

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

علی حسامی نقشبندی^۱، استادیار، شورش شکوهی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد، حسن بیورانی^۳، 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
 ۲- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان- سنندج- ایران -
 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، ناعادالی بین بار و تولید در ریزشکته‌های جزیره‌ای کم تا بیش وجود دارد. این ناعادالی منجر به نوسانات ولتاژ و فرکانس می‌شود و افزایش این ناعادالی 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 Islanded Microgrids

Ali Hesami Naghshbandy, Assistant Professor, Shores 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

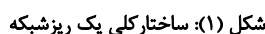
دو دسته اصلی ریزمنبع وجود دارند. یکی منابع DC همانند

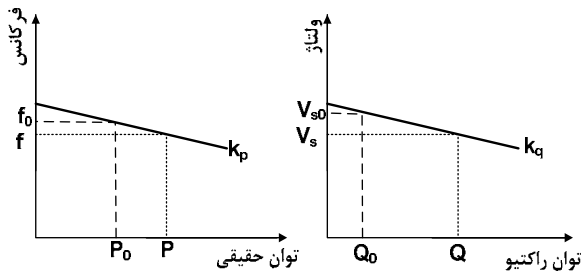
امروزه تغییرات وسیعی در حوزه توزیع سیستم‌های قدرت در حال وقوع است. تراکم حضور منابع تجدید پذیر کوچک همانند سلول‌های خورشیدی، سلول‌های سوختی و موتورهای احتراق داخلی کوچک در سطوح توزیع روز به روز بیشتر می‌شود. این افزایش حضور منابع تجدید پذیر انرژی در سیستم‌های توزیع، ساختار جدیدی بنام ریزشکه را به وجود 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 ریزشبکه دارای اندازه‌های مختلفی هستند و می‌توانند به شبکه اصلی قدرت متصل شوند و یا به طور جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار بگیرند [۳]. هر ریزشبکه 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 ریزشبکه از سیستم توزیع جدا شده و وظیفه تامین توان بارهای محلی حساس و غیرحساس را به عهده می‌گیرد [۵،۶]. به عبارت دیگر، وظیفه اصلی این نوع از ریزشبکه‌ها حفظ کیفیت توان مطلوب برای این‌گونه مکان‌های حساس است.

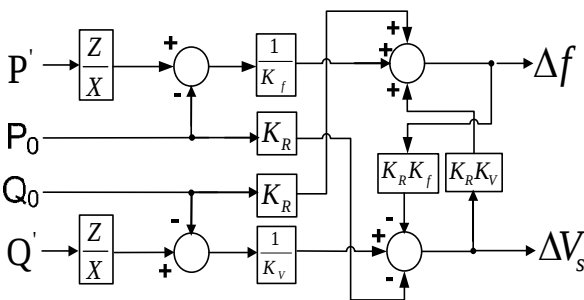
منابع تولید پراکنده در سیستم‌های ریز شبکه می‌توانند ژنراتورهای بادی، میکروتوربین‌ها، سلول‌های خورشیدی، سلول‌های سوختی و یا منابع دیگر به همراه وسایل ذخیره ساز انرژی همچون باتری‌ها، چرخ‌طیارها^۱ و خازن‌های انرژی باشند [۷، ۸]. ریزشبکه‌ها علی‌رغم مزایای فراوان از قبیل کاهش مشکلات زیست محیطی، کاهش هزینه‌های ناشی از احداث نیروگاه جدید، افزایش قابلیت اطمینان سیستم، افزایش بازدهی در اثر کاهش تلفات توان انتقالی، کاهش تراکم در فیدرهای 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 ریزش‌بکه، واحدهای تولیدی کوچکی همراه با یک واسط الکترونیک قدرت^۲ (اینورتر^۳) وجود دارند که ریزمنبع^۴ نامیده می‌شوند [۶]. این منابع در مناطق محلی قرار می‌گیرند و مزایایی از قبیل داشتن هزینه پایین برای مصرف‌کننده و تولیدکننده، ولتاژ کم، قابلیت اطمینان بالا، افزایش افزونگی و قوت^۵ سیستم و انعطاف‌پذیری بالا دارند [۴].





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^۸ و ریزشکبه‌های سلفی^۹ تقسیم‌بندی کرده‌اند. در ریزشکبه‌های سلفی از مشخصه‌های افت^{۱۰} 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.

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

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

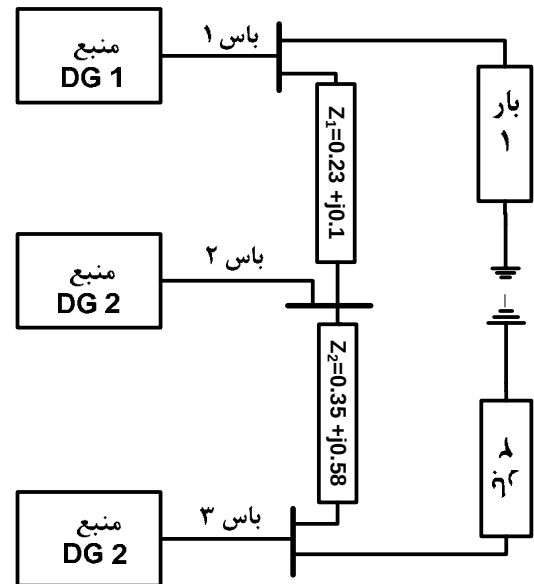
که در آن:

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

هر چند استفاده از الگوریتم‌های تکاملی PSO در تخمین بهینه پارامترهای خط مورد نیاز روش کنترل افت تعمیم‌یافته برای ریزشبه-هایی با ابعاد کوچک، همچون ریزشبه شکل (۴)، می‌تواند موثر باشد اما چنانچه ریزشبه مورد نظر دارای ابعاد وسیعی باشد، به طور مثال تعداد واحدهای تولید پراکنده موجود در ریزشبه 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 ریزشبه‌های 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 ریزشبه وابسته نباشد. استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی^{۱۲} ($ANFIS$) می‌تواند انتخاب معقولی باشد. که با آموزش مناسب آن می‌توان به اهداف مورد نظر دست یافت.

۳- روش فازی-عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۳} (ANN) از خانواده‌های الگوریتم‌های هوشمند هستند که می‌توانند هم در شناسایی^{۱۴} 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^{۱۵} 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 ریزشبه‌های 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 i ام
dv_i	انحراف ولتاژ خروجی منبع پراکنده i ام
α_i	ضریب استرس فرکانس در باس i ام
β_i	ضریب استرس ولتاژ در باس i ام
n	تعداد کل منابع پراکنده موجود در ریزشبه

در رابطه (۱)، مقادیر α_i و β_i می‌تواند با توجه میزان اهمیت منبع پراکنده i ام نسبت به منابع پراکنده دیگر انتخاب شود. مجموع کل α_i ها و β_i ها بایستی یک (۱۰۰٪) شود. برای مثال، استفاده از الگوریتم تکاملی بهینه سازی ازدحام ذرات^{۱۱} (PSO) برای ریزشبه 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^{۲۱} 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^{۲۲} 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^{۲۳} اصلاح می شوند.

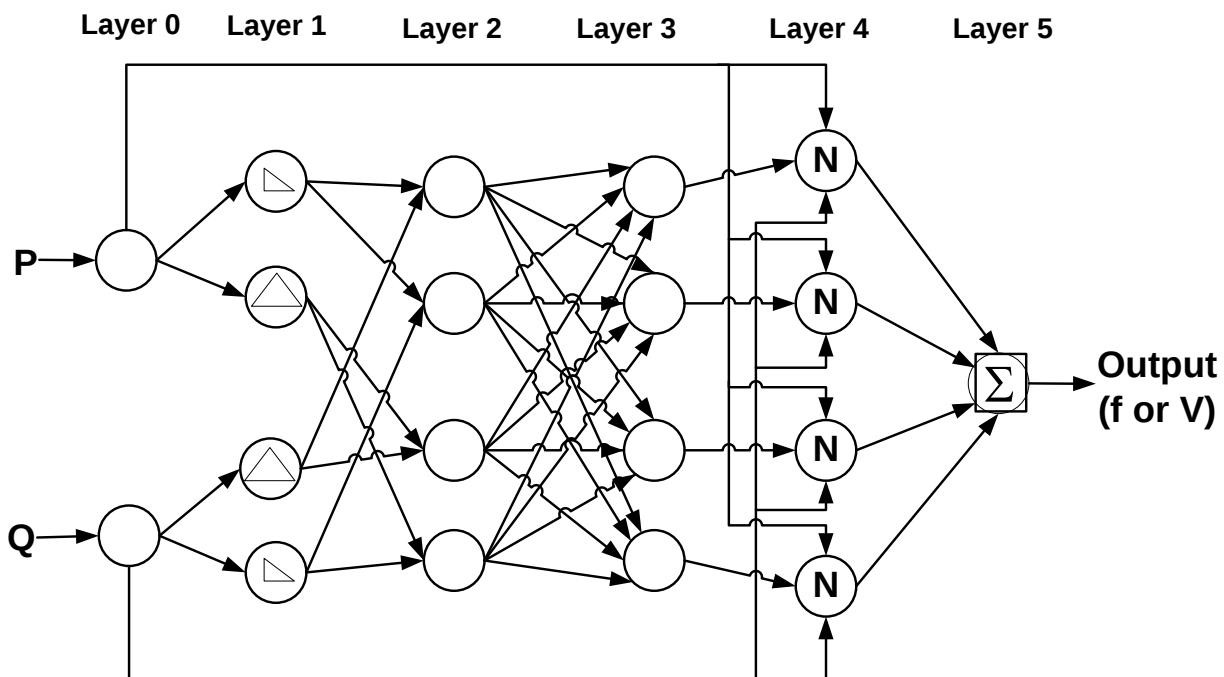
ANFIS از روش یادگیری پس انتشار برای آموزش پارامترهای مربوط به توابع عضویت و روش LSE برای تعیین پارامترهای نهایی استفاده می کند. هر مرحله در فرآیند یادگیری، شامل دو قسمت است. الگوهای ورودی منتشر می شوند و پارامترهای بهینه نهایی با روش تکرار LSE تخمین زده می شوند. پارامترهای مفروض در جریان هر سیکل آموزش، 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^{۱۶} 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^{۱۷} 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^{۱۸} (FIS) ساخته می شود که پارامترهای توابع عضویت با استفاده از الگوریتم های پس انتشار^{۱۹} و خطای حداقل مربعات^{۲۰} (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



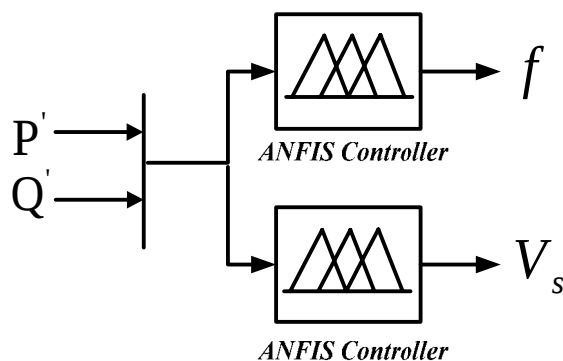
شکل (۵): ساختار کلی یک ANFIS

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) خروجی‌های 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.



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

۴- طراحی کنترل کننده ANFIS

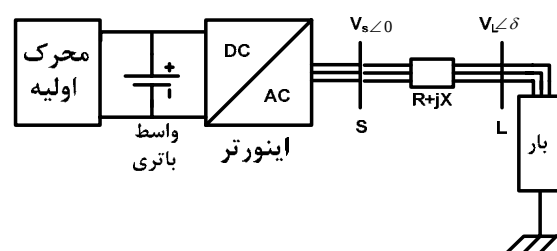
به شرطی که ANFIS خوب آموزش دیده باشد می‌تواند در کاربردهای کنترلی عملکرد رضایت بخشی داشته باشد. ابتدا روش کنترل افت تعمیم یافته [۱۲] را، که در ساده‌ترین ریز شبکه ممکن مطابق شکل (۶) به کار برده شده است، توسط روش ANFIS مدل کرده و پس از اطمینان از معتبر بودن مدل، بجای دیاگرام بلوکی شکل (۳) از مدل ANFIS 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 rms ۰/۰۰۰۰۱ و برای ۵ دوره آموزش داده می‌شود. خروجی کلی سیستم با استفاده از استنتاج فازی نوع Sugeno با ترکیب خروجی همه قوانین تعیین می‌شود.

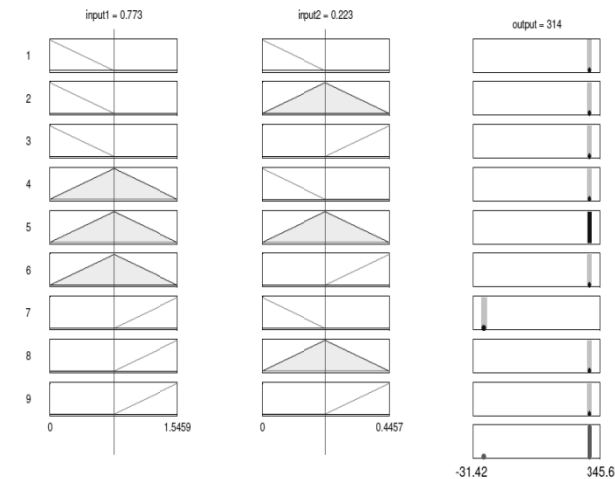
۴-۱- اعتبار مدل

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.

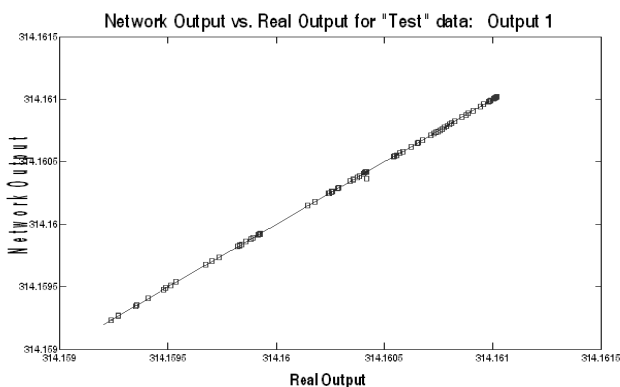


شکل (۶): یک ریز شبکه ساده جزیره‌ای

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

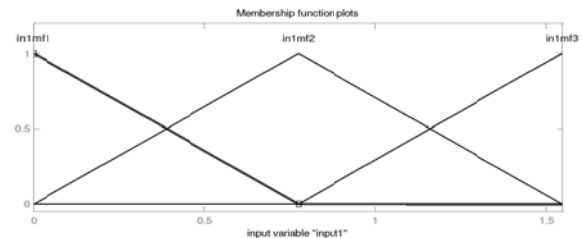


شکل (۱۱): خروجی شبکه آموزش دیده نسبت به خروجی واقعی

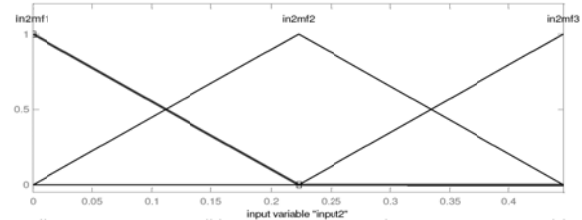
همبستگی بین دو متغیر تصادفی X و Y به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در آن E عملگر امید ریاضی، cov به معنای کوواریانس، corr نماد معمول برای همبستگی پیرسون، و σ نماد انحراف معیار است.

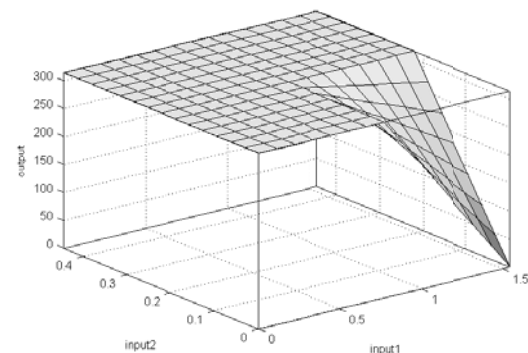


(الف)

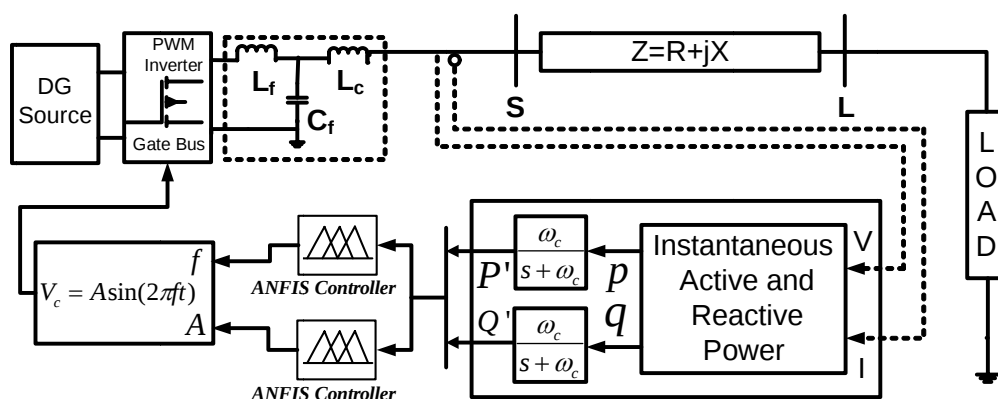


(ب)

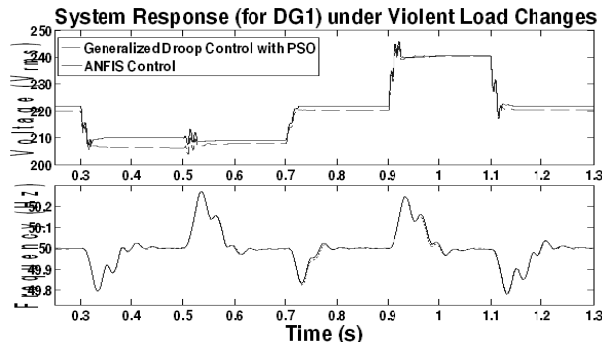
شکل (۸): توابع عضویت $ANFIS$ آموزش دیده (الف) تابع عضویت ورودی اول (ب) تابع عضویت ورودی دوم



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

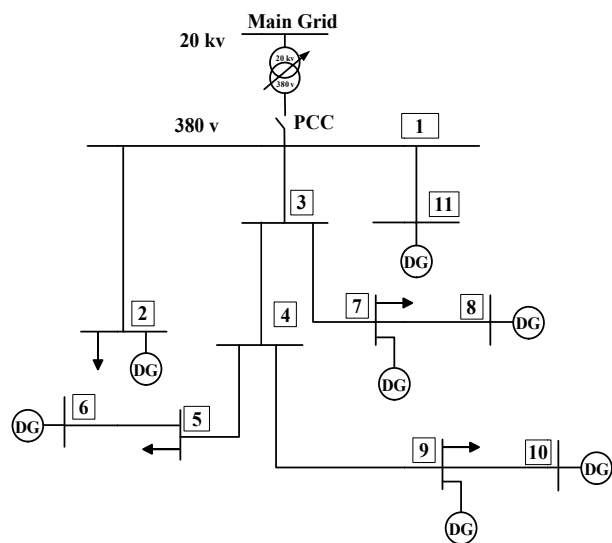


شکل (۱۲): ساختار کنترل اینورتر VSI ارائه شده در [۱۲] با جایگزینی کنترل کننده $ANFIS$ به جای کنترل افت تعمیم یافته



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

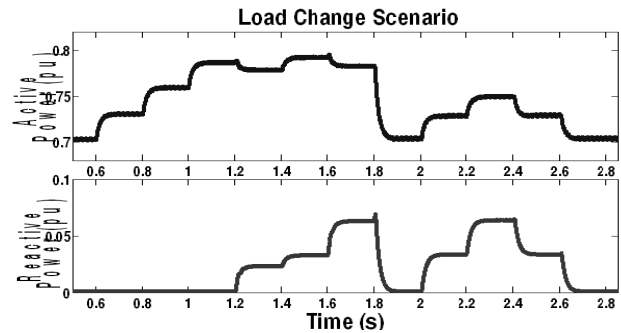
برای اطمینان از کارایی کنترل کننده طراحی شده، ساختار ANFIS روی یک ریز شبکه با ابعاد بزرگتر آزمایش می شود. نمایش تک خطی یک ریز شبکه ۱۱ باسه در شکل (۱۶) نشان داده شده است [33]. پارامترهای خط و مشخصات بارها در پیوست آورده شده است. در زمان های ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ ثانیه به ترتیب یک تغییر بار در باس های ۲، ۵ و ۸ رخ می دهد. چگونگی این تغییر بار در جدول (۲) بیان شده است. پروفیل ولتاژ و فرکانس تحت این روند تغییر بار در شکل (۱۷) نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کنترل کننده ANFIS تحت تغییرات شدید بار، پایداری سیستم را تضمین می کند.



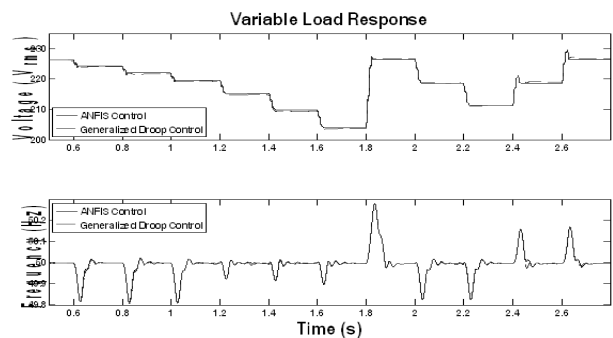
شکل (۱۶): ریز شبکه آزمون ۱۱ باسه

جدول (۲): فرآیند تغییر بار در ریز شبکه 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 (۱۳): سناریوی تغییرات بار اکتیو و راکتیو



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

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 می باشد. مشخصات اینورتر در پیوست آورده شده است. شکل (۱۴) پروفیل ولتاژ و فرکانس دو کنترل کننده را با هم نشان می دهد که نشان دهنده 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 آن ها عدم وابستگی آن به ریز شبکه ای 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.

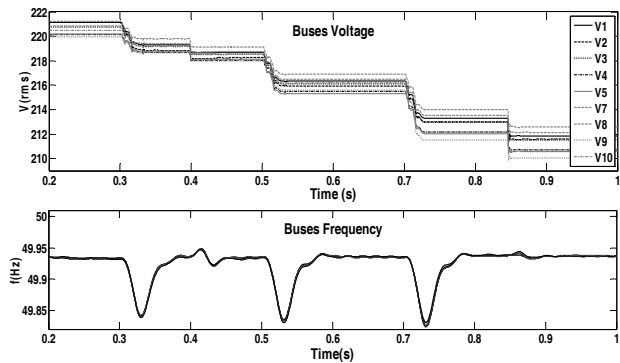
نتایج بدست آمده تحت سناریوی تغییر بار جدول (۱)، در شکل (۱۵) نشان داده شده است. کارایی موثر و عملکرد مناسب کنترل کننده طراحی شده ثابت می شود.

جدول (۱): فرآیند تغییرات بار در ریز شبکه 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

پارامترهای الکتریکی ریز شبکه ۱۱ باسه

شماره خط	باس نام	باس ژام	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



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

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ضمن معرفی مختصر ریز شبکه‌ها 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 ریز شبکه هماهنگی لازم را انجام می‌دهد. این کنترل کننده توسط مجموعه داده ورودی/خروجی مطلوب آموزش دیده است و قابلیت پیاده سازی روی ریز شبکه‌هایی 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 شبیه سازی، 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}	5Ω
P_{nom}	30 kVA	L_{Lc}	3 mH
f_s	4 kHz	r_{Lc}	0.1Ω
L_f	6 mH	K_f	-1.06
r_f	0.2Ω	K_v	-100

بار موجود در ریز شبکه ۱۱ باسه

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

مراجع

- [1] H. Bevrani, M. Watanabe, Y. Mitani, "Microgrid Controls", To be published as invited Chapter in: Standard handbook for Electrical engineers, 16th Edition. H. Wayne Beaty (Ed), McGraw-Hill; Expected Dec 2011.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] R. Lasseter, "MicroGrids", Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, vol.1, no., pp. 305- 308 vol.1, 2002.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] T. Ackermann, G. Andersson, L. Soder, "Distributed Generation: a definition", International Journal of Electric Power Systems Research, Vol. 57, No. 3, pp. 195-204.
- [8] A. Maduriera, C. Moreira, J. P. Lopes, "secondary Load-Frequency Control for MicroGrids in Islanded Operation".
- [9] 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.
- [10] "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems", IEEE Std 1547-2003, pp. 1-16, 2003.
- [11] H. Bevrani, T. Hiyama, "Intelligent Automatic Generation Control", CRC Press, USA, 2011.

- Power Systems, IEEE Transactions on , vol.21, no.2, pp. 916- 924, May 2006.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] L. Wang, C. Singh, A. Kusiak, "Wind Power Systems, Applications of Computational Intelligence", Springer, USA, 2010.
- [32] MATLAB/SIMULINK™, www.mathworks.com
- [33] S. Papathanassiou, "Study-case LV Network." [Online] Available: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr/documents/Study-Case%20LV-Network.pdf>
- [۱۲] شکوهی، مشتاق و بیورانی، بهبود پایداری گذرای ریزشکه‌های 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>
- [13] R. Lasseter, "MicroGrids", Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, No., pp. 305- 308, 2002.
- [14] T. L. Vandoorn, B. Meersman, L. Degroote, B. Renders, L. Vandevelde, "A Control Strategy for Islanded Microgrids With DC-Link Voltage".
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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
- [19] A. Engler, O. Osika, M. Barnes, N. Hatziaargyriou, "DB2 evaluation of the local controller strategies", 2005, www.microgrids.eu/-micro2000.
- [20] 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
- [21] 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.
- [22] T. L. Vandoorn, B. Renders, L. Degroote, B. Meersman, L. Vandevelde, "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.
- [23] R. Majmuder, Modeling, stability, analysis and control of microgrid, Ph.D. Thesis, Queensland University of Technology, Queensland, Australia, 2010.
- [24] 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.
- [25] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization", Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.58, no.1, pp.158-172, Jan. 2011.
- [26] 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.
- [27] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, "Defining control strategies for MicroGrids islanded operation"

زیرنویس‌ها

- ¹ Flywheels
- ² Power electronic interface
- ³ Inverter
- ⁴ Microsource
- ⁵ Robustness
- ⁶ Point of common coupling
- ⁷ Point of coupling
- ⁸ Resistive Microgrid
- ⁹ Inductive Microgrid
- ¹⁰ Droop characteristics
- ¹¹ Particle swarm optimization
- ¹² Adaptive neuro-fuzzy inference system
- ¹³ Artificial neural networks
- ¹⁴ Identification
- ¹⁵ Fuzzy logic
- ¹⁶ Hybrid techniques
- ¹⁷ Membership functions
- ¹⁸ Fuzzy inference system
- ¹⁹ Back-propagation
- ²⁰ Least square error
- ²¹ Rule base layer
- ²² Defuzzification
- ²³ Gradient descent method