

Vol. 12/ No. 45/Autumn 2022

Increase Flexibility and Improve Resilience in Smart Microgrids by Coordinating Storage Resources and Distributed Generation During Contingencies

Mohsen Gholami, MSc Student¹  | Mehrdad Mallaki, Assistant Professor² 

¹Electrical Engineering Department, Islamic Azad University, Bushehr branch, Bushehr, Iran. mohsen.gh2172@gmail.com

²Electrical Engineering Department, Islamic Azad University, Bushehr branch, Bushehr, Iran. mallaki@iaubushehr.ac.ir

Correspondence

Mohsen Gholami, MSc Student of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Bushehr Branch, Bushehr, Iran, mohsen.gh2172@gmail.com

Received: 31 March 2022

Revised: 29 May 2022

Accepted: 20 June 2022


Abstract

The microgrid inertia as a result of tiny structure and barely tolerance variations, is fairly low. Thus, the maintenance of voltage stability and frequency specifically in islanded mode is extremely demanding. Even if these products have efficient control system, they can't retain microgrid stability due to the low speed of response in primary sources of energy and communication delays of the links between outer unit and control system in distributed generation. Introducing a structure of fuzzy control arranged with neural network to balance between generation part and consumption part in microgrid is the main purpose of this paper. Using the fuzzy logic, this controller enables flexible operation of microgrids in both network and islanded modes. In the proposed control system, a trainable neural network in different operating conditions is responsible for fine tuning of the fuzzy logic system. Because of the sensitivity of the loads in the microgrid the proposed structure is designed to interact with the storage source in order to increase the response speed to the imbalance between production and consumption. This might prevent excessive voltage and frequency deviation, especially in the severe situations. With this controller, fluctuations in the production of renewable resources quickly compensated without a negative impact on resilience and instability of the microgrid, especially while disconnecting from the main network.

Keywords: Distributed generation, Energy storage resources, Microgrid, Stability, Resiliency.

Highlights

- The usage of ANFIS system to coordinate distributed generation units and storage resources.
- The usage of ESS to compensate for low response speed of ESS to prevent network instability.
- Increase flexibility and improve microgrid reliability with the presence of renewable resources and ESS.
- Application of efficient ANFIS system in microwave frequency stability.

Citation: M. Gholami and M. Mallaki, "Increase Flexibility and Improve Resilience in Smart Microgrids by Coordinating Storage Resources and Distributed Generation During Contingencies," *Journal of Communication Engineering (JCE)*, vol. 12, no. 45, pp. 45–60, 2022, (in Persian). 

افزایش انعطاف پذیری و بهبود تاب آوری ریزش شبکه هوشمند با هماهنگی منابع ذخیره ساز و تولیدات پراکنده در زمان وقوع

محسن غلامی^{*1} | مهرداد ملاکی^۲

چکیده:

ریزش شبکه‌ها اغلب به دلیل ساختار کوچک و تحمل پایین در برابر تغییرات، دارای اینرسی کمی هستند، لذا حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس به‌ویژه در حالت جزیره‌ای بسیار دشوار و تاب آوری آن‌ها بسیار آسیب‌پذیر است. با توجه به سرعت پاسخگویی پایین منابع انرژی اولیه و وجود لینک ارتباطی بین خروجی واحدها و سیستم‌های کنترل در تولیدات پراکنده، این تولیدات حتی اگر سیستم کنترلی کارآمدی هم داشته باشند، به‌تنهایی نمی‌توانند پایداری ریزش شبکه را حفظ کنند. در مقاله یک ساختار کنترل فازی تنظیم‌شده با شبکه عصبی برای ایجاد تعادل بین سمت تولید و مصرف در ریزش شبکه معرفی شده است. این کنترل‌کننده به‌واسطه منطق فازی امکان عملکرد منعطف ریزش شبکه در دو حالت اتصال به شبکه و جزیره‌ای را فراهم می‌کند و امکان انتقال نرم بین این دو حالت را تضمین می‌کند که باعث افزایش قابل توجه تاب آوری می‌شود. در این سیستم کنترلی یک شبکه عصبی آموزش‌دیده در شرایط مختلف بهره‌برداری وظیفه تنظیم دقیق منطق فازی را بر عهده دارد. با توجه به حساسیت بارهای موجود در ریزش شبکه، ساختار پیشنهادی به‌منظور بالا بردن سرعت پاسخ به عدم تعادل بین تولید و مصرف و جلوگیری از انحراف بیش از حد ولتاژ و فرکانس به‌ویژه در زمان وقوع پیشامد شدید، به‌صورت تعاملی با منبع ذخیره‌ساز طراحی شده است. با استفاده از این کنترل‌کننده، نوسانات تولید منابع تجدید پذیر نیز به‌سرعت جبران شده و امکان استفاده از این تولیدات به‌ویژه در حالت جدا از شبکه، بدون تأثیر منفی در تاب آوری و ایجاد ناپایداری فراهم می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تولید پراکنده، منابع ذخیره‌ساز، ریزش شبکه، پایداری، منابع تجدید پذیر.

^۱دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد، واحد بوشهر، بوشهر، ایران، Mohsen.gh2172@gmail.com

^۲استادیار گروه برق، دانشگاه آزاد بوشهر، واحد بوشهر، بوشهر، ایران، mallaki@iaubushehr.ac.ir

نویسنده مسئول

*محسن غلامی، دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد، واحد بوشهر، بوشهر، ایران، Mohsen.gh2172@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۱ فروردین ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۸ خرداد ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۳۰ خرداد ۱۴۰۱

۱- مقدمه

طی دهه‌های گذشته، صنعت انرژی الکتریکی در پاسخ به افزایش نگرانی‌ها در مورد تغییرات آب و هوایی در جهان و افزایش سریع قیمت سوخت‌های فسیلی، در حال پوست‌اندازی است. این روند مفهوم ریزش شبکه‌ها^۱ را به وجود آورده است، که می‌توان

^۱ Microgrid

آن را مجموعه‌ای از منابع انرژی پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی^۲ و بارهای محلی دانست که توسط یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند^۳ مدیریت می‌شود. ریزشبه‌ها مزایای بسیاری نسبت به سیستم‌های توزیع سنتی دارا هستند که می‌توان از کاهش تلفات انرژی به دلیل نزدیکی بین تولیدات پراکنده و بارها، بهبود قابلیت اطمینان با وجود توانایی کار در حالت جزیره‌ای در هنگام نقص سیستم و کاهش سطح بارگیری خطوط انتقال و توزیع از طریق مدیریت انرژی به منظور کاهش واردات انرژی از شبکه بالادست به عنوان برخی از مهم‌ترین این مزایا نام برد. برای تولید انرژی کارآمدتر، قابل اطمینان و سازگار با محیط زیست، افزایش ادغام منابع انرژی تجدید پذیر^۴ در ریزشبه‌ها بسیار مهم است [۱].

در دهه‌های گذشته، سیستم توزیع را به عنوان سیستم‌های تابع و غیرفعال در نظر می‌گرفتند، چرا که فقط با وجود شبکه انتقال موجودیت پیدا می‌کرد. با پیدایش تولیدات پراکنده و ریزشبه، سیستم‌های توزیع به یک سیستم فعال با دو جنبه تولید و مصرف تبدیل شده‌اند. در شرایط عادی، ریزشبه به شبکه اصلی متصل است و در برنامه‌ریزی‌های کنترلی و عملکرد بازار برق و مسائل اقتصادی مشارکت می‌کنند. چنانچه یک اغتشاش و حمله در سیستم رخ دهد، کلید قدرت موجود در نقطه اتصال مشترک^۵ عمل کرده و ریزشبه به حالت جزیره‌ای و مستقل از سیستم اصلی می‌رود و خود وظیفه تأمین توان بارهای محلی را بر عهده می‌گیرد [۲]. زمانی که ریزشبه متصل به شبکه اصلی است، شبکه بالادست به منزله تکیه‌گاهی محکم برای ریزشبه است. در نتیجه عملکرد پایدار ریزشبه توسط شبکه قدرت حفظ می‌شود. زمانی که ریزشبه به مد جزیره‌ای می‌رود، باید تعادل عرضه توان و تغییرات بار توسط منابع داخلی حفظ شود که بسیار مشکل‌تر از حالت متصل است. پایداری در مد جزیره‌ای عمدتاً به ساختار ریزشبه، سرعت پاسخگویی تولیدات پراکنده و منابع انرژی اولیه، سیستم ارتباطی و هماهنگی بین اجزا مختلف و استراتژی‌های کنترلی وابسته است [۳]. نبود تعادل بین تولید و مصرف برق و اختلالات بار می‌تواند موجب کاهش تاب‌آوری ریزشبه و انحراف فرکانس و ناپایداری ریزشبه‌های مدرن با اینرسی پایین شود. در حقیقت، پیچیدگی بسیار ریزشبه‌ها در مد جزیره‌ای و تاب‌آوری پایین آن و همچنین رشد تقاضای برق به متخصصانی نیاز دارد تا از منابع انرژی تجدید پذیر بالقوه برای کاهش برخی انحرافات در ریزشبه‌های جزیره‌ای استفاده کنند [۴]. ساختار و بهره‌برداری از ریزشبه‌ها با شبکه سنتی برق کاملاً متفاوت است. برخلاف شبکه مرسوم قدرت که ژنراتورهای سنکرون نقش تعیین‌کننده در مطالعات پایداری دارند، در ریزشبه‌ها، منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر در مطالعات کنترل و پایداری نقش بسیار مؤثری دارند. تفاوت‌های زیادی از جمله سرعت پاسخ، مکانیسم بهره‌برداری، حالت‌های کنترلی و قابلیت اضافه جریان بین ژنراتور سنکرون و تولیدات پراکنده^۶ وجود دارد. بنابراین روش‌های کنترل و آنالیز بکار رفته در شبکه مرسوم برق نمی‌توانند دقیقاً برای ریزشبه بکار روند [۵]. ریزشبه در صورت وقوع اغتشاش از شبکه اصلی جدا شده و به حالت جزیره‌ای تغییر حالت می‌دهد. حالت جزیره‌ای به دلیل اینرسی پایین و عدم وجود توان پشتیبان، بسیار آسیب‌پذیر و تاب‌آوری ریزشبه در این حالت بسیار پایین است. لذا با اغتشاش‌های بسیار کوچک به مرز ناپایداری می‌رود. به همین دلیل حفظ پایداری و انعطاف‌پذیری ریزشبه در حالت جزیره‌ای دشوار و افزایش انعطاف‌پذیری آن مستلزم به‌کارگیری سیستم کنترل کارآمد و هماهنگ با اجزا مختلف ریزشبه است [۴]. با وقوع پیشامد و بروز اغتشاش ریزشبه به صورت مستقل تغییر وضعیت می‌دهد و دچار کمبود توان می‌شود. با توجه به اینرسی پایین ریزشبه، این کمبود توان که منجر به انحرافات ولتاژ و فرکانس می‌شود باید به سرعت برطرف شود. باین حال، به دلیل سرعت پایین پاسخ منابع اولیه انرژی در تولیدات پراکنده، سرعت عکس‌العمل ریزشبه نیز پایین می‌آید. برخلاف تولیدات پراکنده، منابع ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی سرعت پاسخ بالایی دارند. در زمان وقوع اغتشاش ابتدا این منابع به واسطه سیستم کنترلی خود به سرعت عکس‌العمل نشان می‌دهند و در نتیجه سرعت پایین پاسخ تولیدات پراکنده را جبران می‌کنند [۵]. در این سال‌ها

^۲ Energy storage systems

^۳ Energy management system

^۴ Renewable energy

^۵ Point of Common Coupling

^۶ Distributed grid

پژوهش‌هایی در رابطه با افزایش انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری ریزش‌بنده به‌عمل‌آمده است که در جدول شماره ۱ چند نمونه آن بیان شده است ولی باوجود به دست نیامدن نتیجه مطلوب کمک خوبی برای پیشرفت در این زمینه شده است. در این مقاله طرحی برای رفع افزایش انعطاف‌پذیری ریزش‌بنده در زمان وقوع اغتشاش پیشنهاد شده که به‌واسطه عملکرد صحیح سیستم کنترلی و تعامل منابع تولید پراکنده و منابع ذخیره‌ساز انرژی، پایداری ریزش‌بنده را در شرایط مختلف بهره‌برداری تضمین می‌کند. جهت مقابله با چالش سرعت عکس‌العمل پایین تولیدات پراکنده و عدم قطعیت موجود در خروجی توان تولیدات تجدید پذیر، یک سیستم کنترل تعاملی با منابع ذخیره‌ساز پیشنهاد شده است. این ساختار تعاملی از یک سو سرعت عکس‌العمل و تاب‌آوری ریزش‌بنده را بسیار افزایش داده و از سوی دیگر امکان استفاده از منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی تجدید پذیر را در ریزش‌بنده باوجود عدم قطعیت در توان خروجی آن‌ها فراهم می‌کند.

ادامه این مقاله به این صورت تنظیم شده که در بخش دوم مدل پیشنهادی ارائه شده و فرمولاسیون و اجزای آن تشریح شده است. بخش سوم به شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و استخراج نتایج عددی و ارزیابی کارکرد مدل پیشنهادی اختصاص دارد. در بخش چهارم و پایانی هم نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

جدول شماره ۱: پژوهش‌های به‌عمل‌آمده

ردیف	پژوهشگر سال تحقیق	نوع استراتژی	دستاوردها	توضیحات (مزایا و معایب)
۱	جیانگ و همکاران (۲۰۱۳)	برنامه‌ریزی درجه دوم مختلط	مدیریت انرژی ESS باتری برای بهبود قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری	عدم کارکرد در شرایط جزیره‌ای، کنترل تنها منابع ذخیره‌ساز بدون توجه به تولیدات پراکنده، ایده آل گرفتن منابع انرژی اولیه
۲	چی و سوچی (۲۰۱۷)	کنترل فرکانس مشترک بر اساس ترکیبی از پاسخ اینرسی و کنترل محدود کردن توان اکتیو	افزایش انعطاف‌پذیری ریزش‌بنده با حضور منابع تجدید پذیر	عدم توجه به ولتاژ و توان راکتیو، سرعت پایین عکس‌العمل، ایده آل فرض کردن منابع انرژی، در نظر نگرفتن منابع ذخیره‌ساز انرژی
۳	جایاپریا و همکاران (۲۰۱۷)	کنترل مبتنی بر منطق فازی	پایداری فرکانس	سرعت پاسخ پایین، عدم توجه به ولتاژ و توان راکتیو

۲- ساختار پیشنهادی

در این مقاله از طراحی چند سطحی برای سیستم کنترل به‌منظور تضمین عملکرد پایدار و انعطاف‌پذیر ریزش‌بنده در شرایط وقوع اغتشاش و قطع شبکه اصلی استفاده شده است. ساختار کنترل پیشنهادی شامل دو استراتژی اولیه مبتنی بر منابع تجدید پذیر و استراتژی ثانویه مبتنی بر منابع ذخیره‌ساز است که در چند سطح مختلف تشکیل شده‌اند و به‌صورت مؤثر با یکدیگر هماهنگ هستند. این کنترل‌کننده شامل سه سطح کنترل‌کننده افقی، ولتاژی و جریانی است. در صورت وقوع اغتشاش در ابتدا منبع ذخیره‌ساز وارد عمل شده و با سرعت پاسخ بالا، تعادل بین تولید و مصرف را برقرار می‌کند تا از انحراف بیش از حد ولتاژ و فرکانس و ناپایداری ریزش‌بنده جلوگیری کند.

یکی از ابزارهای مفید در مهندسی کنترل به‌ویژه در محیط‌های دارای عدم قطعیت، منطق فازی^۷ است. این منطق برای کنترل پارامترهای متغیر سیستم در زمان واقعی بسیار کارآمد است. با این وجود، نیاز به تنظیم دقیق توابع عضویت و استخراج قواعد آن یکی از اصلی‌ترین نواقص آن است. در صورت عدم تنظیم، سیستم کنترلی عملکرد صحیحی نداشته و سیستم را به مرز ناپایداری سوق می‌دهد. از سوی دیگر، یکی از ابزارهای کاربردی و هوشمند در مهندسی، شبکه عصبی مصنوعی^۸ است. این شبکه امکان آموزش و یادگیری رفتار سیستم در پیشامدها و اغتشاش‌های مختلف (مانورهای مختلف) را دارد و به همین دلیل

^۷ Fuzzy Logic

^۸ Artificial Neural Network

هم در شناسایی و هم در کنترل بکار گرفته می‌شود. شبکه عصبی در نقطه مقابل منطق فازی، قابلیت یادگیری دارد و برای تشخیص رفتار سیستم در شرایط مختلف بهره‌برداری به‌ویژه در سیستم‌های غیرخطی مناسب است. ترکیب شبکه عصبی و منطق فازی امکان بهره‌مندی از مزایای هر دوی آن‌ها را فراهم می‌کند. در این صورت، این دو ابزار به‌صورت بهینه و هوشمند تنظیم می‌شوند تا بهترین عملکرد سیستم در شرایط مختلف به دست آید [۶].

یک ساختار فازی و عصبی با سه تابع عضویت ورودی و خروجی که این ساختار در مجموع نه قاعده دارد و دارای پنج لایه اصلی است. جزییات هر لایه در ادامه شرح داده شده است.

لایه اول: این لایه، به لایه عضویت شناخته می‌شود. برای هر ورودی در این لایه یک یا چند تابع عضویت در نظر گرفته می‌شود. با این کار، درجه عضویت هر ورودی مشخص می‌شود. در ادامه مقادیر ورودی به توابع عضویت اعمال شده تا شبکه فازی مناسب با این متغیرها به دست آید.

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{A_i}(x) & \text{for } i = 1,2,3 \\ O_{1,i-3} &= \mu_{B_{i-3}}(y) & \text{for } i = 4,5,6 \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه فوق x و y ورودی‌های سیستم هستند و A_i و B_i متغیرهای زبانی آن هستند. توابع μ_{A_i} و μ_{B_i} از نوع توابع گاوسی انتخاب شده‌اند که بیشینه آن‌ها یک و کمینه صفر است (۲).

$$\begin{aligned} \mu_{A_i}(x) &= \exp\left(-\frac{(x - \alpha_i)^2}{2\beta_i^2}\right); & i = 1,2,3 \\ \mu_{B_j}(y) &= \exp\left(-\frac{(y - \alpha_j)^2}{2\beta_j^2}\right); & j = 1,2,3 \end{aligned} \quad (2)$$

در روابط فوق، α مرکز تابع گاوسی و β انحراف معیار است.

لایه دوم: در این لایه قواعد شکل می‌گیرند. به عبارت دیگر در این مرحله ورودی‌ها در هم ضرب شده و ارزش هر قاعده تعیین می‌شود (۳).

$$O_{2,i} = W_i = \mu_{A_j}(x) \cdot \mu_{B_k}(y) \quad i = 1,2, \dots, 9 \quad j = 1,2,3 \quad k = 1,2,3 \quad (3)$$

لایه سوم: این لایه به لایه قانون شهرت دارد که در آن سطح فعالیت هر قاعده محاسبه می‌شود. ارزش هر قاعده در این لایه مطابق رابطه زیر، در قیاس با مجموع ارزش قاعده‌ها سنجیده می‌شود (۴).

$$O_{3,i} = \bar{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2 + \dots + W_9} \quad i = 1,2, \dots, 9 \quad (4)$$

لایه چهارم: در این لایه بخشی از خروجی با ضرب ارزش هر قاعده در عدد یا تابع آن قاعده محاسبه می‌شود، که بخشی از خروجی را تشکیل می‌دهد (۵).

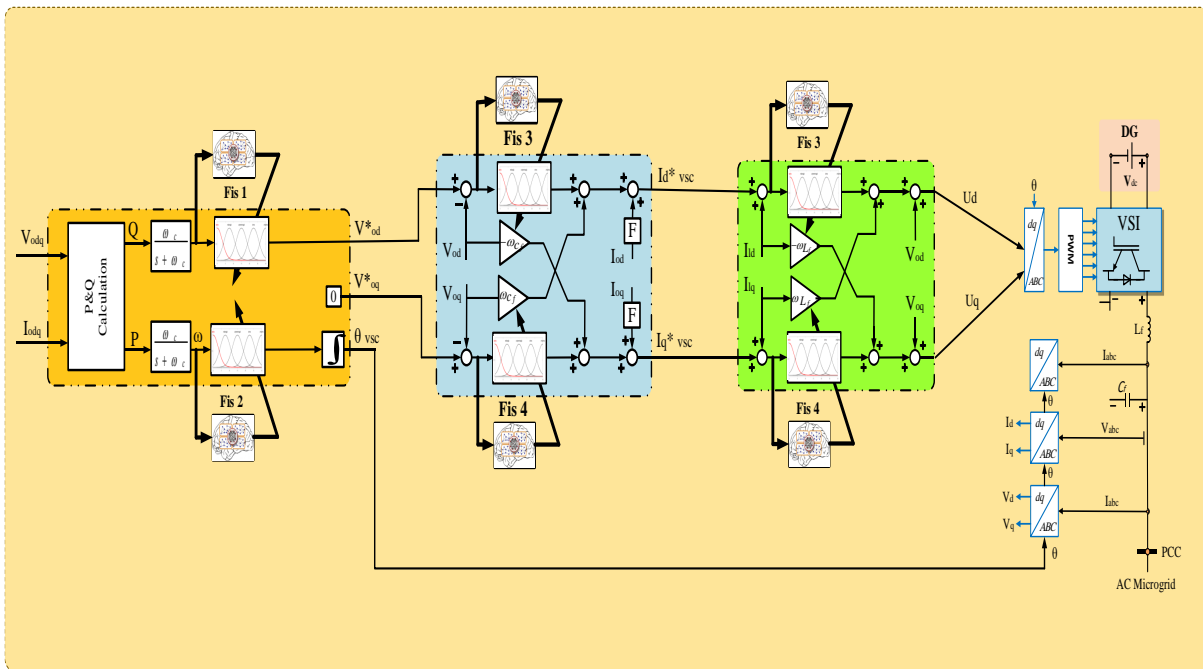
$$O_{4,i} = \bar{W}_i \cdot f_i = W_i \cdot (a_i x + b_i y + c_i) \quad i = 1,2, \dots, 9 \quad (5)$$

لایه پنجم: از مجموع مقادیر مرحله قبل در این لایه، خروجی سیستم استنتاج فازی و عصبی به دست می‌آید (۶):

$$O_{5,i} = \sum_{i=1}^9 \bar{W}_i \cdot f_i \quad (6)$$

فرمول بندی و کلیت ساختار سیستم استنتاج فازی و عصبی در تمام کنترل‌کننده‌های معرفی شده مشابه است با این تفاوت که توابع عضویت و قوانین تعیین شده برای منطق فازی توسط شبکه عصبی، برای هر کنترل‌کننده بسته به داده‌های ورودی و خروجی متناظر خود طراحی می‌شود.

ساختار و معماری کلی سیستم کنترل کننده پیشنهادی برای افزایش انعطاف پذیری ریزش شبکه در شکل ۱ ارائه شده است. این کنترل کننده از نوع کنترل کننده های شکل دهنده شبکه است و مانند باس اسلک^۱ و نگهبان در شبکه عمل می کند. به بیان دیگر، هر گونه نامتعادلی بین تولید و مصرف در ریزش شبکه به ویژه در حالت جزیره ای را با تغییر و تنظیم توان خروجی خود متعادل می کند. به کمک حلقه های کنترل داخلی و خارجی و اندازه گیری های محلی، این امکان برای تولیدات پراکنده که به این سیستم کنترلی مجهز هستند فراهم می شود تا وظیفه متعادل کردن تولید و مصرف که ناشی از توان تولیدی و بار مصرفی است را بر عهده گیرند. با این کار ولتاژ و فرکانس و توان خروجی تولیدات پراکنده را کنترل کرده و بار مصرفی را بین واحدهای تولیدی توزیع می کند. اجزا و قسمت های مختلف سیستم کنترلی و معادلات جبری و دینامیکی آن در ادامه بیان شده است.



شکل ۱: ساختار و اجزا مختلف سیستم کنترل پیشنهاد شده

۲-۱- سیستم کنترل افت

در این قسمت از کنترل کننده، کل توان تولیدی بر اساس تغییرات فرکانس و ولتاژ، بین تولیدات پراکنده به اشتراک گذاشته می شود. به بیان دیگر، در این بخش از کنترل کننده، توان تولیدی به وسیله تنظیم فرکانس و ولتاژ خروجی کنترل می شوند. ساختار بلوکی این بخش از سیستم کنترلی در شکل ۲ نشان داده شده است:

$$\omega_{VSC} = \sum_{i=1}^{25} \bar{W}_{i1} \cdot f_{i1} \tag{7}$$

$$v_{od}^* = \sum_{i=1}^{25} \bar{W}_{i2} \cdot f_{i2} \tag{8}$$

$$v_{oq}^* = 0 \tag{9}$$

معادله (۷) خروجی سیستم فازی Fis1 و معادله (۸) خروجی ساختار فازی Fis2 است. این دو سیستم با طی کردن پنج گام اصلی ساختار فازی و عصبی که در بخش قبل توضیح داده شد، به دست آمده اند و اکنون در سیستم کنترلی قرار گرفته اند. \bar{W}_{i1} ارزش هر قاعده از سیستم فازی Fis1 و \bar{W}_{i2} ارزش هر قاعده در Fis2 را مشخص می کنند. این ارزش طبق لایه دوم و سوم

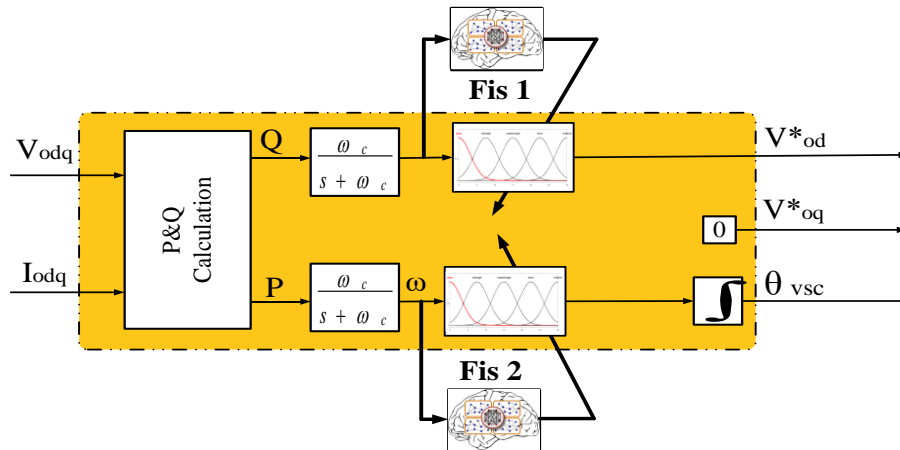
^۱ slack

ساختار فازی و عصبی معرفی شده و با توجه به توابع عضویت تعیین می‌شود. تابع (عدد) هر قاعده با f_i مشخص شده که بر اساس ساختار قواعد تعیین می‌شود. سایر معادلات مربوط به کنترل توان در ادامه بیان شده است.

$$\dot{q} = -\omega_c q + \omega_c (V_{od} i_{oq} - V_{oq} i_{od}) \quad (10)$$

$$\dot{p} = -\omega_c p + \omega_c (V_{od} i_{od} + V_{oq} i_{oq}) \quad (11)$$

$$\dot{\delta} = \omega_v - \omega_{co} \quad (12)$$

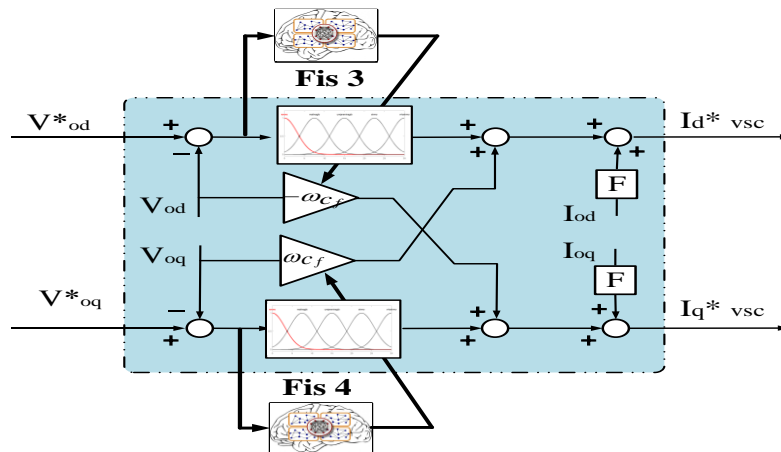


شکل ۲: نمودار بلوک دیاگرام کنترل کننده توان

در روابط فوق V_{od} ، V_{oq} مؤلفه‌های مستقیم و عمود ولتاژ کنترل کننده و i_{od} ، i_{oq} مؤلفه‌های مستقیم و عمود جریان خروجی هستند. ω_v فرکانس زاویه‌ای ریزشبه و ω_{com} سرعت زاویه‌ای چرخش چارچوب مشترک ریزشبه است. اختلاف زاویه بین چارچوب چرخشی مشترک ریزشبه و چارچوب چرخشی تولید پراکنده با δ بیان شده است.

۲-۲- کنترل ولتاژ و جریان

این دو بخش از کنترل کننده برای کنترل ولتاژ و خروجی تولید پراکنده و جریان القایی خروجی از فیلتر (فیلتر پایین گذر برای حذف هارمونیک‌های ناشی از کلیدزنی اینورتر) بکار گرفته می‌شود. سیگنال مرجع حلقه کنترل ولتاژ توسط کنترل توان و سیگنال مرجع حلقه کنترل جریان توسط کنترل ولتاژ ساخته می‌شود. به عبارت دیگر، این سیستم کنترلی به صورت سلسله مراتبی است. نمودار بلوک دیاگرام قسمت کنترل ولتاژ این کنترل کننده در شکل ۳ و قسمت کنترل جریان آن در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳: نمودار بلوک دیاگرام بخش کنترل کننده ولتاژ

$$i_{1d}^* = F \cdot i_{od} - \omega_n \cdot C_f \cdot v_{oq} + \sum_{i=1}^{25} \bar{W}_{i3} \cdot f_{i3} \quad (13)$$

$$i_{1q}^* = F \cdot i_{oq} + \omega_n \cdot C_f \cdot v_{od} + \sum_{i=1}^{25} \bar{W}_{i4} \cdot f_{i4} \quad (14)$$

$$\dot{\varphi}_d = v_{od}^* - v_{od} \quad (15)$$

$$\dot{\varphi}_q = v_{oq}^* - v_{oq} \quad (16)$$

در روابط فوق (۱۵،۱۶)، متغیرهای حالت متناظر با کنترل کننده ولتاژ φ_d و φ_q هستند.

روابط مربوط به بخش کنترل کننده جریان نیز در ادامه بیان شده است که γ_d و γ_q متغیرهای حالت متناظر آن است (۱۹،۲۰).

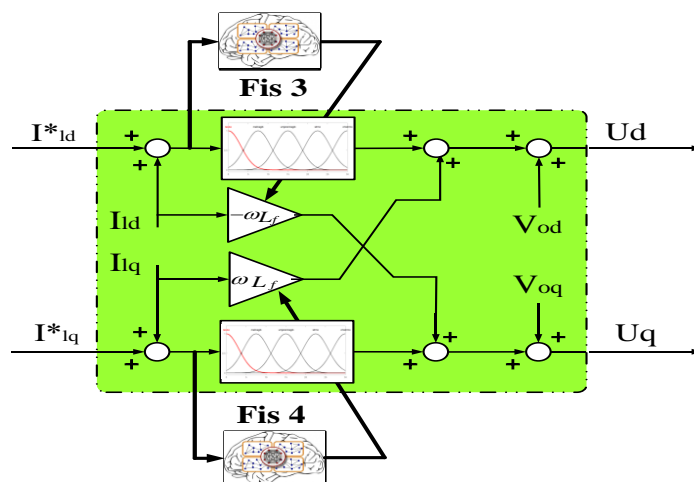
$$v_{1d}^* = -\omega_n \cdot L_f \cdot i_{1q} + \sum_{i=1}^{25} \bar{W}_{i3} \cdot f_{i3} \quad (17)$$

$$v_{1q}^* = \omega_n \cdot L_f \cdot i_{1d} + \sum_{i=1}^{25} \bar{W}_{i4} \cdot f_{i4} \quad (18)$$

$$\dot{\gamma}_d = i_{1d}^* - i_{1d} \quad (19)$$

$$\dot{\gamma}_q = i_{1q}^* - i_{1q} \quad (20)$$

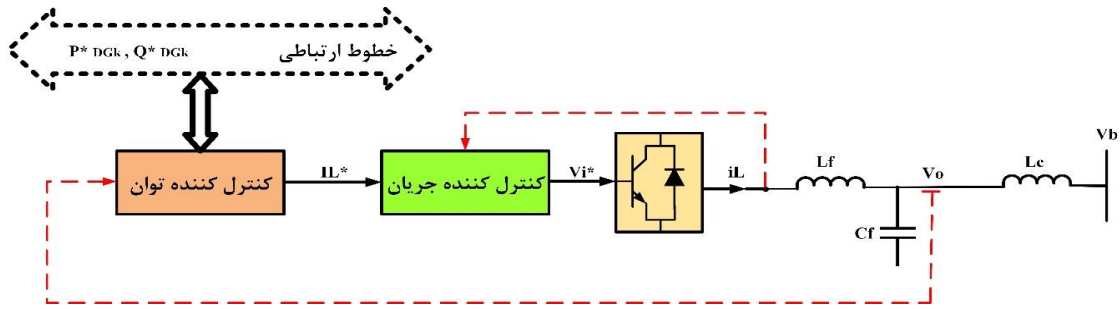
در روابط فوق نیز مشابه بخش توان خروجی، ساختارهای فازی مشخص شده اند که مربوط به سیستم فازی Fis_3 و Fis_4 است. این دو سیستم با طی کردن پنج گام اصلی ساختار فازی و عصبی که در بخش های قبل توضیح داده شد، به دست آمده اند و اکنون در سیستم کنترلی قرار گرفته اند. \bar{W}_{i3} ارزش هر قاعده از سیستم فازی Fis_3 و \bar{W}_{i4} ارزش هر قاعده در Fis_4 را مشخص می کنند. این ارزش طبق لایه دوم و سوم ساختار فازی و عصبی معرفی شده و با توجه به تابع های عضویت تعیین می شود. تابع (عدد) هر قاعده با f_i مشخص شده است که بر اساس ساختار قواعد تعیین می شود. سایر معادلات مربوط به کنترل توان در ادامه بیان شده است.



شکل ۴: نمودار بلوک دیاگرام بخش کنترل کننده جریان

در ادامه استراتژی کنترلی پیشنهاد شده برای منابع ذخیره ساز انرژی به عنوان کنترل کننده ثانویه ریزش شبکه برای پشتیبانی از کنترل اولیه معرفی شده است. بلوک دیاگرام کلی این کنترل کننده در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. این کنترل کننده برخلاف تولیدات پراکنده به صورت منبع جریان طراحی شده است. برای تعیین مقدار خطا، با

استفاده از لینک‌های مخابراتی ولتاژ و فرکانس بخش‌های مختلف ریزشبهه دریافت می‌شود و با میانگین‌گیری از کلیه داده‌های دریافتی و مقایسه آن با مقدار مرجع، مقدار خطا محاسبه می‌شود.



شکل ۵: بلوک دیاگرام سیستم کنترل ثانویه

۲-۳- سیستم کنترل توان

در این کنترل‌کننده مقادیر ولتاژ و فرکانس از بخش‌های مختلف توسط لینک‌های ارتباطی ریزشبهه دریافت می‌شود. از مقادیر دریافت شده میانگین گرفته می‌شود تا ولتاژ و فرکانس کلی ریزشبهه برای محاسبه عدم تعادل احتمالی بین تولید و مصرف مشخص شود. این مقدار به‌عنوان مرجعی برای عکس‌العمل سیستم ذخیره‌ساز اعمال می‌شود. طی این فرآیند خطای ولتاژ و فرکانس ریزشبهه محاسبه می‌شود. ساختار بلوکی سیستم کنترل توان در شکل ۶ نشان داده شده است.

با توجه به این شکل، مقادیر توان اکتیو و راکتیو کنترل‌کننده به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

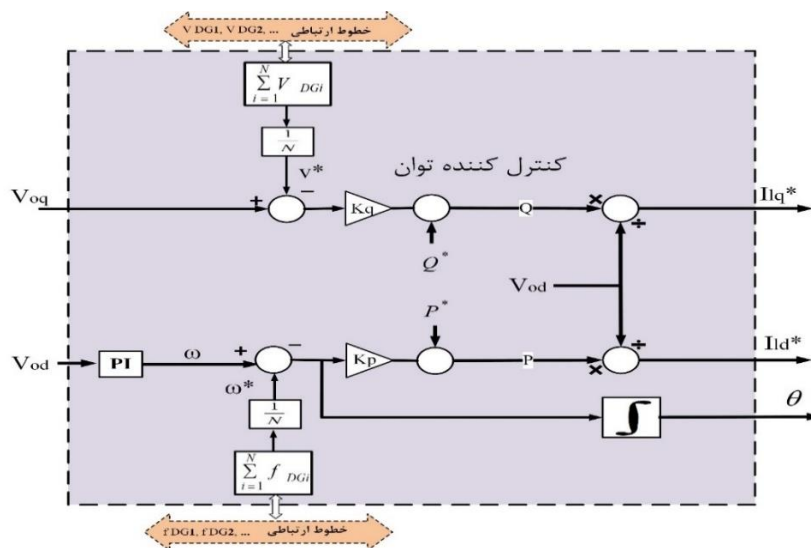
$$P = P^* - k_p(\omega - \omega^*) \quad (21)$$

$$Q = Q^* - k_q(v_{oq} - v^*) \quad (22)$$

مقادیر مرجع ریزشبهه نیز توسط روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega^* = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_{DGi}}{N} \quad (23)$$

$$v^* = \frac{\sum_{i=1}^N v_{DGi}}{N} \quad (24)$$



شکل ۶: نمودار بلوکی کنترل‌کننده توان

با محاسبه توان‌ها، مقادیر مرجع کنترل‌کننده جریان برابر است با:

$$I_{iq}^* = Q/v_{od} \quad (25)$$

$$I_{id}^* = P/v_{od} \quad (26)$$

وظیفه تضمین سنکرون شدن با شبکه در ساختار پیشنهادی به عهده حلقه قفل فاز است. در نقطه اتصال مشترک، معادلات دینامیکی و جبری این کنترل‌کننده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\varphi} = v_{od} \quad (27)$$

$$\omega = v_{od} \cdot k_{pp} + \varphi \cdot k_{ip} \quad (28)$$

$$\theta = \omega - \omega_{com} \quad (29)$$

در روابط بالا، φ متغیر حالت متناظر با کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی در حلقه قفل فاز است. ω فرکانس ریزشبه و ω_{com} فرکانس چرخش چارچوب مشترک ریزشبه^{۱۰} است. اختلاف زاویه بین چارچوب چرخشی مشترک ریزشبه و چارچوب چرخشی تولید پراکنده با θ بیان شده است.

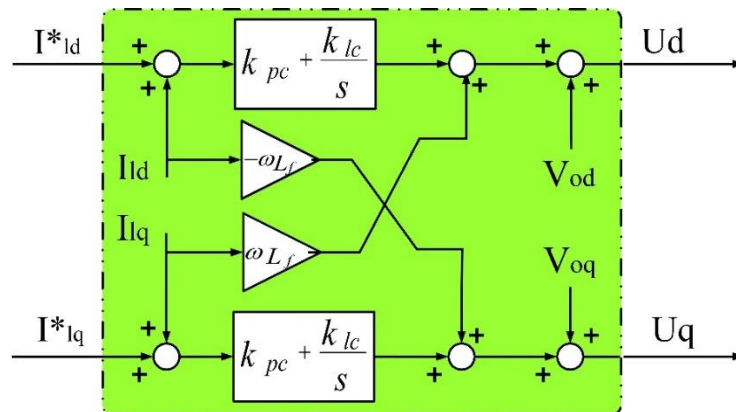
۲-۴- کنترل‌کننده جریان

کنترل‌کننده جریان برای کنترل جریان القایی در خروجی فیلتر بکار گرفته می‌شود. ساختار آن در شکل ۷ نمایش داده شده است.

معادلات مربوط به کنترل‌کننده جریان در ادامه بیان شده است:

$$\dot{\gamma}_d = i_{id}^* - i_{id} \quad (30)$$

$$\dot{\gamma}_q = i_{iq}^* - i_{iq} \quad (31)$$



شکل ۷: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده جریان

در روابط فوق متغیرهای حالت متناظر با کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی جریان γ_d و γ_q بیان شده‌اند. روابط در فرم فضای حالت به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$[\dot{\gamma}_{dq}] = [0][\gamma_{dq}] + B_{c1}[i_{dq}^*] + B_{c2} \begin{bmatrix} i_{dq} \\ v_{odq} \\ i_{odq} \end{bmatrix} \quad (32)$$

^{۱۰} Common microgrid rotational frame

$$\gamma_{dq} = \begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix}$$

$$B_{v1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$B_{v2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$v_{iq}^* = \omega_n \cdot L_f \cdot i_{id} + k_{pc}(i_{iq}^* - i_{iq}) + k_{ic} \cdot \gamma_q \quad (34)$$

$$v_{id}^* = -\omega_n \cdot L_f \cdot i_{iq} + k_{pc}(i_{id}^* - i_{id}) + k_{ic} \cdot \gamma_d \quad (35)$$

این کنترل کننده در فضای حالت به صورت زیر مدل می شود:

$$[v_{idq}^*] = C_c[\varphi_{dq}] + D_{c1}[v_{odq}^*] + D_{c2} \begin{bmatrix} i_{idq} \\ v_{odq} \\ i_{odq} \end{bmatrix} \quad (36)$$

که در آن:

$$C_c = \begin{bmatrix} k_{ic} & 0 \\ 0 & k_{ic} \end{bmatrix}$$

$$D_{c2} = \begin{bmatrix} -k_{pc} & -\omega_n L_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_n L_f & -k_{pc} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$D_{v1} = \begin{bmatrix} k_{pc} & 0 \\ 0 & k_{pc} \end{bmatrix}$$

۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش ابتدا ریزشبهه آزمون و بخش ها و پارامترهای مختلف آن معرفی می شوند. در ادامه با انجام آزمون ها و اعمال اغتشاش های مختلف، رفتار سیستم کنترل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می گیرد. تغییرات فرکانس و ولتاژ ریزشبهه برای ارزیابی پایداری آن در هر آزمون بررسی شده است. شبیه سازی بخش های مختلف ریزشبهه توسط نرم افزار MATLAB انجام شده است. سیستم کنترل پیشنهادی بر روی یک ریزشبهه اعمال می شود [۷]. ولتاژ نامی ریزشبهه ۳۸۰V و فرکانس نامی آن ۵۰HZ است. ریزشبهه از طریق یک ترانسفورماتور ۳۸۰V / ۲۰ kV به شبکه بالادست متصل شده است. وظیفه تغییر حالت بین اتصال به شبکه و جزیره ای بر عهده مدارشکن^{۱۱} نقطه اتصال مشترک است. لذا ریزشبهه امکان بهره برداری در هر دو حالت متصل به شبکه بالادست و جزیره ای را دارد. در سمت تولید، ریزشبهه دارای سه منبع تولید پراکنده است که در بخش های مختلف به ریزشبهه متصل شده اند. دو تولید پراکنده ۱ در باس یک و ۲ در باس هشت، قابل کنترل می باشند. بار کل ریزشبهه ۱۱۱ kVA است که در باس های مختلف توزیع شده است. اطلاعات مربوط به بار مشترکین و مقاومت و راکتانس شبکه در جدول های ۳ و ۲ بیان شده است. یک واحد ذخیره ساز انرژی الکتریکی نیز در باس ۲ واقع شده که ظرفیت ۱۰۰ kW دارد. علاوه بر تولیدات پراکنده ۱ و ۲، ریزشبهه دارای یک واحد تجدید پذیر بادی است که در باس پنج قرار گرفته و تولید آن وابسته به شرایط آب و هوایی (سرعت باد) است. واحد بادی^{۱۲} است که مستقیماً به ریزشبهه متصل شده است. اطلاعات دقیق تر از بخش های مختلف واحد بادی و میکرو توربین در مرجع [۷] و پیل سوختی در مرجع [۸] و پروتکل ارتباطی در مرجع [۹] بیان شده است. خلاصه اطلاعات مربوط به نوع و ظرفیت تولیدات پراکنده در جدول شماره ۴ بیان شده است.

^{۱۱} Breaker

^{۱۲} Fixed Speed Wind Generation

جدول شماره ۲: اطلاعات بارهای مشترکین ریزش شبکه

شماره باس	P	Q
واحد	(KVAR)	(KW)
۱	۱۲/۱	۲۰/۱
۲	۵/۱۸	۱۶/۱
۳	۱۱/۹	۱۹/۸
۴	۴/۱	۱۰
۵	۳/۹	۹/۵
۶	۴/۱	۱۰
۷	۳/۹	۹/۵
۸	۳	۵

جدول شماره ۳: مقاومت و راکتانس خطوط ریزش شبکه

راکتانس (Ω)	مقاومت (Ω)	به باس	از باس
۰/۰۷۷۵	۰/۱۵۰۱	۲	۱
۰/۰۹۶۹	۰/۱۸۷۹	۳	۲
۰/۱۹۳۷	۰/۳۷۵۵	۴	۳
۰/۱۹۰۵	۰/۵۶۳۷	۵	۴
۰/۰۷۷۵	۰/۱۵۰۳	۶	۵
۰/۱۷۴۷	۰/۳۳۸۱	۷	۶
۰/۰۷۷۵	۰/۱۵۰۱	۸	۷

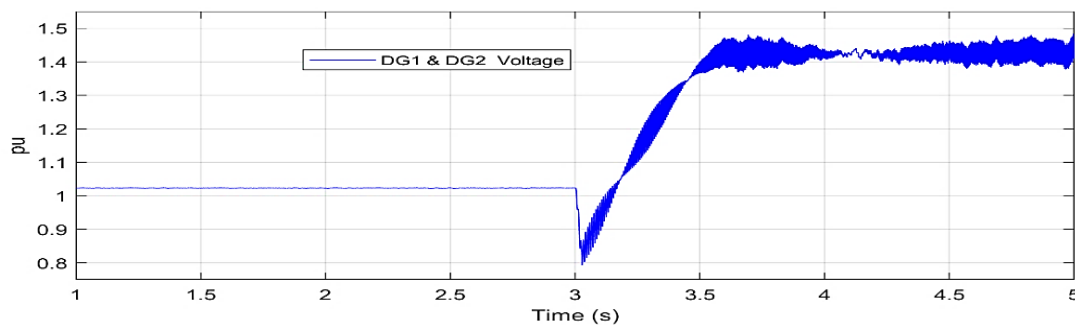
جدول شماره ۴: اطلاعات DGs در ریزش شبکه

توان نامی منبع (KVA)	نام منبع	نوع منبع
۱۰۰	DG۱	پیل سوختی
۵۰	DG۲	پیل سوختی
۱۰۰	ESS	منبع ذخیره ساز (باتری)
۲۱	WTG	توربین بادی

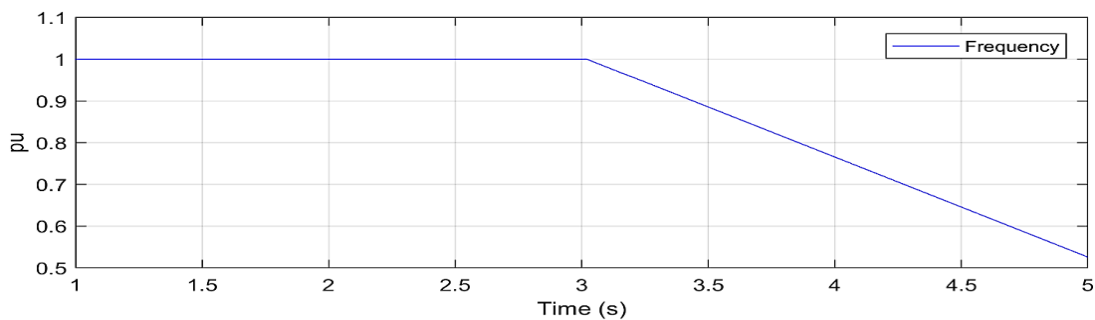
در ادامه با توجه به سیستم کنترل طراحی شده و تعامل بین منابع تولید پراکنده و منبع ذخیره ساز انرژی الکتریکی، سناریوهای مختلفی بر روی ریزش شبکه اعمال شده و عملکرد سیستم کنترلی با توجه به رفتار ولتاژ و فرکانس ریزش شبکه، مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است میزان تغییرات مجاز ولتاژ ± 0.1 pu و میزان تغییرات مجاز فرکانس ± 0.1 pu است. هدف از این سناریوها بررسی پایداری ریزش شبکه در دو حالت متصل به شبکه اصلی و جزیره‌ای و بررسی زمان گذار بین این دو حالت است. سیستم کنترلی باید قادر باشد در هر دو حالت، پایداری ریزش شبکه را تضمین کرده و در مقابل اغتشاش بزرگ و تغییر از حالت اتصال به حالت جزیره‌ای مقاومت کند. گذار امن و منعطف بین دو حالت اتصال و جزیره‌ای چه با دستور بهره‌بردار ریزش شبکه باشد و چه به صورت غیرمنتظره به دلیل وقوع اغتشاش، از اصلی ترین دلایل اثرگذار بر تاب آوری ریزش شبکه‌ها است. در سناریوی مورد نظر، ریزش شبکه ابتدا در حالت متصل به شبکه در حال بهره‌برداری است و در $t=3s$ ناگهان از حالت متصل به حالت جزیره‌ای تغییر حالت می‌دهد. مطابق این سناریو، در حالت متصل حدود $65kW$ از توان مورد نیاز ریزش شبکه توسط شبکه اصلی فراهم می‌شود. از سوی دیگر، در این حالت شبکه اصلی مانند پشتیبانی محکم برای ریزش شبکه است. بدین معنا که اختلاف بین توان اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرفی ریزش شبکه توسط شبکه بالادست تعدیل می‌شود. با جدا شدن از شبکه اصلی، ریزش شبکه با کمبود $65kW$ توان مواجه خواهد شد. قابل ذکر است به دلیل پایین بودن سرعت باد در این سناریو (پایین تر از حد پایین توربین بادی یعنی $5m/s$)، واحد بادی هیچ تولیدی ندارد. کمبود توان ایجاد شده به دلیل جدا شدن شبکه، باید توسط تولیدات پراکنده داخلی تأمین شود. این تولیدات باید به سرعت شرایط را ارزیابی کرده و به صورت محلی به سیستم کنترل اطلاع دهند.

پس از آن با اتخاذ فرمان مناسب در سیستم کنترل، توان خروجی خود را بالا ببرند و میزان تولید و مصرف را برابر کنند. در غیر این صورت، ولتاژ و فرکانس ریزش شبکه از محدوده مجاز خارج شده و ریزش شبکه ناپایدار می‌شود.

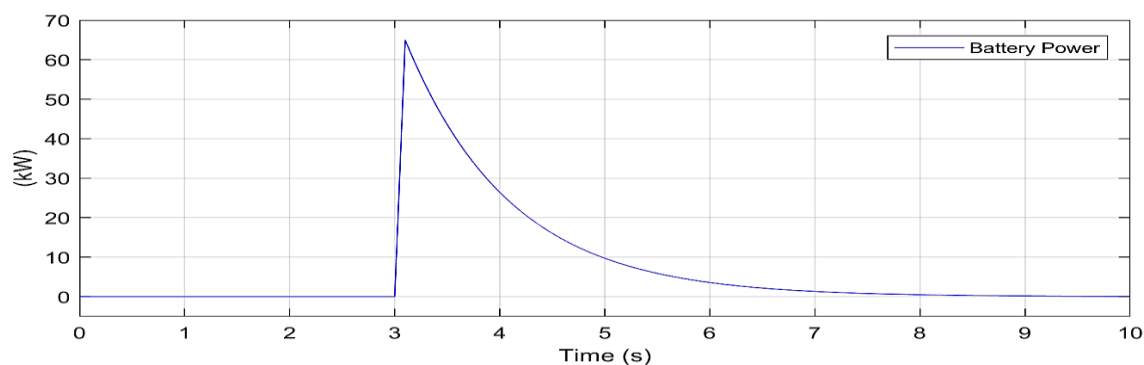
با توجه به ساختار کنترل تولیدات پراکنده، با رفتن ریزش شبکه به حالت جزیره‌ای و به دلیل کمبود توان ایجاد شده، بخش کنترل کننده افت با یک تأخیر ارتباطی کاهش ولتاژ و فرکانس و سپس کمبود توان را تشخیص داده و فرمان کنترلی افزایش توان را صادر می‌کند. باید در نظر داشت که سرعت پاسخگویی منابع اولیه پایین است. اگرچه فرمان افزایش توان از سوی سیستم کنترلی با تأخیر اندک صادر شده است، اما تولیدات پراکنده به دلیل پایین بودن سرعت منبع اولیه خود، توانایی افزایش سریع توان خروجی را ندارد. به همین دلیل، علی‌رغم عملکرد صحیح سیستم کنترلی، افزایش توان تولیدات پراکنده با تأخیر چند ثانیه‌ای (مجموع تأخیر لینک ارتباطی و تأخیر منبع انرژی اولیه) انجام می‌شود که همین تأخیر برای ناپایدار شدن ریزش شبکه کافی است. در شکل‌های ۸ و ۹ شکل موج ولتاژ تولیدات پراکنده و فرکانس ریزش شبکه در حالتی که سیستم ذخیره‌ساز و ساختار تعاملی و بهینه آن وجود ندارد و از سیستم کنترلی مرسوم ([۱۱] و [۱۰]) استفاده شده، نشان داده شده است. مطابق این اشکال، به دلیل برطرف نشدن سریع اختلاف بین تولید و مصرف، انحراف فرکانس و ولتاژ بسیار افزایش یافته و ریزش شبکه ناپایدار شده است. منبع ذخیره‌ساز در شرایط عادی به‌طور کامل شارژ شده و سرعت پاسخگویی بالایی دارد. شکل ۱۰، توان خروجی منبع ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد. تا قبل از تغییر حالت و وقوع اغتشاش، توانی بین باتری و ریزش شبکه مبادله نمی‌شود. به محض تغییر حالت و کمبود توان در ریزش شبکه، منبع ذخیره‌ساز به‌واسطه سیستم کنترلی به‌سرعت وارد عمل شده و به میزان کمبود توان ایجاد شده، به ریزش شبکه توان تزریق می‌کند. لذا کمبود ایجاد شده به‌واسطه خروج شبکه بالادست جبران می‌شود. با افزایش تدریجی توان خروجی تولیدات پراکنده، توان تزریق شده توسط باتری نیز با همان آهنگ کاهش می‌یابد. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که کمبود توان به‌طور کامل توسط تولیدات پراکنده فراهم شود. توان خروجی واحدهای تولید پراکنده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تأخیر در افزایش توان این تولیدات کاملاً مشهود است. مطابق این شکل، توان خروجی تولیدات پراکنده به‌آرامی افزایش می‌یابد.



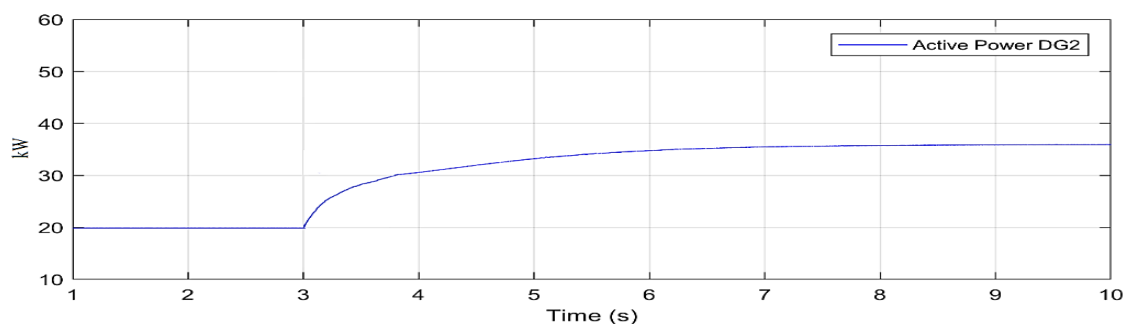
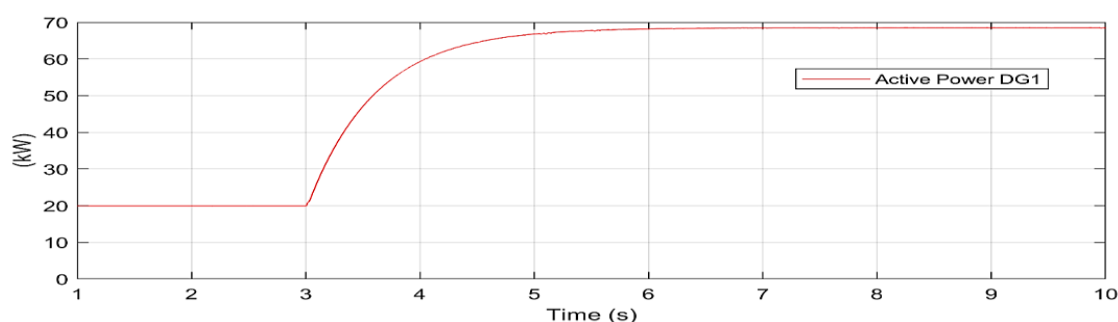
شکل ۸: مقدار مؤثر ولتاژ DGها در صورت عدم استفاده از ساختار پیشنهادی



شکل ۹: مقدار مؤثر فرکانس ریزش شبکه در صورت عدم استفاده از ساختار پیشنهاد شده



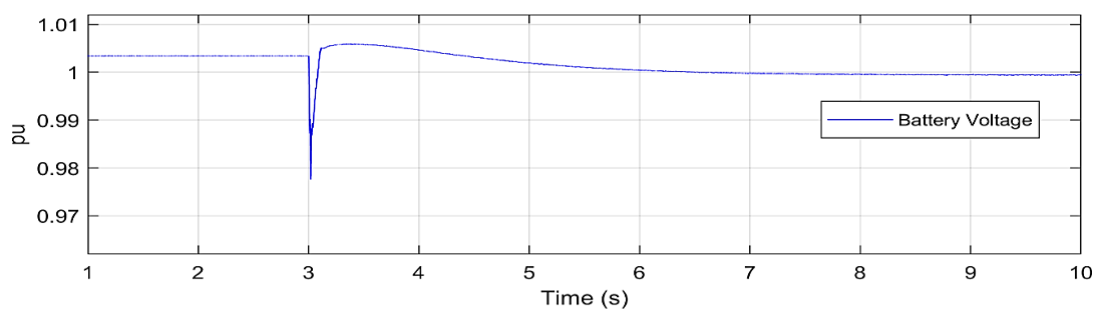
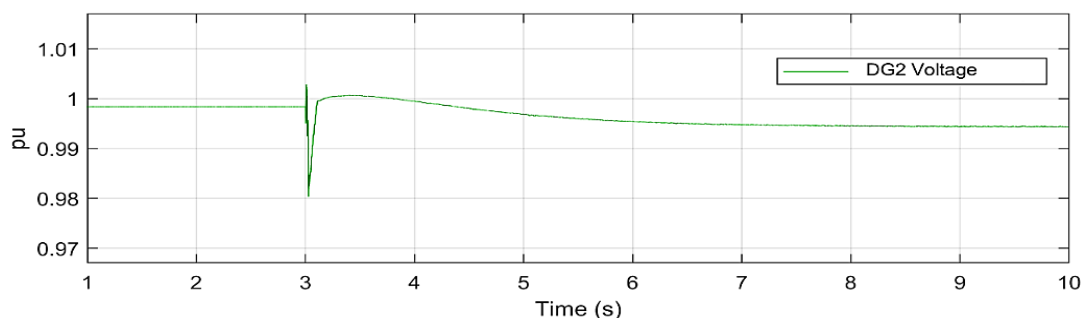
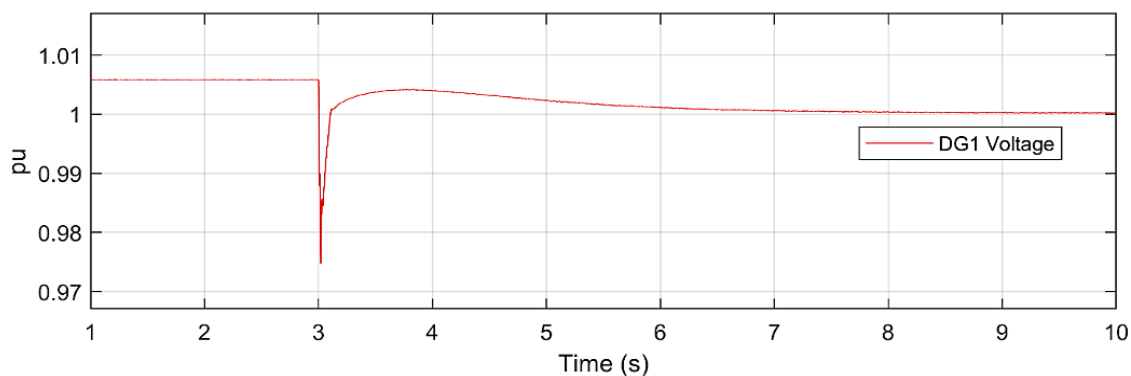
شکل ۱۰: توان تزریقی به شبکه از ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی



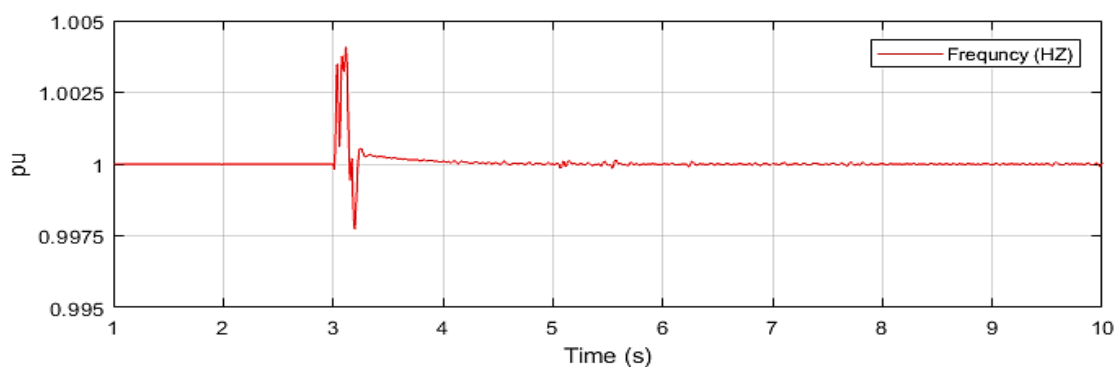
شکل ۱۱: توان تولیدی واحدهای DG_۱ و DG_۲

با استفاده از کنترل سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی^{۱۳} برای تولیدات پراکنده و تعامل با منبع ذخیره‌ساز و عکس‌العمل به‌موقع آن، انتظار می‌رود برخلاف حالت قبل، ولتاژ و فرکانس در محدوده مقادیر نامی باقی بمانند و تاب‌آوری ریزشبه افزایش یابد. مطابق شکل ۱۲ و ۱۳ که شکل موج ولتاژ تولیدات پراکنده و فرکانس ریزشبه را نشان می‌دهند، همکاری بین تولیدات پراکنده و منبع ذخیره‌ساز بسیار کارآمد بوده است. همان‌طور که در این اشکال مشخص است، سیستم پیشنهادی هم در حالت متصل به شبکه و هم در حالت جزیره‌ای توانسته است گام مهمی در افزایش انعطاف‌پذیری ریزشبه بردارد و پایداری ولتاژ و فرکانس را تضمین کند. علاوه بر این، حالت گذار را نیز با کمترین انحراف پشت سر گذاشته است.

^{۱۳} Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System



شکل ۱۲: تغییرات مقدار مؤثر ولتاژ DGs و منبع ذخیره‌ساز



شکل ۱۳: مقدار مؤثر فرکانس ریزشبه

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم کنترل منابع ذخیره‌ساز در تعامل با تولیدات پراکنده کنترل شده با سیستم کنترل سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی برای افزایش انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری ریزشبه با حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس در دو حالت متصل به شبکه بالادست و جزیره‌ای پیشنهاد شد. این روش از یک سو با ایجاد تعامل بین تولیدات پراکنده و منبع ذخیره‌ساز، سرعت پاسخ ریزشبه به اغتشاشات را بسیار افزایش داد و از سوی دیگر با طراحی سیستم کنترلی کارآمد و بهینه، پایداری ولتاژ و فرکانس

را تضمین کرد که منجر به افزایش تاب آوری ریزش شبکه شد. با توجه به اینرسی پایین ریزش شبکه، حضور منبع ذخیره ساز در کنار تولیدات پراکنده و افزایش سرعت پاسخ با تعامل بین منبع ذخیره ساز و تولیدات پراکنده، کمک بسیار زیادی به افزایش انعطاف پذیری ریزش شبکه علی رغم سرعت پاسخ پایین منابع انرژی اولیه کرده است. مطابق نتایج، سیستم پیشنهادی قادر است هم در زمان متصل به شبکه و هم در حالت جزیره ای به خوبی عمل نموده و پایداری ریزش شبکه را تضمین نماید. علاوه بر این، کنترل کننده پیشنهادی قادر است زمان تغییر وضعیت بین این دو حالت را نیز با کمترین انحراف ولتاژ و فرکانس پشت سر گذاشته و اختلاف ایجاد شده بین تولید و مصرف را به سرعت تعدیل کند.

مراجع

- [1] G. Dileep, "A survey on smart grid technologies and applications," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2589-2625, 2020, doi:10.1016/j.renene.2019.08.092.
- [2] S. Chandak and P. K. J. I. J. o. E. R. Rout, "The implementation framework of a microgrid: A review," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 3, pp. 3523-3547, 2021, doi:10.1002/er.6064.
- [3] M. F. Zia, M. Benbouzid, E. Elbouchikhi, S. Muyeen, K. Techato, and J. M. J. I. A. Guerrero, "Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 19410-19432, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968402.
- [4] M. Yadav, N. Pal, and D. K. J. I. A. Saini, "Microgrid Control, Storage, and Communication Strategies to Enhance Resiliency for Survival of Critical Load," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 169047-169069, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3023087.
- [5] K. C. Meje, L. Bokopane, and K. Kusakana, "Microgrids control strategies: A survey of available literature," in *2020 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, 2020, pp. 167-173, doi: 10.1109/ICSGCE49177.2020.9275651.
- [6] N. Pitalúa-Díaz *et al.*, "An ANFIS-based modeling comparison study for photovoltaic power at different geographical places in Mexico," *Energies*, vol. 12, no. 14, p. 2662, 2019, doi: 10.3390/en12142662.
- [7] Z. Liu, C. Su, H. Høidalen, and Z. Chen, "A Multiagent System-Based Protection and Control Scheme for Distribution System With Distributed-Generation Integration," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 536-545, 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2585579.
- [8] R. M. J. E. c. Kamel and management, "Maintaining stability of standalone Micro-Grid by employing electrical and mechanical fault ride through techniques upon fixed speed wind generation systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 74, pp. 149-161, 2013, doi:10.1016/j.enconman.2013.04.031.
- [9] R. M. Kamel and B. Kermanshahi, "Design and implementation of models for analyzing the dynamic performance of distributed generators in the micro grid part I: Micro turbine and solid oxide fuel cell," *SCIENTIA IRANICA*, vol.17, no.1, pp.47-58, 2010.
- [10] D. K. Dheer, N. Soni, and S. Doolla, "Improvement of small signal stability margin and transient response in inverter-dominated microgrids," *Sustainable Energy, Grids Networks*, vol. 5, pp. 135-147, 2016, doi:10.1016/j.segan.2015.12.005.
- [11] Y. Peng, Z. Shuai, J. M. Guerrero, Y. Li, A. Luo, and Z. J. J. I. T. o. I. E. Shen, "Performance improvement of the unbalanced voltage compensation in islanded microgrid based on small-signal analysis," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 7, pp. 5531-5542, July 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2934021.