= e'_d I_d + e'_q I_q \\ Q &= e'_d I_q - e'_q I_d \end{aligned} \quad (4)$$

روابط معادلات خطی برای دیزل ژنراتور به صورت زیر هستند:

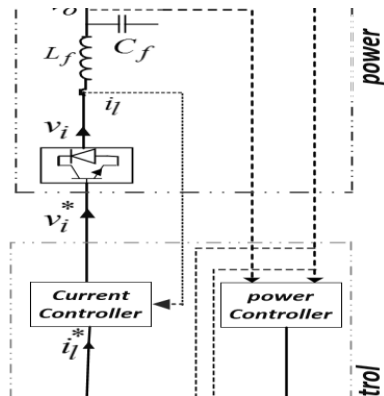
$$\dot{\delta} = \omega_0 (\omega - 1) \quad (5)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_m - P_e - D\omega) \quad (6)$$

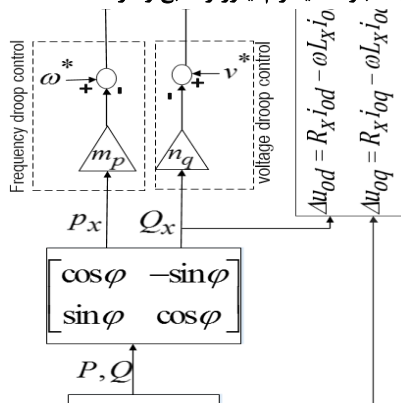
$$\dot{e}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [-e'_q + (X'_d - X_d) I_{d0} + E_{fd}] \quad (7)$$

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{K_A}{T_A} E_{fd} \quad (8)$$

برای ریز شبکه، تجهیزاتی مانند ترانسفورماتور سبب انتقال توان امپدانس القایی و کاهش سرعت حلقه های کنترلی $Q-f$ و $P-U$ و آسیب رساندن به پایداری سیستم می شود، که این مشکل با تجزیه توان حل می شود.



شکل ۲: بلوک دیاگرام اینورتر منبع ولتاژ [۱۳]



شکل ۳: بلوک دیاگرام کنترل کننده توان [۱۵]

در کنترل کننده توان از روش دروپ که در ژنراتور سنکرون نیز استفاده می شود، استفاده می کنند. در اینورتر با افزایش بار فرکانس مرجع کاهش می یابد. مؤلفه های گذرای توان اکتیو ($\tilde{p}$) و راکتیو ($\tilde{q}$) از ولتاژ و جریان خروجی اندازه گیری شده مطابق رابطه (۳۳) به دست آمده اند:

$$\tilde{p} = v_{od}i_{od} + v_{oq}i_{oq}, \tilde{q} = v_{od}i_{oq} - v_{oq}i_{od} \quad (33)$$

مؤلفه های گذرای توان از فیلترهای پایین گذر عبور کرده تا مؤلفه های اصلی P و Q به دست آیند. ω_c فرکانس قطع فیلتر پایین گذر توان است.

$$P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \tilde{p}, Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \tilde{q} \quad (34)$$

توان اکتیو و راکتیو مجازی به صورت زیر هستند:

$$P_x = P \sin \phi - Q \cos \phi, Q_x = P \cos \phi + Q \sin \phi \quad (35)$$

ϕ زاویه امپدانس خط اینورتر، P_x, Q_x توان راکتیو و اکتیو مجازی هستند.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{-1}_{s0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_D \\ \Delta I_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{lg} \end{bmatrix} \Delta X_g \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} T^{-1}_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_0 & \sin \delta_0 \\ -\sin \delta_0 & \cos \delta_0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} R_{Vg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{q0} & 0 & 0 & 0 \\ -V_{d0} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} R_{lg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{q0} & 0 & 0 & 0 \\ -I_{d0} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

که δ_0 زاویه بین قاب مرجع اینورتر منبع ولتاژ و دیزل ژنراتور، V_{dq0} و I_{dq0} ولتاژ و جریان خروجی در نقطه کار هستند.

مدل کامل فضای حالت دیزل ژنراتور با استفاده از روابط (۷) تا (۲۲):

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_G \end{bmatrix} = A_G \Delta X_G + B_G \Delta V_{bDQG} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_G \end{bmatrix} = C_G \Delta X_G + D_G \Delta V_{bDQG} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_D \\ \Delta I_Q \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{bdqG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_D \\ \Delta V_Q \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$A_G = A_g + B_{lg} Z_g^{-1} (R_{vg} - P_g) \quad (29)$$

$$B_G = B_{lg} Z_g^{-1} T_{s0}^{-1} \quad (30)$$

$$C_G = T_{s0} \left[Z_g^{-1} (R_{vg} - P_g) - R_{lg} \right] \quad (31)$$

$$D_G = T_{s0} Z_g^{-1} T_{s0}^{-1} \quad (32)$$

۲-۴ مدل سیگنال کوچک منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر

اینورترهای منبع ولتاژ معمولاً برای ارتباط منابع تولید پراکنده با شبکه به کار می روند. قسمت پردازشگر توان شامل یک اینورتر، یک فیلتر LC خروجی و الفاکر کوپلینگ است.

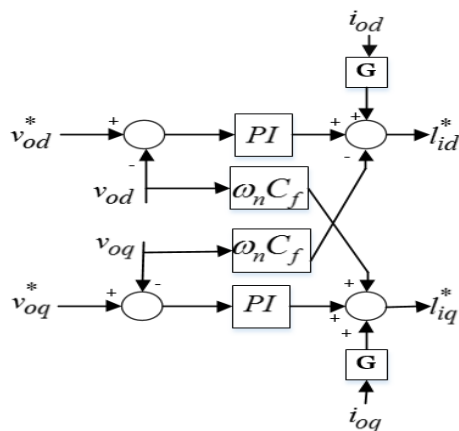
کنترل کننده منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر را مطابق شکل ۲، می توان به ۳ قسمت جداگانه تقسیم کرد. قسمت اول حلقه کنترل توان خارجی می باشد که دامنه و فرکانس مؤلفه های اصلی ولتاژ خروجی اینورتر را مطابق با مشخصه های کاهشی تنظیم می کند. قسمت های دوم و سوم، کنترل کننده های جریان و ولتاژ هستند که به منظور جلوگیری از اختلالات فرکانس بالا و فراهم سازی میرایی لازم برای فیلتر خروجی، تنظیم شده اند (پارامترهای منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر در جدول ۲ آورده شده است) [۱۳-۱۵].

۲-۱-۲ کنترل کننده توان

شکل ۳ بلوک دیاگرام کنترل کننده توان است.

۲-۲-۲- کنترل کننده ولتاژ

کنترل ولتاژ خروجی با استفاده از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرال گیر انجام شده است شکل ۴.



شکل ۴: بلوک دیاگرام کنترل کننده ولتاژ [۱۳]

معادلات کنترل کننده ولتاژ عبارتند از:

$$\frac{d\phi_d}{dt} = v_{od}^* - v_{od}, \quad \frac{d\phi_q}{dt} = v_{oq}^* - v_{oq} \quad (47)$$

$$i_{lq}^* = G i_{od} - \omega_n C_f v_{oq} + K_{pv}(v_{od}^* - v_{od}) + K_{iv}\phi_d \quad (48)$$

$$i_{lq}^* = G i_{oq} - \omega_n C_f v_{od} + K_{pv}(v_{oq}^* - v_{oq}) + K_{iv}\phi_q \quad (49)$$

فرم فضای حالت سیگنال کوچک کنترل کننده ولتاژ عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\phi_{dq} \end{bmatrix} + B_{v1} \begin{bmatrix} \Delta v_{odq}^* \end{bmatrix} + B_{v2} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta v_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$B_{v1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{v2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{ldq}^* \end{bmatrix} = C_v \begin{bmatrix} \Delta\phi_{dq} \end{bmatrix} + D_{v1} \begin{bmatrix} \Delta v_{odq}^* \end{bmatrix} + D_{v2} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta v_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$C_v = \begin{bmatrix} K_{iv} & 0 \\ 0 & K_{iv} \end{bmatrix}, D_{v1} = \begin{bmatrix} K_{pv} & 0 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$D_{v2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_{pv} & -\omega_n C_f & G & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n C_f & -K_{pv} & 0 & G \end{bmatrix} \quad (54)$$

که K_{pv} ضریب تناسبی کنترل کننده ولتاژ، K_{iv} ضریب انتگرالی کنترل کننده ولتاژ، ϕ_{dq} متغیرهای حالت کنترل کننده ولتاژ، v_{odq}^* ولتاژ مرجع خروجی اینورتر، i_{ldq}^* جریان مرجع فیلتر، G بهره مسیر پیش روی جریان در کنترل کننده ولتاژ، ω_n فرکانس نامی شبکه، C_f خازن فیلتر LC هستند.

۲-۲-۳- کنترل کننده جریان

مقاومت و اندوکتانس مجازی با استفاده از توان راکتیو مجازی به صورت زیر به دست می آیند:

$$R_x = K Q_x \cos \varphi \quad (36)$$

$$L_x = (K Q_x \sin \varphi) / \omega_0$$

روابط (۳۷) و (۳۸) کنترل کننده توان خروجی اینورتر هستند که در شکل (۴) قابل مشاهده هستند.

$$\omega = \omega^* - m_p P_x \quad (37)$$

$$E = E^* - n_q Q_x \quad (38)$$

که در این روابط m_p و n_q بهره های کاهشی فرکانس و ولتاژ، ω به ترتیب فرکانس زاویه ای و ولتاژ مرجع تعیین شده توسط کنترل کننده افقی، ω^* و E^* فرکانس زاویه ای مرجع و ولتاژ مرجع هستند.

با خطی سازی، مدل سیگنال کوچک کنترل کننده توان به صورت فضای حالت زیر قابل تعریف است:

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta v_{odq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{p\omega} \\ C_{pv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{1 \times 6} \\ D_{pv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta v_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{1 \times 6} \\ D_{pv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & -m_p \sin \varphi & n_q \cos \varphi \\ 0 & -\omega_c & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_c \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_c I_{od} & \omega_c I_{oq} & \omega_c U_{od} & \omega_c U_{oq} \\ 0 & 0 & -\omega_c I_{oq} & \omega_c I_{od} & \omega_c U_{oq} & \omega_c U_{od} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$B_{p\omega} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$C_{p\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -m_p \sin \varphi & n_q \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$C_{pv} = \begin{bmatrix} 0 & -a_2 I_{od} + a_1 I_{oq} \\ 0 & -a_1 I_{od} - a_2 I_{oq} - n_q \cos \varphi \\ & -a_1 I_{od} + a_3 I_{oq} \\ & -a_3 I_{od} - a_1 I_{oq} - n_q \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$D_{pv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_2 P - a_1 Q & a_1 P + a_3 Q \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_1 P - a_3 Q & -a_2 P - a_1 Q \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$D_{pvc} = \frac{-a_1 P - a_3 Q}{\omega_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (46)$$

که k ضریب $a_1 = k \sin^2 \varphi$, $a_2 = k \cos^2 \varphi$, $a_3 = k \sin \varphi \cos \varphi$

ثابت، ω_0 فرکانس در نقطه کار شبکه، I_{odq} ولتاژ و جریان خروجی اینورتر در نقطه کار (حالت ماندگار)، v_{odq} ولتاژ و جریان خروجی اینورتر و i_{ldq} جریان فیلتر LC هستند.

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} = A_{LCL} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta v_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} + B_{LCL1} [\Delta v_{idq}] + B_{LCL2} [\Delta v_{bdq}] + B_{LCL3} [\Delta \omega] \quad (63)$$

$$B_{LCL1} = \begin{bmatrix} B_{ULCL1} \\ [0]_{2 \times 2} \end{bmatrix}, B_{ULCL1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (64)$$

$$B_{LCL2} = \begin{bmatrix} [0]_{2 \times 4} \\ B_{DLCL2} \end{bmatrix}, B_{DLCL2} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{L_c} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L_c} \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$B_{LCL3} = \begin{bmatrix} B_{ULCL3} \\ B_{DLCL3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{lq} & -I_{ld} & v_{oq} & v_{od} \\ I_{oq} & -I_{od} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (66)$$

$$A_{LCL} = \begin{bmatrix} A_{ULCL} \\ A_{DLCL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega_0 & \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega_0 & \frac{-1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega_0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & 0 & \frac{-R_c}{L_c} & -\omega_0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_c} & -\omega_0 & \frac{-R_c}{L_c} \end{bmatrix} \quad (67)$$

۲-۵- مدل کامل منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر

برای اتصال منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر به سیستم، تمام متغیرهای خروجی باید به قاب مرجع مشترک منتقل شوند. متغیرهای خروجی جریان های خروجی هستند که به صورت بردار Δi_{odq} نشان داده شده اند. جریان خروجی در قاب مرجع مشترک توسط رابطه (۶۸) حاصل می شود.

$$[\Delta i_{oDQ}] = [T_s] [\Delta i_{odq}] + [T_c] [\Delta \delta] \quad (68)$$

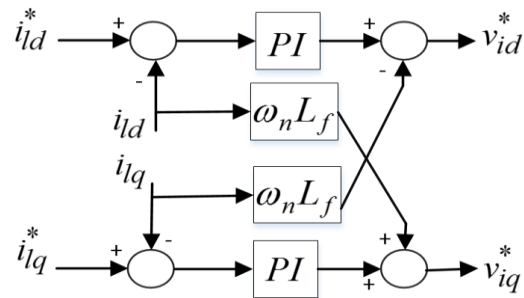
$$T_s = \begin{bmatrix} \cos \delta_0 & -\sin \delta_0 \\ \sin \delta_0 & \cos \delta_0 \end{bmatrix} \quad (69)$$

$$T_c = \begin{bmatrix} -I_{od} \sin \delta_0 & -I_{oq} \cos \delta_0 \\ I_{od} \cos \delta_0 & -I_{oq} \sin \delta_0 \end{bmatrix}$$

به طور مشابه، سیگنال ورودی به اینورتر، ولتاژ باس است که در

قاب مرجع مشترک بیان شده است. با تبدیل های معکوس زیر رابطه (۷۰)، می توان ولتاژ باس را به قاب مرجع اینورتر منتقل نمود.

کنترل جریان القاگر فیلتر خروجی با یک کنترل کننده تناسبی-انتگرال گیر انجام شده است شکل ۵.



شکل ۵: بلوک دیاگرام کنترل کننده جریان [۱۳]

معادلات جبری عبارتند:

$$\frac{d\gamma_d}{dt} = i_{ld}^* - i_{ld}, \frac{d\gamma_q}{dt} = i_{lq}^* - i_{lq} \quad (55)$$

$$v_d^* = -\omega_n L_f i_{lq} + K_{pc}(i_{ld}^* - i_{ld}) + K_{ic} \gamma_d \quad (56)$$

$$v_q^* = -\omega_n L_f i_{ld} + K_{pc}(i_{lq}^* - i_{lq}) + K_{ic} \gamma_q \quad (57)$$

فرم فضای حالت (سیگنال کوچک) کنترل کننده جریان عبارت است از:

$$[\Delta \dot{\gamma}_{dq}] = [0] [\Delta \gamma_{dq}] + B_{c1} [\Delta i_{ldq}^*] + B_{c1} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta v_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$B_{c1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{c2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$[\Delta v_{dq}^*] = C_c [\Delta \gamma_{dq}] + D_{c1} [\Delta i_{ldq}^*] + D_{c2} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta v_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$C_c = \begin{bmatrix} K_{ic} & 0 \\ 0 & K_{ic} \end{bmatrix}, D_{c1} = \begin{bmatrix} K_{ic} & 0 \\ 0 & K_{ic} \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$D_{c1} = \begin{bmatrix} -K_{pc} & -\omega_n L_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_n L_f & -K_{pc} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (62)$$

که K_{pc} ضریب تناسبی کنترل کننده جریان، K_{ic} ضریب انتگرالی کنترل کننده جریان، γ_{dq} متغیرهای حالت کنترل کننده جریان و L_f اندوکتانس فیلتر LC هستند.

۲-۴- فیلتر LC خروجی و اندوکتانس کوپلینگ

مدل سیگنال کوچک این قسمت، با فرض تولید ولتاژ تقاضا توسط اینورتر به صورت زیر قابل بیان است (I_{ldq} جریان فیلتر در نقطه کار، L_c اندوکتانس کوپلینگ و R_c, R_f مقاومت های فیلتر LC و کوپلینگ هستند):

$$A_i = \begin{bmatrix} A_p & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & B_p \\ A_{21} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & A_{24} \\ A_{31} & B_{c1}C_v & 0_{2 \times 2} & A_{34} \\ A_{41} & B_{LCL1}D_{c1}C_v & B_{LCL1}C_c & A_{44} \end{bmatrix}_{13 \times 13} \quad (۸۴)$$

۳-۲- مدل شبکه و بار

مدل فضای حالت سیگنال کوچک شبکه و بار شبکه نمونه مورد مطالعه با استفاده از [۱۶] به صورت زیر هستند (پارامترهای خطوط و بارها در جدول ۳ آورده شده است).

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{lineDQ} \end{bmatrix} = A_{NET} \begin{bmatrix} \Delta i_{lineDQ} \end{bmatrix} + B_{1NET} \begin{bmatrix} \Delta v_{bDQ} \end{bmatrix} + B_{2NET} \Delta \omega \quad (۸۵)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{loadDQ} \end{bmatrix} = A_{load} \begin{bmatrix} \Delta i_{loadDQ} \end{bmatrix} + B_{load} \begin{bmatrix} \Delta v_{bDQ} \end{bmatrix} + B_{2load} \Delta \omega \quad (۸۶)$$

$$A_{NET} = \begin{bmatrix} \frac{-r_{line2}}{L_{line2}} & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 & \frac{-r_{line2}}{L_{line2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-r_{line1}}{L_{line1}} & \omega_0 \\ 0 & 0 & -\omega_0 & \frac{-r_{line1}}{L_{line1}} \end{bmatrix} \quad (۸۷)$$

$$B_{2NET} = \begin{bmatrix} i_{line2Q} & -i_{line2D} & i_{line1Q} & -i_{line1D} \end{bmatrix}^T \quad (۸۸)$$

$$A_{load1} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{load1}}{L_{load1}} & \omega_0 \\ -\omega_0 & \frac{-R_{load1}}{L_{load1}} \end{bmatrix} \quad (۸۹)$$

$$A_{load2} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{load2}}{L_{load2}} & \omega_0 \\ -\omega_0 & \frac{-R_{load2}}{L_{load2}} \end{bmatrix} \quad (۹۰)$$

$$A_{load3} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{load3}}{L_{load3}} & \omega_0 \\ -\omega_0 & \frac{-R_{load3}}{L_{load3}} \end{bmatrix} \quad (۹۱)$$

$$A_{load} = \begin{bmatrix} A_{load1} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & A_{load2} \\ 0_{2 \times 2} & A_{load3} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (۹۲)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta v_{bdq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} T_s^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{bDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_v^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \end{bmatrix} \\ T_v^{-1} &= \begin{bmatrix} -V_{bD} \sin \delta_0 + V_{bQ} \cos \delta_0 \\ -V_{bD} \cos \delta_0 + V_{bQ} \sin \delta_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (۷۰)$$

مدل کامل سیگنال کوچک فضای حالت اینورتر، با ترکیب مدل های فضای حالت کنترل کننده توان و ولتاژ و جریان و فیلتر خروجی بیان شده در روابط (۳۸)، (۳۹)، (۵۰)، (۵۲)، (۵۸)، (۶۰)، (۷۰)، (۶۸) به دست می آید.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_i \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} \Delta x_i \end{bmatrix} + B_i \begin{bmatrix} \Delta v_{cDQ} \end{bmatrix} + B_{icom} \begin{bmatrix} \Delta \omega_{com} \end{bmatrix} \quad (۷۱)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_i \\ \Delta i_{oDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{inv\omega} \\ C_{invc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \end{bmatrix} \quad (۷۲)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta & \Delta P & \Delta Q & \Delta \phi_{dq1} & \Delta \gamma_{dq1} & \Delta i_{ldq} & \Delta v_{odq} & \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (۷۳)$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 2} \\ B_{v1}D_{pvc}B_{DLCL2}T_i^{-1} \\ B_{c1}D_{v1}D_{pvc}B_{DLCL2}T_i^{-1} \\ (B_{LCL1}D_{c1}D_{v1}D_{pvc}B_{DLCL2} + B_{LCL2})T_i^{-1} \end{bmatrix}_{13 \times 2}$$

$$B_{icom} = \begin{bmatrix} B_{p\omega} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{6 \times 1} \end{bmatrix}_{13 \times 1}^T \quad (۷۵)$$

$$C_{i\omega} = \begin{bmatrix} C_{p\omega} & 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 6} \end{bmatrix}_{1 \times 13} \quad (۷۶)$$

$$C_i = \begin{bmatrix} T_c & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 4} & T_i \end{bmatrix}_{2 \times 13} \quad (۷۷)$$

$$\begin{aligned} A_{21} &= B_{v1}D_{pvc}B_{LCL2} \begin{bmatrix} T_v^{-1} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \\ &+ B_{v1}D_{pvc}B_{LCL3}C_{p\omega} + B_{v1}C_{pv} \end{aligned} \quad (۷۸)$$

$$\begin{aligned} A_{31} &= B_{c1}D_{v1}D_{pvc}B_{LCL2} \begin{bmatrix} T_v^{-1} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \\ &+ B_{c1}D_{v1}D_{pvc}B_{LCL3}C_{p\omega} + B_{c1}D_{v1}C_{pv} \end{aligned} \quad (۷۹)$$

$$\begin{aligned} A_{41} &= (B_{LCL1}D_{c1}D_{v1}D_{pvc}B_{LCL2} + B_{LCL2}) \begin{bmatrix} T_v^{-1} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \\ &+ B_{LCL1}D_{c1}D_{v1}D_{pvc}B_{LCL3}C_{p\omega} \\ &+ B_{LCL1}D_{c1}D_{v1}C_{pv} + B_{LCL3}C_{p\omega} \end{aligned} \quad (۸۰)$$

$$A_{24} = B_{v1}D_{pvc}A_{DLCL} + B_{v1}D_{pv} + B_{v2} \quad (۸۱)$$

$$\begin{aligned} A_{34} &= B_{c1}D_{v1}D_{pvc}A_{DLCL} + B_{c2} \\ &+ B_{c1}D_{v1}D_{pv} + B_{c1}D_{v2} \end{aligned} \quad (۸۲)$$

$$\begin{aligned} A_{44} &= B_{LCL1}D_{c1}D_{v1}D_{pvc}A_{LCL} \\ &+ B_{LCL1}D_{c1}D_{v1}D_{pv} + A_{LCL} \\ &+ B_{LCL1}D_{c1}D_{v2} + B_{LCL1}D_{c2} \end{aligned} \quad (۸۳)$$

$$M_{Gi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_{NET} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (103)$$

$$B_{load} = \begin{bmatrix} i_{load1Q} \\ i_{load1D} \\ i_{load2Q} \\ i_{load2D} \\ i_{load3Q} \\ i_{load3D} \end{bmatrix} \quad (93)$$

مدل کامل فضای حالت سیگنال کوچک ریز شبکه با ترکیب مدل دیزل ژنراتور رابطه (۹)، مدل اینورتر منبع ولتاژ رابطه (۷۱)، مدل خط رابطه (۸۵)، مدل بار رابطه (۸۶) و رابطه (۱۰۱) به صورت زیر به دست می آید (شکل ۶ بلوک دیاگرام سیگنال کوچک ریز شبکه را نشان می دهد):

$$B_{load1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{load1}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{load1}} \end{bmatrix} \quad (94)$$

$$B_{load2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{load2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{load2}} \end{bmatrix} \quad (95)$$

$$B_{load3} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{load3}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{load3}} \end{bmatrix} \quad (96)$$

$$B_{load} = \begin{bmatrix} B_{load1} & -B_{load1} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & B_{load2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & B_{load3} \end{bmatrix} \quad (97)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{Gi} \\ \Delta \dot{i}_{lineDQ} \\ \Delta \dot{i}_{loadDQ} \end{bmatrix} = A_{MG} \begin{bmatrix} \Delta x_{Gi} \\ \Delta i_{lineDQ} \\ \Delta i_{loadDQ} \end{bmatrix}, A_{MG} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (104)$$

$$A_{11} = A_{Gi} + B_{Gi} \Lambda_v^{-1} R_N M_{Gi} C_{Gi}$$

$$A_{12} = B_{Gi} \Lambda_v^{-1} R_N M_{NET}$$

$$A_{13} = B_{Gi} \Lambda_v^{-1} R_N M_{load}$$

$$A_{21} = B_{1NET} \Lambda_v^{-1} R_N M_{Gi} C_{Gi} + B_{2NET} C_{i\omega}$$

$$A_{22} = A_{NET} + B_{1NET} \Lambda_v^{-1} R_N M_{NET} \quad (105)$$

$$A_{23} = B_{1NET} \Lambda_v^{-1} R_N M_{load}$$

$$A_{31} = B_{load} \Lambda_v^{-1} R_N M_{load} C_{Gi} + B_{2load} C_{Gi}$$

$$A_{32} = B_{load} \Lambda_v^{-1} R_N M_{NET}$$

$$A_{33} = A_{load} + B_{load} \Lambda_v^{-1} R_N M_{load}$$

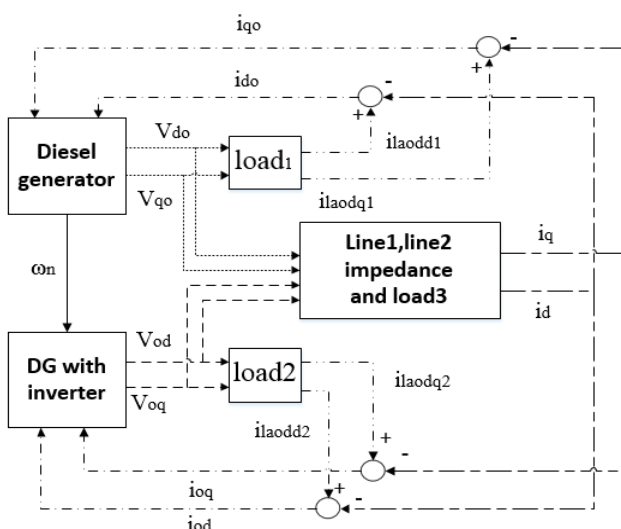
۴۲ مدل کامل ریز شبکه

ترکیب مدل دیزل ژنراتور و اینورتر منبع ولتاژ، با ترکیب مدل فضای حالت روابط (۹) و (۷۱) به صورت زیر به دست می آید:

$$[\Delta \dot{x}_{Gi}] = A_{Gi} [\Delta x_{Gi}] + B_{Gi} [\Delta v_{DQGi}] \quad (98)$$

$$[\Delta \dot{x}_{iDQGi}] = C_{Gi} [\Delta i_{DQGi}] + D_{Gi} [\Delta v_{DQGi}] \quad (99)$$

$$A_{Gi} = \begin{bmatrix} A_G & 0 \\ 0 & A_i \end{bmatrix} \quad B_{Gi} = \begin{bmatrix} B_G & 0 \\ 0 & B_i \end{bmatrix} \quad C_{Gi} = \begin{bmatrix} C_G & 0 \\ 0 & C_i \end{bmatrix} \quad D_{Gi} = \begin{bmatrix} D_G & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (100)$$



شکل ۶: بلوک دیاگرام سیگنال کوچک ریز شبکه

از روابط (۷۱) و (۸۵) و (۸۶) مشاهده می شود که ولتاژ گره ها به عنوان ورودی این زیرسیستم ها رفتار می کنند. برای اطمینان از تعیین مناسب ولتاژ هر گره یک مقامت مجازی بین هر گره و زمین فرض شده است. مقاومت مجازی باید به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود تا در نظر گرفتن آن کمترین تأثیر را در پایداری سیگنال کوچک داشته باشد. بنابراین ولتاژ گره ها به صورت زیر هستند (I ماتریس همانی است):

$$[\Delta v_{bDQGi}] = \Lambda_v^{-1} R_N M_{Gi} C_{Gi} [\Delta x_{Gi}] + R_N M_{NET} [\Delta i_{lineDQ}] + R_N M_{load} [\Delta i_{loadDQ}] \quad (101)$$

$$R_N = r_n I_{6 \times 6}, \Lambda_v = I_{6 \times 6} - R_N M_{Gi} D_{Gi} \quad (102)$$

$$M_{load} = -I_{6 \times 6}$$

۳- طراحی پایدار ساز سیستم قدرت

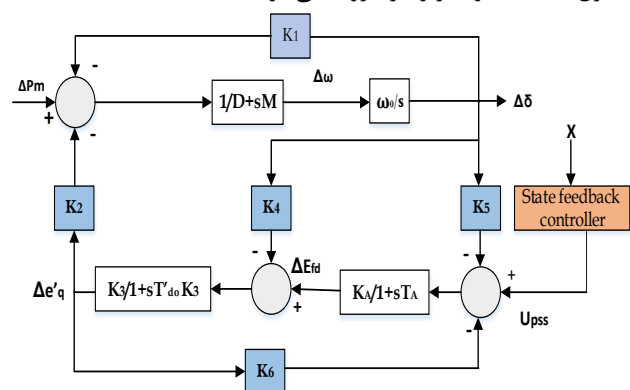
به دلیل تغییرات مداوم شرایط دینامیکی سیستم، نقطه کار سیستم و سطح بار و تولید پیوسته در حال تغییر هستند، که موجب ایجاد نوسانات فرکانس پایین در سیستم می شوند. در چنین شرایطی، باید پایدار ساز سیستم قدرت به نحوی طراحی شده باشد که بتواند میرایی مطلوب را به سیستم اضافه کند، تا نوسانات فرکانس پایین موجب ناپایداری سیگنال کوچک در سیستم نشود. پایدار سازهای مبتنی بر سیگنال $\Delta\omega$ (انحراف سرعت رتور) به طور گسترده ای استفاده می شوند. این نوع پایدار ساز باعث میرایی نوسان های رتور می شود، اما ممکن است باعث ناپایداری مدهای پیچشی شود. بنابراین اشکال اصلی این پایدار ساز استفاده از فیلتر پیچشی است. هم چنین در تضعیف مولفه های پیچشی سیگنال پایدارکننده، فیلتر مقداری پس فاز زمانی در فرکانس های پایین ایجاد می کند. پس فاز زمانی ایجاد شده اثر تخریبی بر پایداری مد تحریک کننده دارد و باعث محدود شدن کارایی پایدار ساز در میرایی نوسان های سیستم می شود. برای حل این مشکلات در شبکه نمونه از فیدبک کنترل کننده حالت به عنوان پایدار ساز سیستم قدرت در دیزل ژنراتور استفاده شده است.

میزان کارایی پایدار ساز سیستم قدرت بستگی به پارامترهای آن نیز دارد. انتخاب مناسب پارامترها جهت تضمین بهبود عملکرد پایدار ساز سیستم قدرت لازم است [۱۷]. از این رو پارامترهای فیدبک کنترل کننده حالت به کمک بهینه سازی به دست آمده اند.

شکل ۷ محل قرار گرفتن فیدبک کنترل کننده حالت را در مدل خطی دیزل ژنراتور نشان می دهد. مطابق این شکل معادله خطی فیدبک کنترل کننده حالت را می توان به صورت زیر نوشت:

$$U_{pss} = -HX, X = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta e'_q \quad \Delta E_{fd}]^T \quad (106)$$

که $H = [h_1 \quad h_2 \quad h_3 \quad h_4]$ ضرایب فیدبک کنترل کننده حالت هستند. مطابق رابطه (۱۰۶) فیدبک کنترل کننده حالت شامل چهار ورودی: انحراف زاویه رتور، انحراف سرعت رتور، ولتاژ آرمیچر و ولتاژ خروجی سیستم تحریک است که وارد پایدار ساز شده و خروجی آن یک سیگنال کمکی برای میرایی نوسانات سیستم تحریک است که به کنترل کننده خودکار ولتاژ افزوده می شود.



شکل ۷: محل قرار گرفتن فیدبک کنترل کننده حالت را در مدل خطی

دیزل ژنراتور

با اضافه شدن فیدبک کنترل کننده حالت به عنوان سیگنال ورودی به قسمت کنترل کننده خودکار ولتاژ، تغییرات ولتاژ خروجی سیستم تحریک و متعاقباً ماتریس A_g به صورت زیر تغییر پیدا می کنند:

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{K_A}{T_A} (E_{fd} - h_1 \Delta\delta - h_2 \Delta\omega - h_3 \Delta e'_q - h_4 \Delta E_{fd}) \quad (107)$$

$$A_g = \begin{bmatrix} \frac{-D}{M} & \frac{-K_1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_4}{T_{d0}} & \frac{-1}{T_{d0} \cdot K_3} & \frac{1}{T_{d0}} \\ \frac{-K_A \cdot h_1}{T_A} & \frac{-K_A(K_5 + h_2)}{T_A} & \frac{-K_A(K_6 + h_3)}{T_A} & \frac{-1 - h_4}{T_A} \end{bmatrix} \quad (108)$$

۳- روش تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده های منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و پایدار ساز سیستم قدرت

برای تجزیه و تحلیل پایداری سیگنال کوچک، از مفهوم مقادیر ویژه که جواب های معادله مشخصه یک سیستم هستند، استفاده شده است. با استفاده از ماتریس مشخصه، سیستم مجانباً پایدار خواهد بود اگر قسمت حقیقی تمامی مقادیر ویژه این ماتریس منفی باشند. از این رو اگر مقادیر ویژه ماتریس مشخصه سیستم از محور موهومی دور باشند، پایداری سیستم بهتر می شود. بنابراین می توان دوری و نزدیکی مقادیر ویژه ماتریس مشخصه از محور موهومی را به عنوان معیاری برای تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده ها استفاده نمود. به این پارامترهای کنترل کننده های اینورتر منبع ولتاژ و پایدار ساز سیستم قدرت به کمک الگوریتم ژنتیک به دست می آیند.

برای استفاده از الگوریتم ژنتیک نیاز به یک تابع هدف است. با توجه به معیار پایداری بیان شده در بالا، تابع هدف برای بهینه سازی مقادیر ویژه به صورت رابطه (۱۰۹) است.

$$J_1 = \max\{\text{Re } \lambda_i\}, \lambda_i = \sigma_i + \omega_i \quad (109)$$

که λ_i آمین مقدار ویژه سیستم است. پارامترهای کنترل کننده های اینورتر منبع ولتاژ و فیدبک کنترل کننده حالت متغیرهای تابع هدف خواهند بود.

در فرآیند بهینه سازی، هدف مینیمم کردن تابع هدف است. البته تا جایی که محدودیت های در نظر گرفته شده، اعمال شده باشند. محدودیت های پارامترهای کنترل کننده های اینورتر مطابق رابطه (۱۱۰) تعریف می شوند. پس از خطی سازی مدل در نقاط کاری، مقادیر ویژه سیستم را به ازای مقادیر جمعیت اولیه، محاسبه و مقدار خطا را به دست می آوریم، سپس با استفاده از تابع برازندگی بهترین کروموزوم ها انتخاب شده و به نسل بعد منتقل می شوند، در نهایت بر روی کروموزوم های باقیمانده عملگرهای جهش و ترکیب اجرا شده که

۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش، با استفاده از نرم افزار *MATLAB* به صحت و اثر بخشی پایدار ساز سیستم قدرت ارائه شده با استفاده از تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه ریزشکه و برخی از شاخص های مطالعات (مانند سرعت و زاویه رتور)، پرداخته شده است. پاسخ دینامیکی تغییرات شاخص های مطالعات به ازای ۱۰٪ و ۲۰٪ تغییر در قدرت مکانیکی ورودی دیزل ژنراتور و تغییر در میزان بار (با استفاده از فیدبک کنترل کننده حالت و بدون استفاده از آن) نشان داده شده اند. ضرایب فیدبک کنترل کننده حالت نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست آمده اند. مقادیر ویژه ریزشکه نمونه متناظر با مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده های منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر (بدون استفاده از فیدبک کنترل کننده حالت)، در جدول ۶ آورده شده اند.

جدول ۶: مقادیر ویژه ریزشکه نمونه بدون فیدبک کنترل کننده حالت

$-223.647 / 61 \pm 4668440 / 3i$	$-223.333 / 48 \pm 4668290 / 2i$
$-50. / 55.015 \pm 197 / 2.753i$	$-19 / 51.0611 \pm 359 / 64897i$
$-10. / 29.0404 \pm 298 / 1249i$	$-10. / 7331647 \pm 318 / 0.256i$
$-2 / 6232966 \pm 314 / 0.15083i$	$-8 / 481284 \pm 313 / 72.8i$
$-23 / 0.38267 \pm 85 / 146565i$	$-36 / 1949785$
$-0. / 1668955 \pm 9 / 347476i$	$-0. / 75334846 \pm 1 / 588766i$
$-0. / 887364 \pm 7 / 357266i$	$-1 / 1148.41 \pm 7 / 293320.7i$

پاسخ دینامیکی تغییرات سرعت رتور در شکل ۹، زاویه رتور در شکل ۱۰ و تغییرات ولتاژ تحریک در شکل ۱۱، به ازای ۱۰٪ تغییر در قدرت مکانیکی ورودی دیزل ژنراتور و تغییرات سرعت رتور در شکل ۱۲، زاویه رتور در شکل ۱۳ و تغییرات ولتاژ تحریک در شکل ۱۴، به ازای ۲۰٪ تغییر در قدرت مکانیکی ورودی (با استفاده از فیدبک کنترل کننده حالت و بدون استفاده از آن) نشان داده شده اند. در $t = 1(s)$ تغییرات قدرت مکانیکی به سیستم اعمال شده است.

به وضوح مشاهده می شود که بدون استفاده از فیدبک کنترل کننده حالت میرایی نوسانات کند است، در حالی که با قراردادن فیدبک کنترل کننده، سرعت میرایی نوسانات بهتر می شود. با مقایسه نتایج مربوطه مشاهده می شود که با تغییر تغییرات قدرت مکانیکی ورودی از ۱۰٪ به ۲۰٪، دامنه نوسانات افزایش می یابد و نوسانات با استفاده از فیدبک کنترل کننده حالت نیز دیرتر (در حدود ۲ ثانیه) میرا می شوند.

در نتیجه، کروموزوم های نسل بعد ایجاد می شوند. شکل ۸ فلوجارت کلی نحوه تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده های منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و پایدار ساز سیستم قدرت را نشان می دهد.

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

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

$$k_{pv}^{\min} \leq k_{pv} \leq k_{pv}^{\max}$$

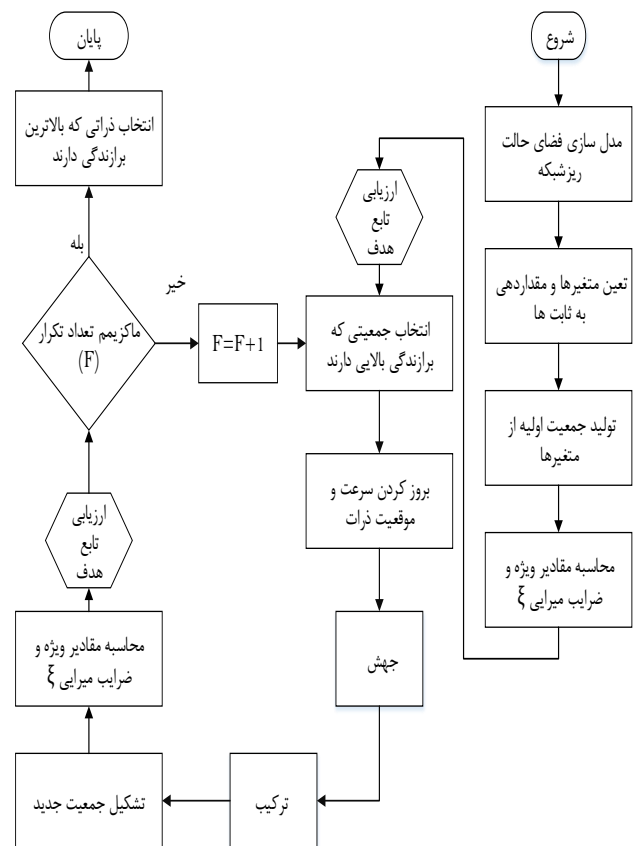
$$k_{iv}^{\min} \leq k_{iv} \leq k_{iv}^{\max}$$

$$k_{pc}^{\min} \leq k_{pc} \leq k_{pc}^{\max}$$

$$k_{ic}^{\min} \leq k_{ic} \leq k_{ic}^{\max}$$

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

(۱۱۰)



شکل ۸: فلوجارت مساله هماهنگی بهینه

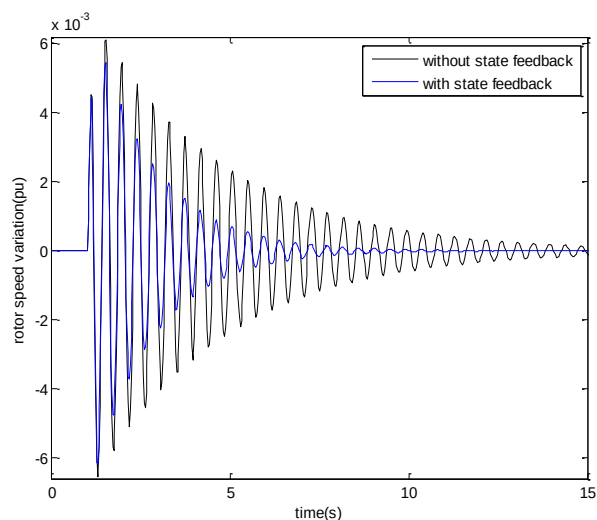
مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده های منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و مقادیر بهینه ضرایب فیدبک کنترل کننده حالت که با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست آمده اند در جدول ۴ و جدول ۵ آورده شده اند.

جدول ۴: مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده های اینورتر منبع ولتاژ

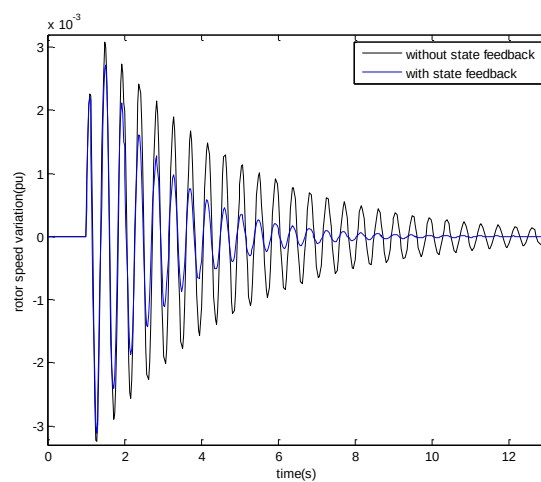
m_p	n_q	K_{pv}	K_{iv}	K_{pc}	K_{ic}	G
۰/۱۳	۰/۱	۰/۲۷۳	۱۴/۱۸۸	۳۹۶/۸۹۰	۹/۰۰۷	۰/۰۶۳

جدول ۵: مقادیر بهینه ضرایب فیدبک کنترل کننده حالت

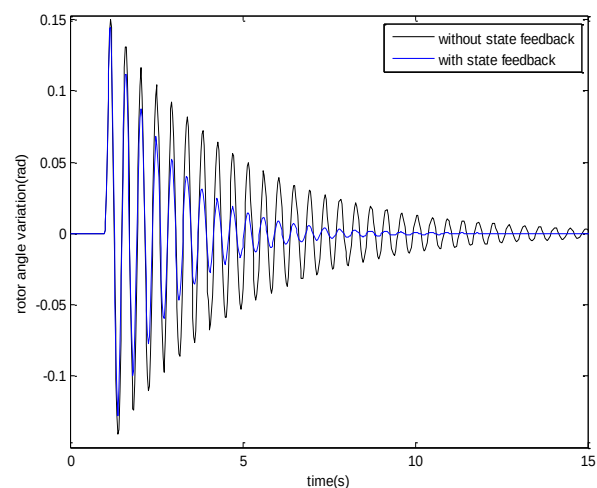
h_1	h_2	h_3	h_4
۲/۲۶۱	۰/۸۱۹	-۱/۲۰۷	-۱/۲۵۳



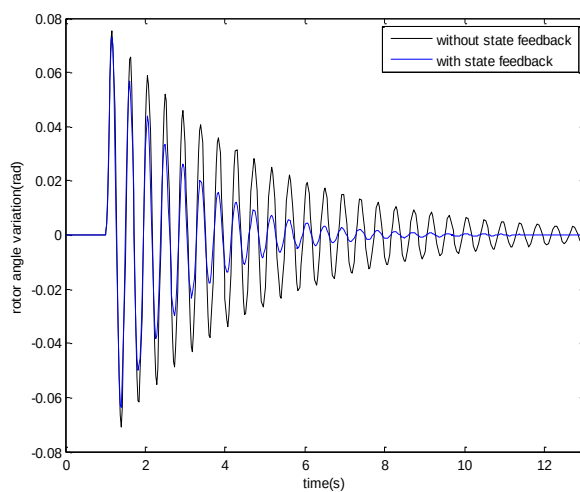
شکل ۱۲: تغییرات سرعت رتور



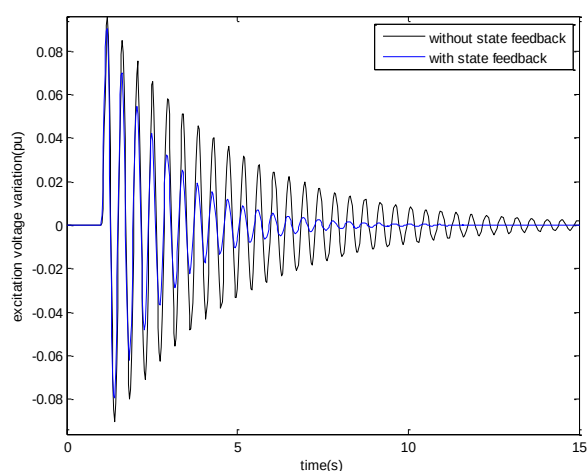
شکل ۹: تغییرات سرعت رتور



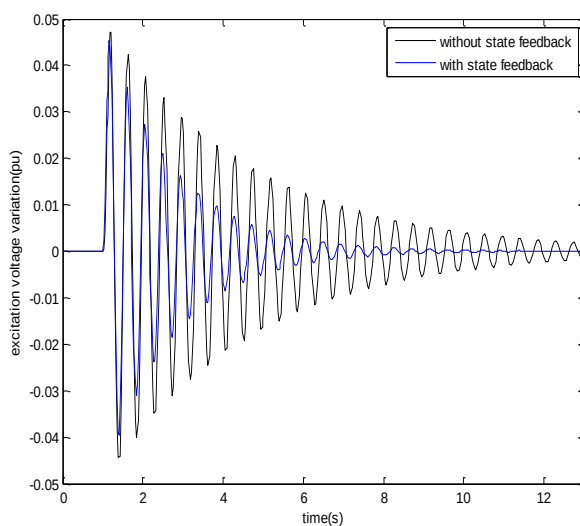
شکل ۱۳: تغییرات زاویه رتور



شکل ۱۰: تغییرات زاویه رتور



شکل ۱۴: تغییرات ولتاژ تحریک



شکل ۱۱: تغییرات ولتاژ تحریک

مقادیر ویژه ریزشکه نمونه متناظر با مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده های منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و مقادیر بهینه ضرایب فیدبک کنترل کننده حالت در جدول ۷ آورده شده اند.

$X_e(p.u)$	۰/۶	$M(s)$	۵
$\omega_n(rad/s)$	۳۱۴	$\omega_0(rad/s)$	۳۱۳/۸

جدول ۲: پارامترهای منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\omega_c(rad/s)$	۳۱/۴۱	$L_f(mH)$	۰/۱
$L_c(mH)$	۰/۳۹	$C_f(\mu F)$	۵۰
$R_c(\Omega)$	۰/۰۰۵	$R_f(\Omega)$	۵
r_n	۹	U_{od}	۲۵۰
U_{oq}	۰	I_{od}	۱۱
I_{oq}	۰/۸۱	I_{ld}	۱۱/۶
I_{lq}	-۷	K	۰/۲
V_{bD}	۲۸۰	V_{bQ}	-۴

جدول ۳: پارامترهای خطوط و بارها

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$r_{line1}(\Omega)$	۰/۴	$L_{line1}(H)$	۰/۷
$r_{line2}(\Omega)$	۰/۹	$L_{line2}(H)$	۰/۵
$r_{load1}(\Omega)$	۰/۷	$L_{load1}(H)$	۰/۵
$r_{load2}(\Omega)$	۱	$L_{load2}(H)$	۳
$r_{load3}(\Omega)$	۵	$L_{load3}(H)$	۱
$i_{line2D}(A)$	۱۱	$i_{line2Q}(A)$	۷
$i_{load1D}(A)$	۱۰	$i_{load1Q}(A)$	۳
$i_{line1D}(A)$	۱	$i_{line1Q}(A)$	۱
$i_{load2D}(A)$	۰/۵	$i_{load2Q}(A)$	۰/۹
$i_{load3D}(A)$	۱/۸	$i_{load3Q}(A)$	۷/۷۶

مراجع

- [۱] مجید نیری پور، حسین فلاح زاده ابرقوئی و سعید حسنوند «مدیریت توزیع شده و سلسله مراتبی ولتاژ در شبکه هوشمند با مشارکت مولدهای تولید پراکنده»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [2] Lasseter RH, "Microgrids and distributed generation," *Journal of Energy Engineering*; vol. 133, no. 3, pp225-234, September, 2007.
- [3] Lidula NWA and Rajapakse AD, "Microgrids research: a review of experimental microgrids and test systems," *Renewable and Sustainable Energty Reviews*, vol. 15, no. 1, pp 186-202, 2011.
- [4] Xiao ZX and Wang CS, Wang SX, "Small-signal stability analysis of microgrid containing multiple micro sources," *Automation of Electric Power Systems*. vol. 33, no. 6, pp. 81-85, 2009.
- [5] M.O Hassan and S.J. Cheng and Z.A. Zakaria, "Design and parameter optimization of power system stabilizer to Improve Power System Oscillations," *The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, Vol. 5, pp. 107-111, Singapore, Feb .2010.

جدول ۷: مقادیر ویژه ریز شبکه نمونه با فیدبک کنترل کننده حالت

$-۲۲۳۰۶۴۸/۳۲ \pm ۵۲۰۷۹۳۹/۲i$	$-۲۲۳۰۳۳۴/۲ \pm ۵۲۰۷۸۰۴/۷i$
$-۴۹۸/۴۰۹۷۶۵ \pm ۲۱۰/۵۱۵۸۹i$	$-۱۸/۳۵۴۹۷۲ \pm ۳۵۸/۰۶۶۰۳i$
$-۹/۵۰۷۰۲۵۱۲ \pm ۲۹۵/۹۲۵۷i$	$-۱۰/۴۳۳۰۸۲ \pm ۳۱۷/۳۹۶۹i$
$-۲/۶۵۸۱۴۳۳۱ \pm ۳۱۴/۰۰۷۷۸i$	$-۷/۷۰۴۷۳۱ \pm ۳۱۳/۷۱۲۶i$
$-۲۴/۷۸۴۲۰۱ \pm ۸۹/۲۴۴۴۴۳i$	$-۷۴/۶۴۳۵۰۱$
$-۲۴/۲۵۲۳۴۲$	$-۳۵/۷۱۲۴۸$
$-۰/۲۱۰۵۴۴۴ \pm ۶/۹۵۲۵۵۵i$	$-۱/۰۹۷۸۲۴ \pm ۷/۲۹۹۶۵۴i$
$-۱/۰۰۵۵ \pm ۷/۳۵۳۴۸۴i$	

با مقایسه مقادیر ویژه جدول ۶ و جدول ۷ و معیار پایداری بیان شده، مشاهده می شود که، فیدبک کنترل کننده حالت سبب دورتر شدن مقادیر ویژه از محور موهومی شده و باعث بهبود پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه نیز می شود.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل دینامیکی برای ریز شبکه در مد جزیره ای ارائه شده است. این مدل شامل مدل خطی منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر، مدل خطی شبکه و بارها و مدل خطی دیزل ژنراتور (مدل هفرون-فیلیپس) می باشد. از فیدبک کنترل کننده حالت نیز به عنوان پایدار ساز سیستم قدرت استفاده شده است. هدف استفاده از فیدبک کنترل کننده حالت، میرایی نوسانات فرکانس پایین دیزل ژنراتور در زمان تغییر قدرت مکانیکی ورودی آن، و بهبود پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه است. از الگوریتم ژنتیک با تابع هدف مناسبی برای به دست آوردن بهینه پارامترهای کنترل کننده های منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و ضرایب فیدبک کنترل کننده حالت استفاده شده است.

نتایج شبیه سازی برای ریز شبکه نمونه به ازای ۱۰٪ و ۲۰٪ تغییر در قدرت مکانیکی ورودی دیزل ژنراتور، نشان می دهند که فیدبک کنترل کننده حالت سبب میرا تر شدن نوسانات سرعت و زاویه رتور و ولتاژ تحریک می شود. همچنین باعث دور شدن قسمت حقیقی مقادیر ویژه از محور موهومی شده و پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه را بهبود می دهد.

پیوست ها

جدول ۱: پارامترهای دیزل ژنراتور

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$P(kw)$	۲۵	$V(v)$	۲۲۰
$R_a(p.u)$	۰/۰۵	D	۳/۵
$T_A(s)$	۰/۰۲	K_A	۲۵/۱
$T'_{d0}(s)$	۰/۰۱۸	$T'_{q0}(s)$	۰/۰۲
$X_d(p.u)$	۱/۹	$X'_d(p.u)$	۰/۱۷
$X_q(p.u)$	۰/۸۵	$X'_q(p.u)$	۰/۱۲

- [13] K. Yu and Q. Ai and Sh. Wang and J. Ni and Tianguang Lv, "Analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.7, no.2, pp. 695 – 705, 2016.
- [۱۴] سید عباس صارمی حصار، محسن حمزه و احمد سالم نیا «بهبود عملکرد دینامیکی و استاتیکی سیستم تقسیم توان در ریزشبه ها در حالت جزیره ای»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [15] DONG Jie and ZHANG Chun-Jiang and MENG Xiao-Mai and GUO Zhong-Nan and KAN Zhi-Zhong, "modeling and stability analysis of autonomous microgrid composed of inverter based on improved droop control," *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016 IEEE 8th International*, 2016.
- [16] N. Pogaku and M. Prodanovic and T. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 613 –625, 2007.
- [17] A.C. Padoan and B. Kawkabani and A. Schwery and C. Ramirez and C. Nicolet, J and J. Simond and F. Avellan, "Dynamical behavior comparison between variable speed and synchronous machines with pss," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no.3, pp.1555-1565, Aug 2010.
- [6] Z. Miao and A. Domijan Jr. and L. Fan, " Investigation of microgrids with both inverter interfaced and direct AC-connected distributed energy resources," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.26, no. 3, pp. 1634-1642, 2011.
- [7] J. Guerrero and J. Matas and L.G. de Vicuna and M. Castilla, and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 994 –1004, 2007.
- [8] H. Liang and B.J. Choi and W. Zhuang and X. Shen, " Stability enhancement of decentralized inverter control through wireless communications in microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 321-331, 2013.
- [9] X. Tang and W. Deng and Z. Qi, " Investigation of the dynamic stability of microgrid," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 29, no. 2, pp. 698–706, 2014.
- [10] C.D.Vourmas and R.J.Fleming, "Generalization of the Heffron-Philips model of a synchronous generator," *IEEE PES summer meeting*, LA, 1978.
- [11] M. soliman and D. Westwick and O. P. Malik, "Identification of Heffron-philips model parameters for synchronous generators operating in closed loop," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 2, no. 4, pp . 530-241, 2008.
- [12] D. Kr Dheer and N Soni and S Doolla, "Improvement of small signal stability margin and transient response in inverter-dominated microgrids," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol.5, pp. 135-147, March 2016.

زیر نویس ها

¹ State feedback controller