



**University of Kurdistan**

Dept. of Electrical and Computer Engineering

*Smart/Micro Grid Research Center*

[smgrc.uok.ac.ir](http://smgrc.uok.ac.ir)

## **Application of Neuro-Fuzzy Controller on Voltage and Frequency Stability in Islanded Microgrids**

Naghshbandi A H, Shokoohi S, Bevrani H

Published (to be published) in: ***Journal Electrical Eng University of Tabriz***

(Expected) publication date: **2012**

### **Citation format for published version:**

Naghshbandi A H, Shokoohi S, Bevrani H (2011) Application of Neuro-Fuzzy Controller on Voltage and Frequency Stability in Islanded Microgrids. *Journal of Electrical Eng.*, 41(2), pp. 41-49, University of Tabriz.

### **Copyright policies:**

- Download and print one copy of this material for the purpose of private study or research is permitted.
- Permission to further distributing the material for advertising or promotional purposes or use it for any profit-making activity or commercial gain, must be obtained from the main publisher.
- If you believe that this document breaches copyright please contact us at [smgrc@uok.ac.ir](mailto:smgrc@uok.ac.ir) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

## کاربرد کنترل کننده فازی- عصبی در پایداری ولتاژ و فرکانس ریزشکته‌های جزیره‌ای

علی حسامی نقشبندی<sup>۱</sup>، استادیار، شورش شکوهی<sup>۲</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد، حسن بیورانی<sup>۳</sup>، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - hesami@uok.ac.ir

۲- واحد کنترل و ابزار دقیق - شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران - خرم‌آباد - ایران - shokoohi@ieee.org

۳- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران -

bevrani@ieee.org -

**چکیده:** در این مقاله یک روش کنترل افت جدید مبتنی بر رهیافت فازی-عصبی در یک ریزشکته جزیره‌ای مطرح گردیده است که با آموزش مناسب، در هنگام تغییرات شدید بار و یا خروج منابع تولید پراکنده از ناپایداری و فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کند. یکی از چالش‌های موجود در ساختار ریزشکته، عدم وجود توان پشتیبان در حالت جزیره‌ای است و با توجه به احتمال همیشگی تغییر توان در بار و همچنین ماهیت غالباً نوسانی تولید منابع تولید پراکنده، ناتعادلی بین بار و تولید در ریزشکته‌های جزیره‌ای کم تا بیش وجود دارد. این ناتعادلی منجر به نوسانات ولتاژ و فرکانس می‌شود و افزایش این ناتعادلی به ناپایداری سیستم می‌انجامد. لذا ارائه یک ساختار کنترلی قابل اطمینان جهت جلوگیری از ناپایداری سیستم و خاموشی بارهای حساس ضروری است. ساختار کنترلی فازی-عصبی ارائه شده در این مقاله به گونه‌ای طراحی شده است که صرفنظر از نوع و ساختار ریزشکته، می‌تواند پایداری سیستم را حفظ و نوسانات ولتاژ و فرکانس را به حداقل برساند. مهمترین مزیت روش پیشنهادی، عدم وابستگی آن به ساختار ریزشکته و شرایط کاری است.

**واژه‌های کلیدی:** ریزشکته، تولید پراکنده، حالت جزیره‌ای، کنترل کننده فازی-عصبی، مشخصه‌های افت.

## Application of Neuro-Fuzzy Controller on Voltage and Frequency Stability in Isolated Microgrids

Ali Hesami Naghshbandy, Assistant Professor, Shoresh Shokoohi, M.Sc Student,  
Hassan Bevrani, Associate Professor

**Abstract:** In this paper a novel technique for droop control in islanded Microgrids (MGs) based on neuro-fuzzy technique is presented. With a proper training, this technique can prevent network from instability and collapse during violent changes in load. Main MGs challenge in the islanded mode is the lack of backup power, where due to change in load, an imbalance occurs between consumption and generation. The imbalance leads to voltage and frequency fluctuations. Increasing the imbalance may lead to the system instability. Therefore, existence a reliable control structure to prevent the system instability and collapse is needed. The proposed neuro-fuzzy control structure is designed to maintain the system stability and minimizing voltage and frequency fluctuations regardless of MG type and its structure. The most important advantage of the proposed controller is its independency from the MG structure and operating conditions.

**Keywords:** Microgrid, Distributed generation, Islanded mode, ANFIS controller, Droop characteristics.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۰/۹/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۱/۸/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۷/۲۶

نام نویسنده مسئول: علی حسامی نقشبندی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سنندج - دانشگاه کردستان - دانشکده - مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

دو دسته اصلی ریزمنبع وجود دارند. یکی منابع DC همانند سلول‌های سوختی و خورشیدی و دیگری منابع فرکانس بالای AC همانند میکروتوربین‌ها هستند که نیاز به یکسو سازی دارند. در هر دو مورد بایستی ولتاژ DC بدست آمده به ولتاژ AC قابل قبول تبدیل شود [۴]. استاندارد IEEE STD1547-2003 ملزومات تکنیکی جهت اتصال واحدهای تولید پراکنده به سیستم قدرت الکتریکی را شرح می‌دهد [۱۰].

ظرفیت نهایی منابع تولید پراکنده زیاد نیست و اثرات قابل توجهی روی شبکه اصلی ندارند ولی انتظار می‌رود که با افزایش تراکم آن‌ها در شبکه‌های قدرت در دهه‌های آتی، این اثرات بیشتر خود را نشان دهند [۶]. ریز شبکه در نقطه اتصال مشترک<sup>۶</sup> (PCC) توسط یک کلید قدرت به شبکه اصلی متصل می‌شود. هر واحد تولید پراکنده توسط یک واسط الکترونیک قدرت در نقطه اتصال<sup>۷</sup> (POC) مطابق شکل (۱) به ریز شبکه متصل می‌شود [۱۱]. اساس طراحی ریز شبکه‌ها باید به شکلی باشد که بتواند در هر دو حالت وصل و قطع از شبکه اصلی به تغذیه بارهای محلی ادامه دهد. در هنگام بروز مشکل در سیستم قدرت به جای خارج شدن منابع پراکنده از مدار، آنها و قسمتی از بارهای نزدیکشان از شبکه اصلی جدا شده و به اصطلاح به صورت جزیره‌ای و خودگردان به کار خود ادامه می‌دهند [۶].

اما جدا شدن یک ریز شبکه از شبکه سراسری به صورتی پایدار و به نحوی که خللی برای مصرف کننده‌ها ایجاد نشود یکی از مشکلات اصلی پیش روی طراحان ریز شبکه است. از این رو یکی از مسائل مهم در این زمینه، کنترل منابع ریز شبکه مخصوصاً در حالت جزیره‌ای می‌باشد، بدینگونه که منابع بایستی ولتاژ و فرکانس سیستم را کنترل و مجموعه‌ی بارها را بین خود تقسیم کنند. بنابراین ریز شبکه‌ها باید قابلیت مدیریت سریع تغییرات توان و فرکانس حادث در شبکه، حتی در مواردی که توان تولیدی کمتر از میزان توان مورد نیاز مصرف کنندگان است، را داشته باشند.

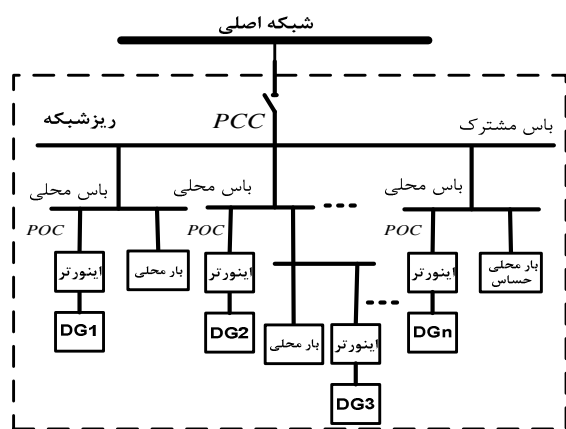
برای رسیدن به این هدف و کنترل پارامترهای اساسی شبکه مانند ولتاژ و فرکانس، وجود چندین کنترل کننده محلی و مرکزی در ریز شبکه الزامی است.

امروزه تغییرات وسیعی در حوزه توزیع سیستم‌های قدرت در حال وقوع است. تراکم حضور منابع تجدید پذیر کوچک همانند سلول‌های خورشیدی، سلول‌های سوختی و موتورهای احتراق داخلی کوچک در سطوح توزیع روز به روز بیشتر می‌شود. این افزایش حضور منابع تجدید پذیر انرژی در سیستم‌های توزیع، ساختار جدیدی بنام ریز شبکه را به وجود آورده است [۱]. تا پیش از این، سیستم‌های توزیع، سیستم‌هایی وابسته بودند چون در کنار سیستم‌های انتقال موجودیت پیدا می‌کردند. با پیدایش تولید پراکنده و ریز شبکه، در سیستم‌های توزیع هر دو حالت مصرف و تولید نمود پیدا کرد [۲].

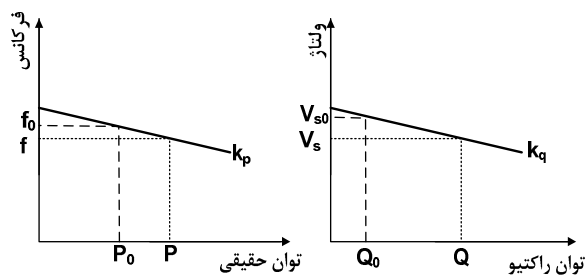
سیستم‌های ریز شبکه دارای اندازه‌های مختلفی هستند و می‌توانند به شبکه اصلی قدرت متصل شوند و یا به طور جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار بگیرند [۳]. هر ریز شبکه از چندین منبع تولید توان الکتریکی کوچک به نام منابع تولید پراکنده تشکیل شده است که وظیفه آن‌ها تامین توان بارهای محلی است [۴]. در مکان‌های حساس همچون ساختمان‌های تجاری- صنعتی و بیمارستان‌ها که عموماً اینرسی کمی دارند و کل بار مصرفی آنها زیر یک مگاوات است، وجود یک تولید پشتیبان برای مواقع خاموشی ضروری است. به طوریکه اگر به هر دلیلی سیستم توزیع دچار اغتشاشی شود که برق تولیدی با کیفیت مناسب به مصرف کننده نرسد و از استانداردهای جهانی پایین‌تر رود، سیستم‌های حفاظتی عمل کرده و ریز شبکه از سیستم توزیع جدا شده و وظیفه تامین توان بارهای محلی حساس و غیر حساس را به عهده می‌گیرد [۶، ۵]. به عبارت دیگر، وظیفه اصلی این نوع از ریز شبکه‌ها حفظ کیفیت توان مطلوب برای این گونه مکان‌های حساس است.

منابع تولید پراکنده در سیستم‌های ریز شبکه می‌توانند ژنراتورهای بادی، میکروتوربین‌ها، سلول‌های خورشیدی، سلول‌های سوختی و یا منابع دیگر به همراه وسایل ذخیره ساز انرژی همچون باتری‌ها، چرخ‌طیارها و خازن‌های انرژی باشند [۸، ۷]. ریز شبکه‌ها علی‌رغم مزایای فراوان از قبیل کاهش مشکلات زیست محیطی، کاهش هزینه‌های ناشی از احداث نیروگاه جدید، افزایش قابلیت اطمینان سیستم، افزایش بازدهی در اثر کاهش تلفات توان انتقالی، کاهش تراکم در فیدهای توزیع، مشکلات جدیدی را در سیستم‌های توزیع به وجود آورده‌اند [۹، ۶]. از جمله این مشکلات می‌توان به تغییر الگوی پخش بار، افزایش هارمونیک‌های فرکانس بالا در اثر کاربرد ادوات الکترونیک قدرت و نوسانات فرکانس و ولتاژ اشاره کرد [۶].

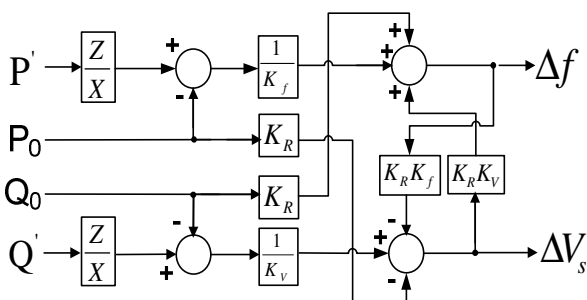
در یک ریز شبکه، واحدهای تولیدی کوچکی همراه با یک واسط الکترونیک قدرت<sup>۲</sup> (اینورتر<sup>۳</sup>) وجود دارند که ریزمنبع<sup>۴</sup> نامیده می‌شوند [۶]. این منابع در مناطق محلی قرار می‌گیرند و مزایایی از قبیل داشتن هزینه پایین برای مصرف کننده و تولید کننده، ولتاژ کم، قابلیت اطمینان بالا، افزایش افزونگی و قوت<sup>۵</sup> سیستم و انعطاف‌پذیری بالا دارند [۴].



شکل (۱): ساختار کلی یک ریز شبکه



شکل (۲): منحنی مشخصه‌های افت ریزشکته‌های سلفی



شکل (۳): دیاگرام بلوکی روش کنترل افت تعمیم یافته [۱۲]

شکل (۳) بیان می‌دارد که با توجه به میزان مقاومتی و سلفی بودن ریزشکبه، هم تغییرات فرکانس و هم تغییرات ولتاژ ناشی از هر دو پارامتر توان حقیقی و توان راکتیو می‌باشند و دیگر نمی‌توان دو بحث کنترل افت توان حقیقی- فرکانس و توان راکتیو-ولتاژ را به صورت مجزا بررسی کرد زیرا تغییرات توان بار مصرفی (حقیقی و راکتیو) همزمان هم روی ولتاژ و هم روی فرکانس اثر دارند. نتایج بدست آمده نشانگر کارآبودن این روش در پایداری ریزشکبه تحت تغییرات شدید بار حقیقی و راکتیو است.

مشکل اصلی این روش، وابسته بودن آن به پارامترهای خط (R) و (X) می‌باشد. به طوری که در ساختار کنترلی هر منبع پراکنده وجود یک R و X مجزا، که به بار متصل است، لازم است. حال آنکه ممکن است به تعداد منابع پراکنده خط الکتریکی بین بار و تولید وجود نداشته باشد و لذا علی‌رغم نتیجه واقعی تر کنترل افت پیشنهادی در [۱۲]، ممکن است انتخاب مقدار برای R و X به کار برده شده در این ساختار کنترلی با مشکل مواجه گردد. برای مثال، ریزشکبه شکل (۴) را در نظر بگیرید. این ریزشکبه شامل سه منبع پراکنده است که توسط دو خط الکتریکی به دو بار متصل شده‌اند. لذا سه ساختار کنترل افت تعمیم یافته، همانند شکل (۳)، با سه مقدار R و X مجزا بایستی برای سه منبع پراکنده در نظر گرفته شود. حال آنکه در واقعیت دو مقدار R و X وجود دارند. در ضمن، با توجه به ساختار ریزشکبه نشان داده شده، نمی‌توان تعیین نمود که هر کدام از این دو خط بین کدام بار و کدام منبع پراکنده قرار گرفته‌اند.

در [۱۲] یک روش کنترل افت با ساختاری متفاوت از روش‌های پیشین ارائه شده است. در این روش تعمیم یافته تحت تغییرات شدید بار، فرکانس و ولتاژ سیستم به صورت همزمان کنترل می‌شود. به عبارت دیگر از هر دو پارامتر توان حقیقی و غیر حقیقی در کنترل افت ولتاژ و فرکانس استفاده شده است. در این روش شاخصی به نام شاخص میزان مقاومتی بودن خط ارائه شده است که به پارامترهای خط بستگی دارد. در این مقاله، این ساختار توسط روش فازی-عصبی مدل شده و این مدل به گونه‌ای آموزش دیده است که صرفنظر از اینکه منبع پراکنده در چه ریزشکبه‌ای و با چه ساختاری قرار گرفته است، می‌تواند عملکرد روش کنترل افت ذکر شده را با دقت بالایی شبیه سازی و اجرا کند.

نتایج شبیه‌سازی در MATLAB و شاخص‌های تعریف شده در جهت میزان اعتبار مدل کنترلی مورد نظر، گویای دقت بالای مدل می‌باشد. نتایج نهایی بیانگر کارایی بالای روش پیشنهادی تحت تغییرات شدید بار حقیقی و راکتیو است.

## ۲- هماهنگی بین کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشکبه‌ها

طبقه‌بندی‌های مختلفی برای ریزشکبه‌ها انجام گرفته است. این طبقه‌بندی‌ها می‌تواند بر اساس ظرفیت، سطح ولتاژ، میزان حساس بودن بارها و نوع روش کنترلی باشد. اما یک طبقه‌بندی دیگر نیز برای ریزشکبه‌ها وجود دارد که عبارت است از طبقه‌بندی بر اساس نوع ساختار و نحوه ارتباط بین تولید و مصرف. منابع تولید پراکنده در ریزشکبه‌ها توسط خط‌هایی به بارهای محلی متصل هستند. این خط‌ها ممکن است مقاومتی و یا سلفی باشند. بر همین اساس ریزشکبه‌ها را به دو دسته ریزشکبه‌های مقاومتی<sup>۸</sup> و ریزشکبه‌های سلفی<sup>۹</sup> تقسیم‌بندی کرده‌اند. در ریزشکبه‌های سلفی از مشخصه‌های افت توان حقیقی- فرکانس (P/f) و توان راکتیو-ولتاژ (Q/V) و در ریزشکبه‌های مقاومتی از مشخصه‌های افت توان حقیقی- ولتاژ (P/V) و تون غیرحقیقی- فرکانس (Q/f) استفاده شده است [۲۷-۱۳]. به عنوان مثال مشخصه‌های افت P/f و Q/V در شکل (۲) نشان داده شده است. اما اگر مقاومت و اندوکتانس خط‌ها در ریزشکبه تفاوت چندانی با هم نداشته باشند دیگر روش‌های مذکور دقت و کارایی مورد نیاز را ندارند.

در [۱۲] یک روش کنترل افت همزمان ولتاژ و فرکانس ارائه شده است که در آن با توجه به میزان مقاومتی و سلفی بودن خط، درصد مشارکت توان حقیقی و راکتیو را در کنترل افت ولتاژ و فرکانس مشخص می‌کند. به عبارت دیگر در کنترل ولتاژ و فرکانس، همزمان دو پارامتر توان حقیقی و راکتیو خروجی مشارکت می‌کنند. شاخص  $K_R = R / X$  جهت تعیین میزان مقاومتی- سلفی بودن خط ارائه شده است. ساختار این روش کنترلی در شکل (۳) آورده شده است.

مناسی باشد. همچنین، برای تخمین بهتر و تلفات توان کمتر، قیودی به شکل رابطه (۲) می‌تواند در نظر گرفته شود.

$$\begin{cases} |df_i| \leq E_f & \& \quad |dv_i| \leq E_v \\ 0.01^{\Omega} \leq R_i \leq 5^{\Omega} \\ 0.01^{\Omega} \leq X_i \leq 0.3^{\Omega} \end{cases} \quad (2)$$

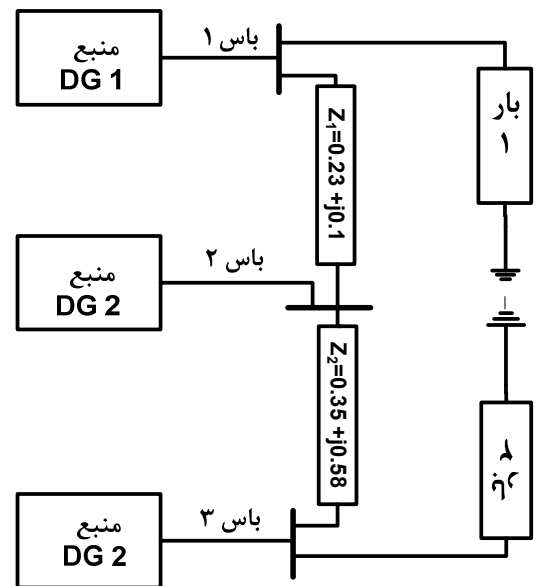
که در آن:

$E_f$	بیشینه انحراف فرکانس قابل قبول
$E_v$	بیشینه انحراف ولتاژ قابل قبول
$R_i$	مقاومت مجازی خط منبع پراکنده نام
$X_i$	راکتانس مجازی خط منبع پراکنده نام.

هر چند استفاده از الگوریتم‌های تکاملی *PSO* در تخمین بهینه پارامترهای خط مورد نیاز روش کنترل افت تعمیم‌یافته برای ریزشبهک-هایی با ابعاد کوچک، همچون ریزشبهک شکل (۴)، می‌تواند موثر باشد اما چنانچه ریزشبهک مورد نظر دارای ابعاد وسیعی باشد، به طور مثال تعداد واحدهای تولید پراکنده موجود در ریزشبهک زیاد باشند، تعداد پارامترهایی که بایستی تخمین زده شوند زیاد شده و این مستلزم محاسبات و صرف زمان بیشتر است. به عبارت دیگر، در استفاده از روش‌های تکاملی برای تخمین پارامترهای خط ریزشبهک‌های گسترده، بایستی در هر مرحله تکرار، سیستم اجرا شود تا مقادیر مورد نیاز تابع هدف ذخیره گردد که فرآیندی زمانبر است. از سوی دیگر، هر چقدر ابعاد سیستم بزرگتر شود احتمال اینکه روش تکاملی بکار برده شده در مینیمم‌های محلی گیر بیفتد بیشتر می‌شود. برای رفع این مشکل بایستی ساختاری ارائه داد که هم دقت روش کنترل افت تعمیم یافته را داشته باشد و هم به ساختار ریزشبهک وابسته نباشد. استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی <sup>۱۲</sup> (*ANFIS*) می‌تواند انتخاب معقولی باشد. که با آموزش مناسب آن می‌توان به اهداف مورد نظر دست یافت.

### ۳- روش فازی-عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی <sup>۱۳</sup> (*ANN*) از خانواده‌های الگوریتم‌های هوشمند هستند که می‌توانند هم در شناسایی <sup>۱۴</sup> و هم در کنترل بکار روند. شبکه‌های عصبی توانایی یادگیری رفتار سیستم‌ها را دارند. در سیستم‌های غیر خطی می‌توانند برای تشخیص دقیق رفتار سیستم مورد استفاده قرار گیرند. اخیراً *ANN* ها در شناسایی و کنترل سیستم‌های دینامیکی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که این امر به دلیل توانایی این شبکه‌ها در تخمین دقیق رفتار سیستم‌های با گستره وسیع توابع غیرخطی است [۲۸]. منطق فازی <sup>۱۵</sup> ابزاری مفید در حوزه مهندسی کنترل است که می‌تواند در کنترل پارامترهای متغیر سیستم‌های زمان واقعی مورد استفاده قرار گیرد [۲۹]. ترکیب این منطق با شبکه‌های عصبی نتایج مفید و ارزشمندی را در بر دارد. شبکه‌های عصبی می‌توانند از داده آموزش داده شوند اما برعکس



شکل (۴): یک ریز شبکه شامل سه منبع تولید پراکنده و دو بار محلی

لذا می‌توان گفت، در ریزشبهک‌های شامل چندین واحد تولید پراکنده و چندین بار، با توجه به وجود چندین خط الکتریکی در سیستم و ناتوانی در پیدا کردن پارامترهای معادل خط برای هر واحد تولید پراکنده، بایستی راهکاری ارائه شود تا علاوه بر استفاده از ساختار واقعی تر کنترل افت (کنترل افت تعمیم یافته)، بتوان بر مشکل چگونگی انتخاب پارامترهای خط مورد نیاز این ساختار کنترلی غلبه کرد.

راه حل اولیه می‌تواند استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در جهت انتخاب مقادیر بهینه پارامترهای خط باشد. با توجه به انتخابی بودن پارامترهای خط، آن‌ها را می‌توان پارامترهای مجازی خط نامید. برای مثال می‌توان یک تابع هدف به صورت رابطه (۱) تعریف نمود و پارامترهای بهینه خط را با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در جهت کمینه سازی تابع هدف بدست آورد.

$$f(x) = \sum_i \alpha_i |df_i(x)| + \beta_i |dv_i(x)| \quad \forall i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

که در آن:

$f(x)$	تابع هدف انحرافات ولتاژ و فرکانس
$df_i$	انحراف فرکانس خروجی منبع پراکنده نام
$dv_i$	انحراف ولتاژ خروجی منبع پراکنده نام
$\alpha_i$	ضریب استرس فرکانس در باس نام
$\beta_i$	ضریب استرس ولتاژ در باس نام
$n$	تعداد کل منابع پراکنده موجود در ریزشبهک

در رابطه (۱)، مقادیر  $\alpha_i$  و  $\beta_i$  می‌تواند با توجه میزان اهمیت منبع پراکنده نام نسبت به منابع پراکنده دیگر انتخاب شود. مجموع کل  $\alpha_i$  ها و  $\beta_i$  ها بایستی یک (۱۰۰٪) شود. برای مثال، استفاده از الگوریتم تکاملی بهینه سازی ازدحام ذرات <sup>۱۱</sup> (*PSO*) برای ریزشبهک شکل (۴) جهت تخمین پارامترهای مجازی خط می‌تواند انتخاب

متغیرهای ورودی بدست آید. خروجی لایه دوم ضرب سیگنال های ورودی است که در واقع معادل قسمت اگر قوانین هستند. در لایه سوم که لایه قانون<sup>۲۱</sup> نامیده می شود، سطح فعالیت هر قانون محاسبه می شود. تعداد لایه ها برابر با تعداد قانون های فازی است. خروجی این لایه نرمالیزه شده لایه قبلی است. لایه چهارم مقادیر خروجی ناشی از استنتاج قوانین را بدست می آورد. این لایه، لایه استنتاج فازی<sup>۲۲</sup> نامیده می شود. و در نهایت از لایه خروجی، خروجی کل سیستم بدست می آید. این شبکه معادل سیستم استنتاج فازی Sugeno است [۳۱].

تنظیم پارامترهای قابل اصلاح یک فرآیند دو مرحله ای است. ابتدا، اطلاعات تا لایه چهارم پیش می روند و به جلو انتشار می یابند و پارامترها توسط روش LSE تشخیص داده می شوند. سپس، پارامترها در لایه دوم با روش کاهش گرادیان<sup>۲۳</sup> اصلاح می شوند.

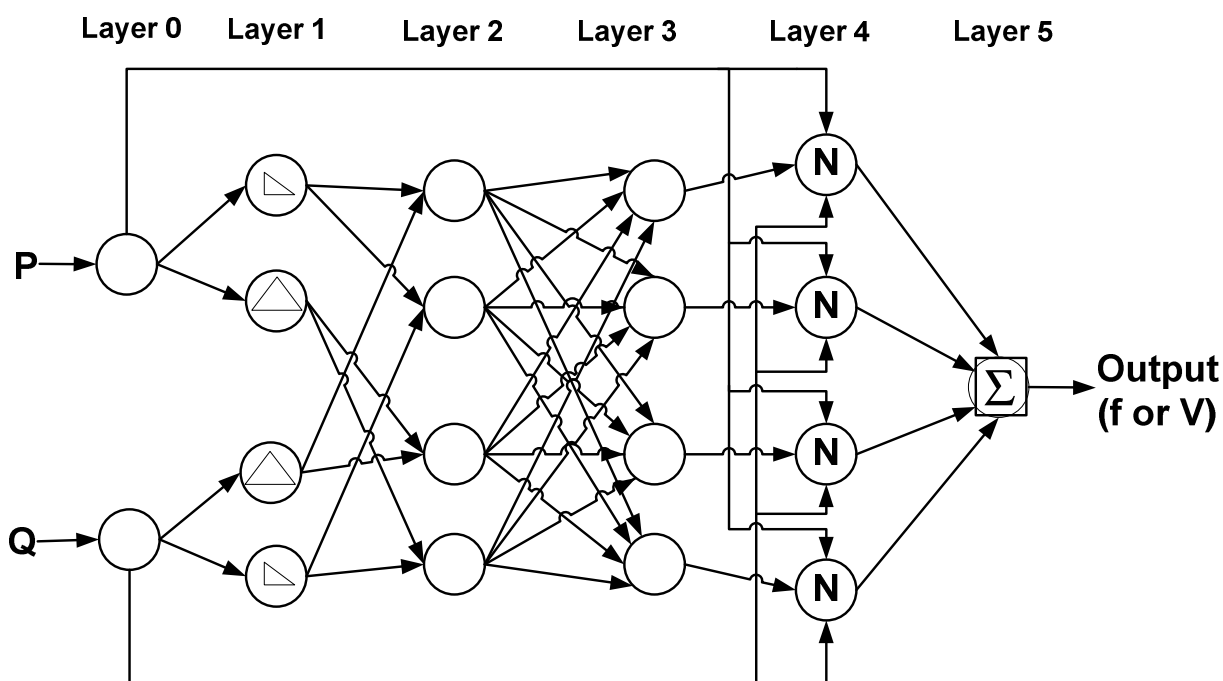
ANFIS از روش یادگیری پس انتشار برای آموزش پارامترهای مربوط به توابع عضویت و روش LSE برای تعیین پارامترهای نهایی استفاده می کند. هر مرحله در فرآیند یادگیری، شامل دو قسمت است. الگوهای ورودی منتشر می شوند و پارامترهای بهینه نهایی با روش تکرار LSE تخمین زده می شوند. پارامترهای مفروض در جریان هر سیکل آموزش، ثابت فرض می شوند. الگو دوباره منتشر می شود و در این تکرار، برای اصلاح پارامترهای قضیه از روش پس انتشار استفاده می شود [۳۱].

شبکه های عصبی، منطق فازی هیچ گونه توانایی در یادگیری ندارد [۲۸].

در اوایل دهه ۹۰، Jang این دو روش را با هم ترکیب کرد [۳۰]. اضافه کردن قدرت یادگیری شبکه های عصبی به منطق فازی یک تکنیک هایبرید<sup>۱۶</sup> جدیدی را به وجود آورد که به سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی مشهور شد [۲۸].

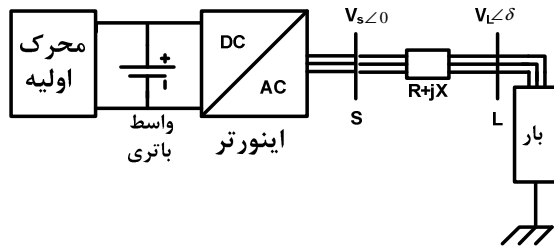
در این روش، اصلاح قانون های فازی در حین یادگیری امکان پذیر است و نیز با تنظیم مناسب ANN هیچ نیازی به داشتن اطلاعات قبلی در مورد توابع عضویت<sup>۱۷</sup> و قوانین نیست و توابع عضویت بهینه بمنظور دستیابی به دسته داده های ورودی/خروجی مطلوب بدست می آید. شکل توابع عضویت به مقادیر پارامترهای آن بستگی دارد. ANFIS این پارامترها را به صورت خودکار انتخاب می کند و دیگر نیازی به دخالت انسان در تعیین این پارامترها نیست به طوری که با استفاده از داده های ورودی/خروجی مطلوب، یک سیستم استنتاج فازی<sup>۱۸</sup> (FIS) ساخته می شود که پارامترهای توابع عضویت با استفاده از الگوریتم های پس انتشار<sup>۱۹</sup> و خطای حداقل مربعات<sup>۲۰</sup> (LSE) تنظیم می شوند [۳۱].

ساختار کلی یک ANFIS در شکل (۵) نشان داده شده است که شامل پنج لایه است. در لایه اول که به لایه عضویت مشهور است، وزن های هر تابع عضویت بررسی می شوند. در این لایه مقادیر ورودی به توابع عضویت اعمال می شوند تا شبکه های فازی متناسب با



شکل (۵) : ساختار کلی یک ANFIS

## ۴- طراحی کنترل کننده ANFIS



شکل (۶): یک ریز شبکه ساده جزیره‌ای

همانگونه که از شکل (۳) مشخص است کنترل افت تعمیم یافته شامل دو ورودی و دو خروجی است که به ترتیب عبارتند از توان حقیقی- توان راکتیو و فرکانس- دامنه ولتاژ. با توجه به اینکه در ساختار ANFIS فقط یک خروجی مجاز است لذا به ناچار از دو ساختار ANFIS استفاده شده است که خروجی یکی فرکانس و دیگری دامنه ولتاژ است. نحوه قرار گیری آن‌ها در سیستم مذکور در شکل (۷) نشان داده شده است. پس تابع‌های در نظر گرفته شده برای هر ANFIS دارای دو ورودی و یک خروجی می‌باشند. برای اینکه مدل ANFIS به بهترین شکل ممکن رفتار کنترل افت تعمیم یافته را شبیه‌سازی کند و کمترین خطا را داشته باشد بایستی داده‌های ورودی (توان حقیقی و راکتیو) دامنه وسیعی از تغییرات را در بر گیرد. لذا تغییرات بار حقیقی و راکتیو از بی‌باری تا بار کامل و حتی ۱۰٪ اضافه بار در نظر گرفته شده است.

پس از تولید مجموعه داده ورودی- خروجی و اعمال آن‌ها به جعبه ابزار ANFIS متلب، مدل آموزش داده می‌شود. بایستی توجه کرد که به دلیل فرکانس بالای سوئیچینگ اینورتر (در این کار ۴۰۰۰ هرتز)، زمان نمونه برداری شبیه سازی ۱۰۰۰۰۰ نمونه در ثانیه در نظر گرفته شده است تا ANFIS به خوبی بتواند رفتار سیستم را بازسازی کند. شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب توابع عضویت مربوط به هر دو ورودی و نحوه ارتباط پارامترهای ورودی و خروجی را پس از آموزش به صورت رویه نشان می‌دهد. پس از آموزش، قوانین فازی مشخصی برای ولتاژ و فرکانس بدست می‌آید که برای نمونه در شکل (۱۰)، قوانین مربوط به خروجی فرکانس نشان داده شده است.

برای ارزیابی کارایی مدل ANFIS طراحی شده، دو دسته داده از داده‌های واقعی و آموزش دیده شده به عنوان داده تست انتخاب شده و با هم مقایسه می‌شوند. شکل (۱۱) خروجی های شبکه ANFIS را بر حسب خروجی‌های واقعی نشان می‌دهد.

برای نشان دادن میزان همبستگی بین دو دسته داده واقعی و آموزش دیده شده ابزار آماری مناسبی وجود دارد که ضریب همبستگی نام دارد. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا -۱ است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است.

به شرطی که ANFIS خوب آموزش دیده باشد می‌تواند در کاربردهای کنترلی عملکرد رضایت بخشی داشته باشد. ابتدا روش کنترل افت تعمیم یافته [۱۲] را، که در ساده‌ترین ریز شبکه ممکن مطابق شکل (۶) به کار برده شده است، توسط روش ANFIS مدل کرده و پس از اطمینان از معتبر بودن مدل، بجای دیاگرام بلوکی شکل (۳) از مدل ANFIS آن استفاده شده است. در این کار جعبه ابزار منطق فازی MATLAB [32] برای طراحی و تست کنترل کننده ANFIS بکار برده شده است.

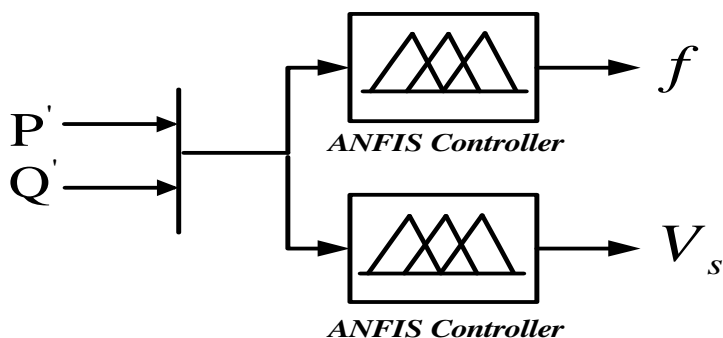
مراحل اصلی آموزش و مدل سازی کنترل کننده به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- داده مورد نیاز جهت آموزش و تست ANFIS با طراحی و تست کنترل افت تعمیم یافته روی سیستم شکل (۵) و ذخیره ورودی و خروجی‌های مورد نیاز بدست می‌آید. این داده‌ها تحت تغییرات شدید بار اکتیو و راکتیو بدست می‌آیند تا تمامی شرایط کاری در این مجموعه داده در نظر گرفته شود و مدل بهتر آموزش ببیند.
- ۲- پس از بدست آوردن مجموعه داده، ساختار ANFIS تشکیل داده می‌شود. توابع عضویت ورودی و خروجی به شکل‌های خطی و گاوسی در نظر گرفته می‌شوند.
- ۳- پس از ایجاد ساختار، ANFIS توسط روش هایبرید بهینه (ترکیب LSE و پس انتشار) با تفرانس خطای  $1 \times 10^{-6} rms$  و برای ۵ دوره آموزش داده می‌شود. خروجی کلی سیستم با استفاده از استنتاج فازی نوع Sugeno با ترکیب خروجی همه قوانین تعیین می‌شود.

## ۴-۱- اعتبار مدل

پس از طراحی کنترل کننده ANFIS ابتدا معتبر بودن آن از لحاظ شبیه بودن رفتارش به کنترل افت تعمیم یافته بررسی می‌شود. همانطور که گفته شد مدل ANFIS بر اساس کنترل افت تعمیم یافته بکار برده شده در سیستم ریز شبکه ساده شکل (۶) ایجاد می‌شود.

کنترل افت تعمیم یافته برای سیستم‌هایی که دارای نسبت  $R/X=1$  هستند، از نظر میزان تغییرات ولتاژ حین تغییرات توان بار پاسخ مناسب‌تری دارند. لذا از داده‌های ورودی/خروجی بدست آمده از حالت  $K_R = 1$  برای آموزش ANFIS استفاده شده است.

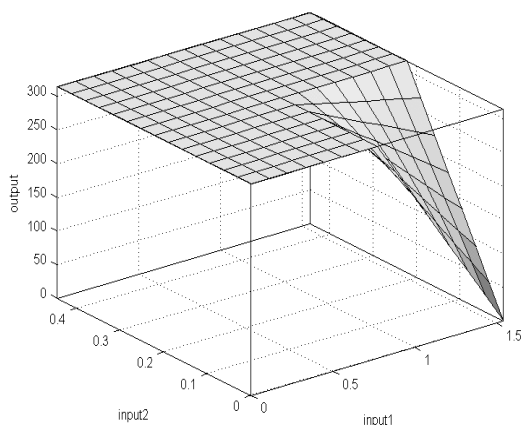


شکل (۷) : ورودی‌ها و خروجی‌های کنترل کننده ANFIS طراحی شده

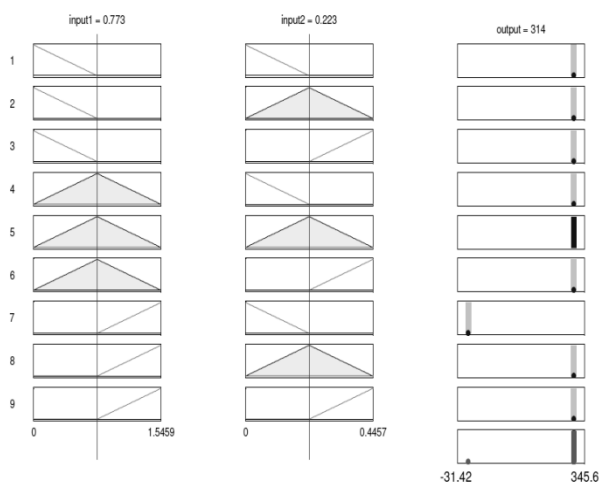
همبستگی بین دو متغیر تصادفی  $X$  و  $Y$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3)$$

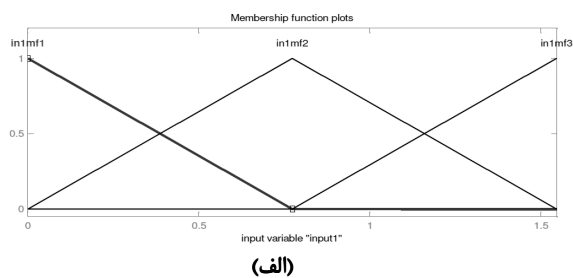
که در آن  $E$  عملگر امید ریاضی،  $\text{cov}$  به معنای کوواریانس،  $\text{corr}$  نماد معمول برای همبستگی پیرسون، و  $\sigma$  نماد انحراف معیار است. با اعمال هر دو دسته داده شکل (۱۱) به رابطه (۳)، مقدار  $0.999995734368936$  به عنوان ضریب همبستگی بدست می‌آید که نشان‌دهنده دقت بالای فرآیند آموزش است. اکنون دو کنترل کننده آموزش دیده ANFIS مطابق شکل (۱۲) جایگزین کنترل افت تعمیم یافته می‌شوند. سپس تحت تغییرات شدید بار اکتیو و راکتیو، پروفیل ولتاژ و فرکانس سیستم شامل ANFIS با کنترل افت تعمیم یافته مقایسه می‌شود.



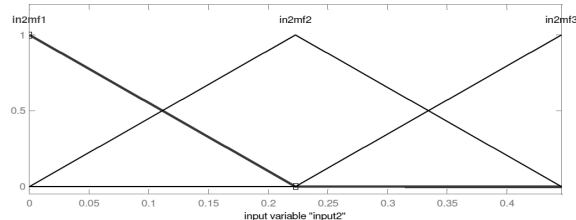
شکل (۹) : نمایش ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی ANFIS آموزش دیده



شکل (۱۰) : قوانین فازی مربوط به خروجی فرکانس ANFIS آموزش دیده



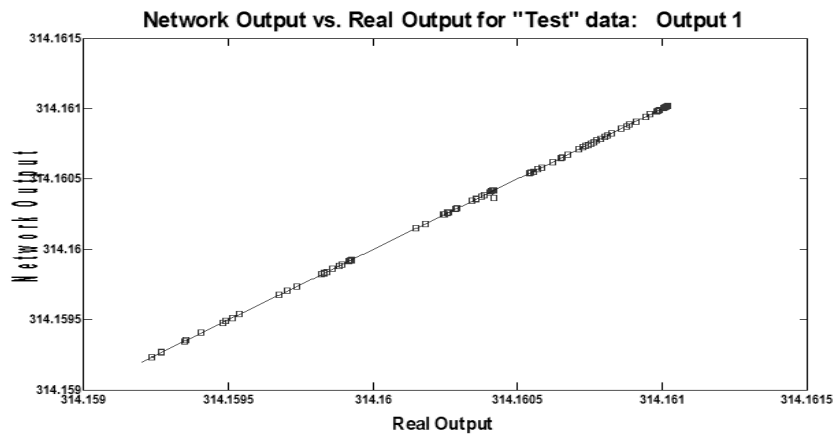
(الف)



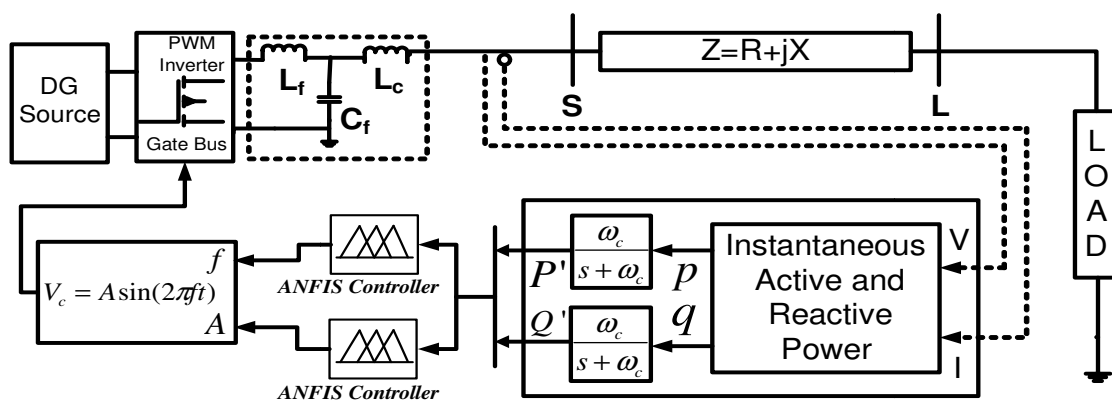
(ب)

شکل (۸) : توابع عضویت ANFIS آموزش دیده (الف) تابع عضویت ورودی اول (ب) تابع عضویت ورودی دوم





شکل (۱۱): خروجی شبکه آموزش دیده نسبت به خروجی واقعی



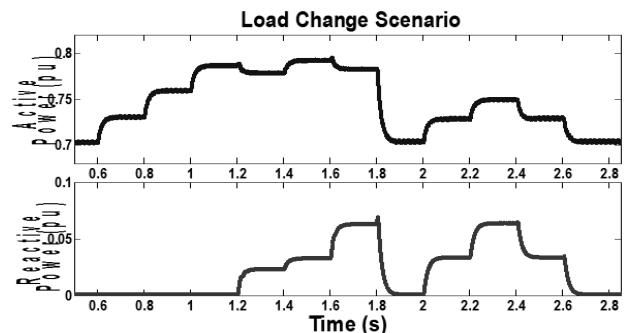
شکل (۱۲): ساختار کنترل اینورتر VSI ارائه شده در [۱۲] با جایگزینی کنترل کننده ANFIS به جای کنترل افت تعمیم یافته

#### ۴-۲- اعمال کنترل کننده به سیستم

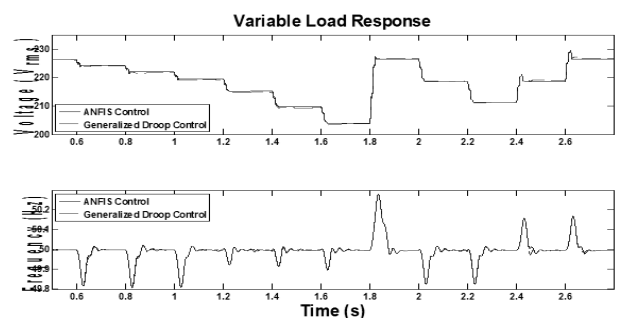
سناریوی تغییرات توان حقیقی و راکتیو بار در شکل (۱۳) نشان داده شده است. توان نامی منبع تولید پراکنده 30 kVA می‌باشد. مشخصات اینورتر در پیوست آورده شده است. شکل (۱۴) پروفیل ولتاژ و فرکانس دو کنترل کننده را با هم نشان می‌دهد که نشان‌دهنده معتبر بودن کنترل کننده ANFIS با دقت بالا است.

از مزایای کنترل کننده ANFIS طراحی شده، عدم وابستگی آن به شرایط کاری، عدم نیاز به پارامترهای خط و مهمتر از آن‌ها عدم وابستگی آن به ریز شبکه‌ای است که در آن قرار دارد.

با توجه به مزایای مذکور، کنترل کننده مورد نظر روی ریز شبکه شکل (۴) آزمایش و با نتایج بدست آمده از PSO مقایسه شده است. نتایج بدست آمده تحت سناریوی تغییر بار جدول (۱)، در شکل (۱۵) نشان داده شده است. کارایی موثر و عملکرد مناسب کنترل کننده طراحی شده ثابت می‌شود.



شکل (۱۳): سناریوی تغییرات بار اکتیو و راکتیو



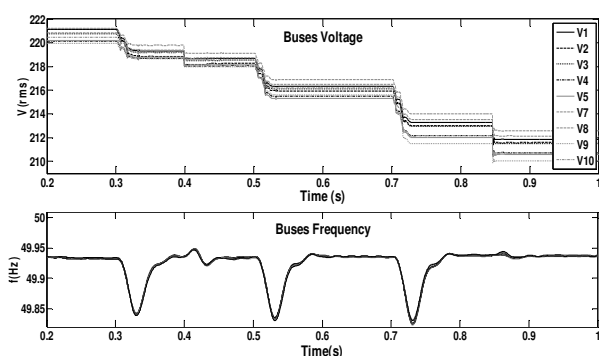
شکل (۱۴): پروفیل ولتاژ و فرکانس تحت تغییرات شدید بار

جدول (۱): فرآیند تغییرات بار در ریزشبهه شکل (۴)

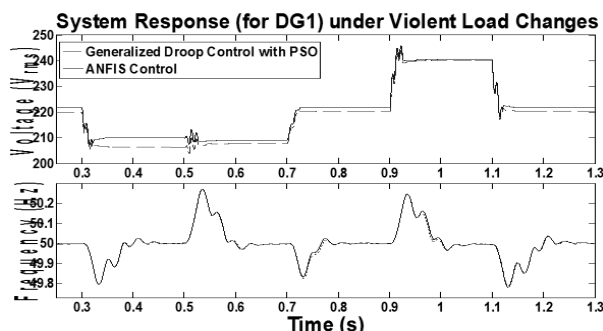
فاصله زمانی [S]	بار ۱ [kVA]	بار ۲ [kVA]
0-0.3	30	10
0.3-0.5	30	j40
0.5-0.7	30 + j10	10
0.7-0.9	30	j10
0.9-1.1	0	10
1.1-1.3	30	10

جدول (۲): فرآیند تغییر بار در ریزشبهه ۱۱ باسه

شماره باس	زمان تغییر بار(S)	تغییر بار (kVA)
2	0.3	10+j3
5	0.5	13+j5
9	0.7	16+j8



شکل (۱۷): پروفیل ولتاژ و فرکانس ریزشبهه ۱۱ باسه حین فرآیند تغییر بار جدول (۲)



شکل (۱۵): پاسخ ولتاژ و فرکانس منبع تولید پراکنده DG1 تحت تغییرات شدید بار

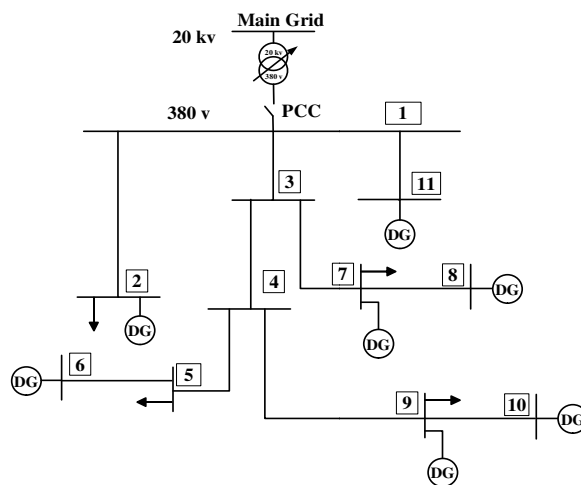
### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ضمن معرفی مختصر ریزشبهه‌ها به مشکلات و مزایای استفاده از آن‌ها در سیستم‌های قدرت مدرن اشاره گردید. سپس یک ساختار جدید مبتنی بر سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی معرفی گردید. ساختار کنترلی ارائه شده در این مقاله، تحت تغییرات پله‌ای بار، بین فرکانس و ولتاژ ریزشبهه هماهنگی لازم را انجام می‌دهد. این کنترل‌کننده توسط مجموعه داده ورودی/خروجی مطلوب آموزش دیده است و قابلیت پیاده سازی روی ریزشبهه‌هایی با ساختارهای مختلف را دارد و تحت تغییرات شدید بار می‌تواند پایداری سیستم را حفظ کند و از فروپاشی ولتاژ و فرکانس سیستم جلوگیری کند. نتایج شبیه‌سازی، کارایی و اعتبار کنترل کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد.

ضمایم

#### مشخصات اینورتر

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$V_{L-L}$	380 $v_{rms}$	$C_f$	30 $\mu F$
$f$	50 Hz	$r_{cf}$	5 $\Omega$
$P_{nom}$	30 kVA	$L_{Lc}$	3mH
$f_s$	4 kHz	$r_{Lc}$	0.1 $\Omega$
$L_f$	6mH	$K_f$	-1.06
$r_f$	0.2 $\Omega$	$K_v$	-100



شکل (۱۶): ریزشبهه آزمون ۱۱ باسه

- [۹] S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche, "Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various metrological conditions", Applied energy 85, pp. 968-987, 2008.
- [۱۰] "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems", IEEE Std 1547-2003, pp. 1-16, 2003.
- [۱۱] H. Bevrani, T. Hiyama, "Intelligent Automatic Generation Control", CRC Press, USA, 2011.

بار موجود در ریزشبه ۱۱ باسه

بار (kVA)	شماره باس
20+j10	2
30	5
45	7
25+j10	9

- [۱۲] شکوهی، مشتاق و بیورانی، بهبود پایداری گذرای ریزشبه‌های مبتنی بر منابع پراکنده اینورتری، دومین کنفرانس شبکه‌های الکتریکی هوشمند، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، سوم و چهارم خرداد ۱۳۹۱، آدرس اینترنتی: <http://www.bevrani.com/ICSG.pdf>

- [۱۳] R. Lasseter, "MicroGrids", Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, No., pp. 305- 308, 2002.
- [۱۴] T. L. Vandoorn, B. Meersman, L. Degroote, B. Renders, L. Vandeveld, "A Control Strategy for Islanded Microgrids With DC-Link Voltage".
- [۱۵] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems", Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 29, No. 1, pp. 136-143, 1993.
- [۱۶] Y. W. Li, C. N. Kao, "An Accurate Power Control Strategy for Power-Electronics-Interfaced Distributed Generation Units Operating in a Low-Voltage Multibus Microgrid", Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 24, No. 12, pp. 2977-2988, 2009.
- [۱۷] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, J. Miret, "A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems", Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 19, No. 5, pp. 1205- 1213, 2004.
- [۱۸] H. Laaksonen, P. Saari, R. Komulainen, "Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid", Future Power Systems, 2005 International Conference on, 2005
- [۱۹] A. Engler, O. Osika, M. Barnes, N. Hatzigiorgiou, "DB2 evaluation of the local controller strategies", 2005, [www.microgrids.eu/-micro2000](http://www.microgrids.eu/-micro2000).
- [۲۰] R. Lasseter, P. Paigi, "Microgrid: a conceptual solution", Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, vol.6, no., pp. 4285- 4290 Vol.6, 20-25, June 2004
- [۲۱] J. M. Guerrero, J. Matas, J.; L. G. de Vicuna, M. Castilla, J. Miret, "Wireless-Control Strategy for Parallel Operation of Distributed-Generation Inverters" Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.53, no.5, pp.1461-1470, Oct. 2006.
- [۲۲] T. L. Vandoorn, B. Renders, L. Degroote, B. Meersman, L. Vandeveld, "Active Load Control in Islanded Microgrids Based on the Grid Voltage", Smart Grid, IEEE Transactions on, vol.2, no.1, pp.139-151, March 2011.
- [۲۳] R. Majmuder, Modeling, stability, analysis and control of microgrid, Ph.D. Thesis, Queensland University of Technology, Queensland, Australia, 2010.
- [۲۴] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, "Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters", Power Electronics, IEEE Transactions on, vol.23, no.5, pp.2346-2352, Sept. 2008.
- [۲۵] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled

پارامترهای الکتریکی ریزشبه ۱۱ باسه

شماره خط	باس آم	باس آم	R(Ω)	X(Ω)
1	1	2	0.0528	0.0142
2	1	3	0.0341	0.0103
3	1	11	0.0123	0.0021
4	3	4	0.0199	0.0058
5	3	7	0.0660	0.0128
6	4	5	0.0261	0.0025
7	4	9	0.0687	0.0149
8	5	6	0.0414	0.0026
9	7	8	0.0870	0.0084
10	9	10	0.0414	0.0026

## مراجع

- [۱] H. Bevrani, M. Watanabe, Y. Mitani, "Microgrid Controls", To be published as invited Chapter in: Standard handbook for Electrical engineers, 16<sup>th</sup> Edition. H. Wayne Beaty (Ed), McGraw-Hill; Expected Dec 2011.
- [۲] J. Driesen, G. Deconinck, W. D'haeseleer, R. Belmans, "Active User Participation in Energy Markets Through Activation of Distributed Energy Resources", IEEE Power Engineering Society general Meeting, pp. 1-4, 2007.
- [۳] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. S. Meliopoulos, R. Yinger, J. Eto, "Consortium for Electric Reliability Technology Solutions", 2002.
- [۴] R. Lasseter, "MicroGrids", Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, vol.1, no., pp. 305- 308 vol.1, 2002.
- [۵] F. Katiraei, M. R. Iravani, P. W. Lehn, "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", IEEE Trans. Power Del., Vol. 20, No. 1, pp. 248-257, 2005.
- [۶] A. A. Salam, A. Mohamed, M. A. Hannan, "Technical challenges on Microgrids", Asian Research publishing Network (ARPN), Vol. 3, No. 6, pp. 64-69, 2008.
- [۷] T. Ackermann, G. Andersson, L. Soder, "Distributed Generation: a definition", International Journal of Electric Power Systems Research, Vol. 57, No. 3, pp. 195-204.
- [۸] A. Maduriera, C. Moreira, J. P. Lopes, "secondary Load-Frequency Control for MicroGrids in Islanded Operation".

<sup>۲۲</sup> Defuzzification

<sup>۲۳</sup> Gradient descent method

- AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization", Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.58, no.1, pp.158-172, Jan. 2011.
- [۲۶] G. Diaz, C. Gonzalez-Moran, J. Gomez-Aleixandre, A. Diez, "Scheduling of Droop Coefficients for Frequency and Voltage Regulation in Isolated Microgrids", Power Systems, IEEE Transactions on , vol.25, no.1, pp.489-496, Feb. 2010.
- [۲۷] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, "Defining control strategies for MicroGrids islanded operation" Power Systems, IEEE Transactions on , vol.21, no.2, pp. 916- 924, May 2006.
- [۲۸] F. Rashidi, "Sensorless Speed Control of Induction Motor Derives Using a Robust and Adaptive Neuro-Fuzzy Based Intelligent Controller", IEEE International Conference an Industrial Technology (ICIT), PP. 617-627, 2004.
- [۲۹] A. Kusagur, S. F. Kodad, B. V. Sankar Ram, "Modeling, Design & Simulation of an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for Speed Control of Induction Motor", International Journal of Computer Applications, vol. 6, no. 12, pp. 29-44, Sept 2010.
- [۳۰] J. Roger Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System ", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 3, pp. 665- 685, May/June 1993.
- [۳۱] L. Wang, C. Singh, A. Kusiak, "Wind Power Systems, Applications of Computational Intelligencel", Springer, USA, 2010.
- [۳۲] MATLAB/SIMULINK™, www.mathworks.com
- [۳۳] S. Papathanassiou, "Study-case LV Network." [Online] Available: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr/documents/Study-Case%20LV-Network.pdf>

زیر نویس ها

- <sup>۱</sup> Flywheels
- <sup>۲</sup> Power electronic interface
- <sup>۳</sup> Inverter
- <sup>۴</sup> Microsource
- <sup>۵</sup> Robustness
- <sup>۶</sup> Point of common coupling
- <sup>۷</sup> Point of coupling
- <sup>۸</sup> Resistive Microgrid
- <sup>۹</sup> Inductive Microgrid
- <sup>۱۰</sup> Droop characteristics
- <sup>۱۱</sup> Particle swarm optimization
- <sup>۱۲</sup> Adaptive neuro-fuzzy inference system
- <sup>۱۳</sup> Artificial neural networks
- <sup>۱۴</sup> Identification
- <sup>۱۵</sup> Fuzzy logic
- <sup>۱۶</sup> Hybrid techniques
- <sup>۱۷</sup> Membership functions
- <sup>۱۸</sup> Fuzzy inference system
- <sup>۱۹</sup> Back-propagation
- <sup>۲۰</sup> Least square error
- <sup>۲۱</sup> Rule base layer