ارزیابی امنیت ریزشبکه مستقل ولتاژ متوسط دارای منابع با واسط الکترونیک قدرت در حضور اختلالات توان و بار با استفاده از شبکه عصبی- فازی تطبیقی

مهتاب پارسی[1] محمود جورابیان[2] گئورگ قره پتیان[3]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول- دزفول- ایران
mahtabparsi@gmail.com

۲- استاد- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز- ایران
mjoorabian@scu.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
grptian@aut.ac.ir

چکیده: در شبکه‌های توزیع سنتی انحراف‌های فرکانس و ولتاژ به عنوان شاخصی برای تشخیص امنیت سیستم محسوب می‌شود. در حالیکه در یک ریزشبکه مستقل دارای منابع با واسط الکترونیک قدرت، انحراف‌های فرکانس و ولتاژ در ریزشبکه در اثر اختلالات توان و بار به خوبی توسط کنترلر فرکانس- توان حقیقی و کنترلر ولتاژ- توان واکنشی کنترل می‌شود. از این رو برخلاف آن چه در شبکه‌های توزیع سنتی روی می‌دهد، انحراف‌های فرکانس و ولتاژ برای تشخیص امنیت ریزشبکه مستقل دارای منابع با واسط الکترونیک قدرت موضوع مهمی به شمار نمی‌رود. اما در یک ریزشبکه مستقل تعادل بین تولید و مصرف توان به عنوان شاخصی برای ارزیابی امنیت آن خصوصا در هنگام بروز اختلالات توان و بار در نظر گرفته می‌شود. از این رو اگر این تعادل در ریزشبکه ایجاد نشود، ریزشبکه غیرایمن به شمار می‌رود. در این صورت نیاز به اقدامات پیشگیرانه‌ای از قبیل ریزش بار و تنظیم تولید در کوتاهترین زمان در ریزشبکه باید صورت گیرد. در این مقاله یک استراتژی جدید برای بررسی امنیت دینامیکی ریزشبکه در هنگام وقوع اختلالات توان و بار و همچنین استفاده از شبکه عصبی– فازی تطبیقی (ANFIS) برای بررسی این موضوع پیشنهاد شده است. همچنین در صورت تشخیص غیرامن بودن ریزشبکه، پیش‌بینی اعمال کنترلی پیشگیرانه‌ای توسط دیگر شبکه‌های عصبی– فازی تطبیقی (ANFIS) پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: امنیت ریزشبکه، دروپ فرکانس، دروپ ولتاژ، ریزش بار، منابع با واسط الکترونیک قدرت، شبکه عصبی- فازی تطبیقی(ANFIS)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۴/۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۸/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر محمود جورابیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران- اهواز- بلوار گلستان- دانشگاه شهید چمران اهواز- دانشکده مهندسی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.2.0]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

۱- مقدمه

منافع اقتصادی، پیشرفت‌های تکنولوژی در زمینه‌ی منابع تولیدپراکنده و ادوات الکترونیک قدرت، نیاز روز افزون به افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان، نگرانی درباره‌ی اثرات زیست محیطی تولید انرژی مشوق‌هایی برای افزایش استفاده از منابع انرژی پراکنده در سیستم-های قدرت است که منجر به یک مفهوم جدید بنام ریزشبکه(MG) شده است[۱] و [۷-۱۰].

یک ریزشبکه مجموعه‌ای از منابع تولیدپراکنده[۲] و بارها است. دسته‌بندی‌های گوناگونی برای منابع انرژی در ریزشبکه‌ها مطرح شده است. یکی از این موارد، دسته‌بندی بر اساس نحوه‌ی اتصال منابع انرژی به ریزشبکه است. بر این اساس یک دسته واحدها از طریق ماشین سنکرون به ریزشبکه متصل می‌شوند و دسته دیگر آنهایی هستند که واسط الکترونیک قدرت، واسطه‌ی اتصال به ریزشبکه را فراهم می‌کند. در ریزشبکه‌ها دارای منابع تولیدپراکنده با واسط الکترونیک قدرت برای عملکرد در حالت گذرای شبکه و یا تغییرات تقاضای بار معمولا به یک سیستم ذخیره انرژی[۳](DS) خصوصا در هنگامی که ریزشبکه در حالت جزیره مستقل بهره‌برداری می‌شود نیاز است [۱۱-۱۳].

ریزشبکه می‌تواند در دو حالت متصل به شبکه و جزیره مستقل بهره‌برداری شود[۶-۵]. در حالت اتصال به شبکه اصلی، سیستم توزیع می‌تواند به عنوان باس الکتریکی اسلک[۴]مطرح شود و برای حفظ توازن توان در ریزشبکه هر اختلاف توان تولیدی را تامین/ جذب نماید [۱۴-۱۵]. اما هنگامی که به دلیل افت ولتاژها، خطاها، خاموشی و ... ریزشبکه به آرامی به حالت بهره‌برداری جزیره مستقل منتقل شود، توازن توان در ریزشبکه‌ی مجزا خصوصا در هنگام بروز اختلالات توان و بار به عنوان یک موضوع حیاتی برای ادامه بهره‌برداری ایمن ریزشبکه مطرح می‌شود. در صورتی که در حالت جزیره‌ی مستقل به دلیل اختلالات توان و یا افزایش مصرف بار، منابع تولیدپراکنده‌ی موجود در ریزشبکه قادر به تامین توان نباشند می‌توان از سیستم ذخیره‌ی انرژی بهره جست [۱۶] که البته به دلیل محدودیت آن نیز در صورت نیاز باید اقدام به ریزش بار[۵]نمود. اما کمترین میزان ریزش بار و رسیدن سریع‌تر به حالت تعادل توان در ریزشبکه موضوعی است که باید به آن دست یافت.

در ریزشبکه برای تحقق ویژگی نصب و برداشت دلخواه منابع[۶] کنترل دروپ[۷]فرکانس و ولتاژ برای تنظیم توان حقیقی و واکنشی بکار گرفته می‌شود. در این روش سهم هر منبع با واسط اینورتری بر اساس مشخصه منحنی دروپ بدست می‌آید که این امر موجب پاسخ‌گویی سریع و با اختصاص میزان مرجع به هر واحد باعث جلوگیری از آسیب به تولیدات‌پراکنده خواهد شد [۱۷-۲۱]. انحراف فرکانس را می‌توان با تعریف مشخصه دروپ فرکانسی محدود نمود و حتی با استفاده از حلقه احیای فرکانس آن را به مقدار نامی باز گرداند. همچنین با استفاده از مشخصه دروپ ولتاژ نیز تغییرات ولتاژ ترمینال محدود شده است. در نتیجه واحدهای تولیدپراکنده با واسط الکترونیک قدرت به انحراف ولتاژ ناشی از تغییرات ریزشبکه و یا بار محلی در محدوده‌ی مجاز واکنش نشان می‌دهند[۳-۴]. پس با این روش می‌توان فرکانس و ولتاژ ریزشبکه را تنظیم نمود به گونه‌ای که مانع از خروج آنها از مقدار مجاز شد. این امر موجب می‌شود بر خلاف سیستم‌های سنتی در ریزشبکه‌ها انحراف‌های فرکانس و ولتاژ به عنوان شاخصی برای ارزیابی امنیت ریزشبکه مورد توجه قرار نگیرد. پس بدین ترتیب یافتن روش‌هایی برای تشخیص سریع امنیت ریزشبکه‌ی مستقل خصوصا در هنگام بروز اختلالات توان و بار موضوع حائز اهمیتی است. همچنین در صورت غیرامن بودن ریزشبکه، انجام اقدامات فوری برای بهره‌برداری ایمن ریزشبکه امری ضروری است که باید مورد بررسی قرار گیرد. برای ارزیابی امنیت ریزشبکه به روش سنتی دقیق‌ترین روش حل مجموعه-ای از معادلات غیرخطی است که روش محاسباتی بسیار سخت و وقت‌گیری است. اما استفاده از ابزار بر پایه هوش مصنوعی جایگزینی مناسب برای توصیف سریع و دقیق امنیت ریزشبکه است.

در [۲۲] انحراف فرکانس و عملکرد تجهیزات ذخیره‌ساز در ریزشبکه مورد بررسی قرار گرفته است و شاخصی برای ارزیابی امنیت ریزشبکه در مورد انتقال پیش‌بینی نشده به حالت مجزا در هنگام اختلالات در شبکه ولتاژ متوسط بالا دست ارائه شده است. در این مقاله استفاده از شبکه عصبی مصنوعی[۸](ANN) به دلیل سرعت محاسباتی در عملکرد آنلاین و انعطاف‌پذیری آن برای پیش‌بینی اعمال اصلاحی در حالت‌های عملیاتی ناامن به منظور دست‌یابی به یک انتقال روان بین عملکرد متصل و مجزا مورد تاکید قرار گرفته است.

در [۲۳] نیز برای ارزیابی امنیت شبکه توزیع سنتی، انحراف ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله نیز برای ارزیابی امنیت شبکه استاندارد ۹ باس از شبکه عصبی مصنوعی بهره جسته است.

وقتی سیستمی تنها با شبکه‌های عصبی مصنوعی طراحی می-شوند، شبکه به صورت جعبه‌ی سیاهی است که احتیاج به تعریف شدن دارد. این مساله، یک فرایند شدیدا محاسباتی و سنگین است. بعد از تجربیات و تمرینات وسیعی در مورد پیچیدگی شبکه موردنظر و الگوریتم یادگیری که باید استفاده کند و درجه دقتی که در این کاربرد قابل قبول است، طراح می‌تواند به یک رضایت نسبی دست یابد.

اگر عملکردهای منطق فازی[۹]را در شبکه‌های عصبی و یادگیری شرکت دهیم، و طبقه‌بندی کردن شبکه‌های عصبی را در سیستم‌های فازی شریک گردانیم، آنگاه قصور و نواقص شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی را می‌توان پوشش داد. نتیجه این کار، یک شبکه عصبی – فازی تطبیقی[۱۰](ANFIS) خواهد بود.

در شبکه‌ی عصبی – فازی تطبیقی ، ابتدا قسمت شبکه‌ی عصبی، برای یادگیری آن و طبقه‌بندی کردن توانایی‌ها و به منظور پیوند الگو و اصلاح الگو به کار می‌رود. قسمت شبکه‌ی عصبی به طور خودکار، قواعد منطق فازی و توابع عضویت را در طول دوره تناوب

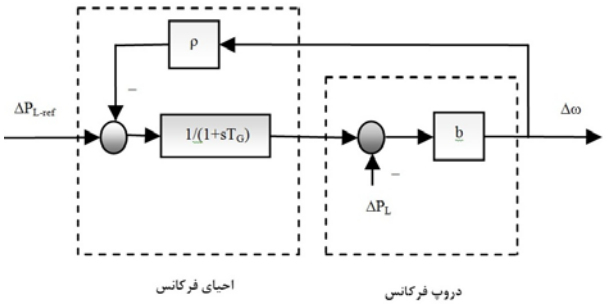
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.2.0]

یادگیری ایجاد می‌کند. در مجموع، حتی پس از یادگیری، شبکه‌ی عصبی به اصلاح توابع عضویت و قواعد منطق فازی ادامه می‌دهد، به گونه‌ای که از سیگنال‌های ورودی آن بیشتر و بیشتر یاد می‌گیرد. از طرف دیگر، منطق فازی برای استنباط و مهیا نمودن یک خروجی قطعی یا غیر فازی شده (وقتی که متغییرهای فازی ایجاد می‌شوند) مورد استفاده قرار می‌گیرند[۲].

در این مقاله امنیت یک ریزشبکه‌ی مستقل ولتاژ متوسط دارای منابع با واسط الکترونیک قدرت در حضور اختلالات توان و بار مورد بررسی قرارگرفته است و تاثیر مشخصه‌های دروپ در انحراف فرکانس و ولتاژ در حضور این اختلالات دیده شده است. برای ارزیابی سریع امنیت ریزشبکه‌ی مورد مطالعه در حضور اختلالات توان و بار از شبکه عصبی – فازی تطبیقی استفاده شده است. در صورت غیر ایمن بودن ریزشبکه، شبکه‌های عصبی – فازی تطبیقی دیگر برای پیش‌بینی حداقل میزان تنظیم تولید و ریزش بار برای رسیدن سریع‌تر به حالت ایمن ریزشبکه نیز پیشنهاد شده است.

۲- بررسی انحراف فرکانس و ولتاژ در ریزشبکه مستقل ولتاژ متوسط دارای منابع با واسط الکترونیک قدرت

در شبکه‌های توزیع سنتی، خصوصا در نمونه‌های مجزا، موضوع حیاتی برای ارزیابی امنیت سیستم، ماکزیمم انحراف‌های فرکانس و ولتاژ از مقدار نامی در شرایط مختلف بهره‌برداری (حضور اختلالات توان و بار) است. اما در ریزشبکه دارای منابع با واسط الکترونیک قدرت استراتژی دروپ که برای مدیریت توان بکار می‌رود با محدودسازی فرکانس و ولتاژ مانع از خروج آنها از مقدار مجاز می‌شود. همچنین با استفاده از حلقه‌ی احیای فرکانس و ولتاژ امکان بازیابی فرکانس و ولتاژ تا مقدارنامی نیز فراهم می‌شود. شکل(۱) نمودار بلوکی کنترلر فرکانس- توان حقیقی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نمودار بلوکی کنترلر فرکانس- توان حقیقی برای یک واحد تولیدپراکنده با واسط الکترونیک قدرت [۲۵]

برای یک واحد تولیدپراکنده با واسط الکترونیک قدرت متصل شده به ریزشبکه، ارتباط بین انحراف فرکانس و تغییر بار برابر است با:

$$\Delta\omega(s) = -\Delta P_L(s)\left[\frac{b}{1+\rho\left(\frac{1}{1+sT_G}\right)b}\right] + \Delta P_{L-ref}(s)\left[\frac{b}{(1+sT_G)+\rho b}\right] \quad (۱)$$

در رابطه (۱) دروپ کنترلر فرکانس - توان حقیقی با یک بهره (b) مدل شده است. همچنین حلقه‌ی احیای فرکانس با یک بهره(ρ) و یک تابع درجه اول پس‌فاز با ثابت زمانی T_G مدل شده است. ΔP_L تغییرات بار و ΔP_{L-ref} نقطه تنظیمی مرجع بار، برای اختصاص فرکانس مرجع، به هر نقطه‌ی توان خروجی در نظر گرفته شده‌اند [۲۵].

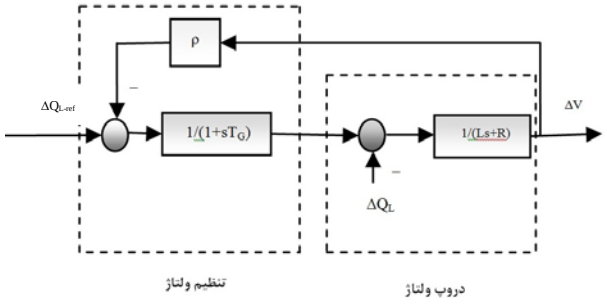
انحراف در پاسخ فرکانسی حالت گذرا برای کنترلر با تنظیم $\frac{1}{s}=0$ بدست می‌آید:

$$\Delta\omega = -b\Delta P_L \quad (۲)$$

انحراف در پاسخ فرکانسی حالت ماندگار برای کنترلر با تنظیم $s=0$ بدست می‌آید [۲۵]:

$$\Delta\omega = \left(-\Delta P_L + \Delta P_{L-ref}\right)\left(\frac{1}{\frac{1}{b}+\rho}\right) \quad (۳)$$

شکل(۲) نمودار بلوکی کنترلر ولتاژ- توان واکنشی را نشان می‌دهد. تنظیم ولتاژ در کنترلر ولتاژ- توان واکنشی شامل یک حلقه‌ی احیای ولتاژ است. این حلقه با یک بهره(ρ) برای خطای ولتاژ و یک ثابت زمانی(T_G) مدل شده است. ΔQ_L تغییرات بار و ΔQ_{L-ref} نقطه تنظیمی مرجع بار، برای اختصاص ولتاژ مرجع، به هر نقطه‌ی توان خروجی در نظر گرفته شده‌اند [۲۵].



شکل (۲): نمودار بلوکی کنترلر ولتاژ- توان واکنشی برای یک واحد تولیدپراکنده با واسط الکترونیک قدرت [۲۵]

بارهای واکنشی وابسته به ولتاژ هستند، توان واکنشی واحد تولیدپراکنده با واسط الکترونیک قدرت بر اساس انحراف در ولتاژ باس تغییر می‌کند. در نتیجه واحد تولیدپراکنده با واسط الکترونیک قدرت به انحراف ناشی از تغییرات ریزشبکه و یا بار محلی واکنش نشان می‌دهد. از این رو واحد تولیدپراکنده می‌تواند بار واکنشی را تامین نماید.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.2.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

برای تولید مشخصه دروپ ولتاژ ارتباط بین انحراف ولتاژ و تغییر بار عبارت است از:

$$\Delta V(s)=\left[\frac{\frac{-\Delta Q_L(s)}{Ls+R}}{1+\rho\left(\frac{1}{1+sT_G}\right)\left(\frac{1}{Ls+R}\right)}\right]+\left[\frac{\frac{\Delta Q_{L-ref}(s)}{Ls+R}}{\left(1+sT_G\right)+\rho\left(\frac{1}{Ls+R}\right)}\right] \quad (۴)$$

انحراف در پاسخ فرکانسی حالت ماندگار برای کنترلر ولتاژ- توان واکنشی با تنظیم $s=0$ بدست می‌آید:

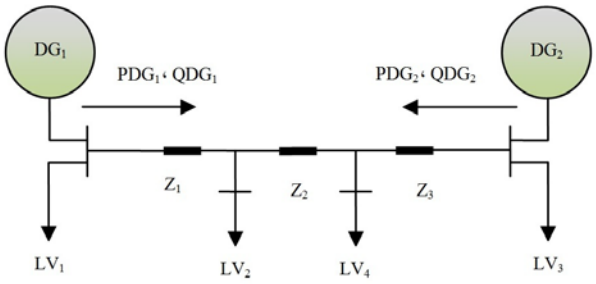
$$\Delta V=\frac{-\Delta Q_L}{R+\rho}+\frac{\Delta Q_{L-ref}}{R+\rho} \quad (۵)$$

انحراف در توان واکنشی تولید شده توسط منبع با واسط الکترونیک قدرت ΔQ_G است که تغییر در بار واکنشی توسط تغییر در خروجی مولد تامین می‌شود پس داریم [25]:

$$\Delta V=\frac{-\Delta Q_G}{R+\rho}+\frac{\Delta Q_{L-ref}}{R+\rho} \quad (۶)$$

۳- سیستم مورد مطالعه

شکل (۳) یک دیاگرام تک خطی ریزشبکه ولتاژ متوسط را نشان می‌دهد.



شکل (۳): ریزشبکه مورد مطالعه

فرض شده که ریزشبکه در حالت جزیره مستقل بهره‌برداری می‌شود. هر واحد تولیدپراکنده می‌تواند با توجه به محدودیت از پیش-تعیین شده مقداری توان حقیقی/ واکنشی را تامین کند. مشخصات ریزشبکه مورد مطالعه در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول (۱): مشخصات ریزشبکه

پارامتر	توضیح	مقادیر
$P_{\max DG_1}$	حداکثر توان حقیقی DG_1	۱/۷۵ MW
$P_{\max DG_2}$	حداکثر توان حقیقی DG_2	۳/۲ MW
m_{DG_1}	ضریب دروپ $P-F$، DG_1	۰/۵۷ Hz / MW
m_{DG_2}	ضریب دروپ $P-F$، DG_2	۰/۳۱۲۵ Hz / MW
$Q_{\max DG_1}$	حداکثر توان واکنشی DG_1	۰/۷۵ MVAr
$Q_{\max DG_2}$	حداکثر توان واکنشی DG_2	۱/۸ MVAr
n_{DG_1}	ضریب دروپ $Q-V$، DG_1	۰/۰۳۲kV / MVAr
n_{DG_2}	ضریب دروپ $Q-V$، DG_2	۰/۰۱۶kV / MVAr
f	فرکانس سیستم	۵۰Hz
Z_1	امپدانس خط ۱	۰/۰۳۳۱ + j۰/۰۲
Z_2	امپدانس خط ۲	۰/۰۱۸۸ + j۰/۰۰۶۸
Z_3	امپدانس خط ۳	۰/۰۲۵۱ + j۰/۰۰۳۵
L_{f_1}، L_{f_2}	اندوکتانس فیلتر سری VSC	۰/۰۰۰۴H
R_{f_1}، R_{f_2}	مقاومت فیلتر سری VSC	۰/۰۰۲Ω
C_{f_1}، C_{f_2}	ظرفیت خازن فیلتر موازی بار	۲۵۰۰μF
V_{L-L}	ولتاژ خط	۲۰kV

۴- شبکه عصبی- فازی تطبیقی برای ارزیابی امنیت ریزشبکه

در این روش برای ارزیابی امنیت ریزشبکه‌ی مستقل باید سطح بالایی از اطلاعات با توجه به رفتار دینامیکی ریزشبکه از مجموعه کلان داده-ها استخراج شود. در ادامه، ابتدا مجموعه داده تولید می‌شود و سپس شبکه‌ی عصبی- فازی تطبیقی برای بررسی امنیت ریزشبکه طراحی خواهد شد که در صورت تشخیص غیر امن بودن ریزشبکه نیز شبکه-های عصبی- فازی تطبیقی دیگر برای پیشنهاد اعمال کنترلی پیشگیرانه طراحی شده‌اند.

۴-۱- تولید مجموعه داده

مجموعه داده شامل نمونه‌هایی از رفتار سیستم است که به شرایط متنوع عملکرد سیستم وابسته می‌باشد. برای انتخاب ورودی‌های شبکه عصبی- فازی تطبیقی باید به این نکته توجه داشت که این مجموعه داده بتواند به سادگی رفتار سیستم را بیان نماید و در ضمن از زیادی تعداد شاخص‌ها برای شبکه‌ی عصبی- فازی تطبیقی پرهیز شود. همچنین ورودی‌های شبکه‌ی عصبی - فازی تطبیقی شامل مجموعه‌ای از متغییرهای قابل مانیتورینگ و کنترل باشد تا درصورت شناسایی حالت‌های عملیاتی غیر امن، اعمال کنترلی پیشگیرانه در سیستم اجرا شود.

به منظور تولید دانش در مورد رفتار دینامیکی ریزشبکه مجموعه داده‌ها شامل مجموع توان تولیدی منابع پراکنده و مجموع توان مصرفی ریزشبکه برای اختلالات توان و بار از پیش تعیین شده به صورت آفلاین از شبیه‌سازی با نرم افزارPSCAD/EMTDC بدست آمده است و برای ارزیابی امنیت ریزشبکه در نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۴-۱-۱- نرمالیزه کردن مجموعه داده

به دلیل این که فرآیند آموزش برای هر مشخصه در یک مقیاس می‌تواند سرعت آموزش را افزایش دهد بنابراین باید مجموعه داده را

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.2.0]

نرمالیزه کرد. مجموعه داده با استفاده از روش مینیمم- ماکزیمم[11] [۲۳] نرمالیزه شده است و تمام مشخصات در مقیاس جدید بین ۰- ۱ قرار گرفتند.

$$x_i' = \frac{x_i - Min_{value}}{Max_{value} - Min_{value}}\left(Max_{t\arg et} - Min_{t\arg et}\right) + Min_{t\arg et} \qquad (۷)$$

Max_{value}: ماکزیمم مقدار اولیه x

Min_{value}: مینیمم مقدار اولیه x

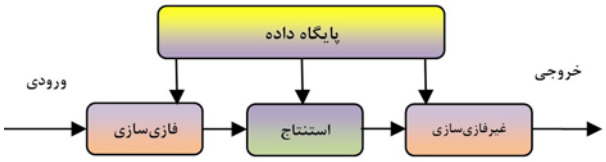
$Max_{t\arg et}$: ماکزیمم مقدار برای محدوده مقیاس

$Min_{t\arg et}$: مینیمم مقدار برای محدوده مقیاس

مجموعه داده نرمالیزه شده بدست آمده به دو گروه آموزش[12] و صحت[13] شبکه تقسیم می‌شوند. مجموعه آموزش برای آموزش ANFIS مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای بررسی صحت خروجی شبکه، خروجی با مجموعه داده صحت مقایسه می‌شود.

۲-۴- طرح پیشنهادی برای بررسی امنیت ریزشبکه با شبکه عصبی- فازی تطبیقی

برای ارزیابی امنیت ریزشبکه مستقل استفاده از شبکه عصبی- فازی تطبیقی پیشنهاد شده است. در شکل (۴) سیستم استنتاج فازی نشان داده شده است.



شکل (۴): سیستم استنتاج فازی

شکل (۵) شبکه عصبی – فازی تطبیقی برای ارزیابی امنیت ریزشبکه را نشان می‌دهد. ورودی‌های این شبکه شامل مجموع توان حقیقی و واکنشی تولیدی[14] و مصرفی[15] در ریزشبکه است.

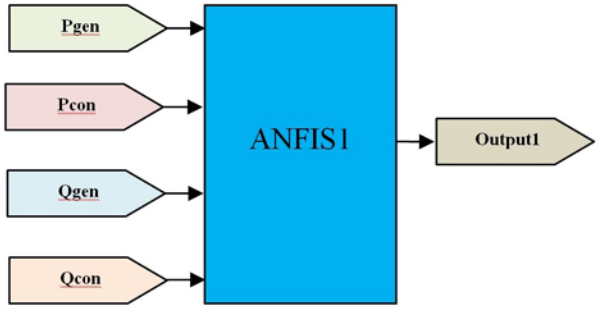
$$Pgen = \sum_{k=1}^{n} Pgen_k \qquad (۸)$$

$$Qgen = \sum_{k=1}^{n} Qgen_k \qquad (۹)$$

$$Pcon = \sum_{h=1}^{m} Pcon_h \qquad (۱۰)$$

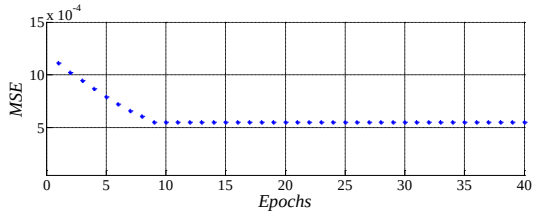
$$Qcon = \sum_{h=1}^{m} Qcon_h \qquad (۱۱)$$

خروجی آن نیز به صورت نشانه‌های باینری[16] ۰ و ۱ است. نشانه ۰ برای جزیره ناموفق و نشانه ۱ برای جزیره موفق در نظر گرفته شده است. هنگامی که در ریزشبکه مستقل توان مصرفی بیشتر از توان تولیدی باشد، جزیره ناموفق و در غیر این صورت جزیره موفق است.



شکل (۵): شبکه عصبی- فازی تطبیقی برای بررسی امنیت ریزشبکه

شکل (۶) میانگین خطا در هر دسته برای شبکه طراحی شده‌ی شکل(۵) را نشان می‌دهد.



شکل (۶): میانگین خطا در هر دسته برای ANFIS1

حال در صورتی که شبکه ANFIS1 ریزشبکه را غیر ایمن تشخیص دهد، اقدامات فوری برای توازن توان در ریزشبکه مانند ریزش بار و تنظیم تولید موردنیاز است. پیش‌بینی کمترین میزان ریزش بار و حداقل میزان ظرفیت ذخیره‌ساز با استفاده از شبکه‌های ANFIS2 و ANFIS3 امکان‌پذیر است. این موضوع در ادامه بررسی خواهد شد.

۱-۲-۴- طرح کنترلی پیشنهادی برای ریزشبکه غیر امن

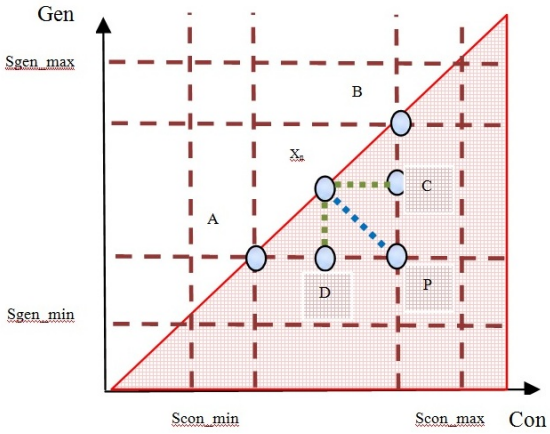
همانطور که پیش‌تر ذکر شد عدم توازن توان در ریزشبکه به عنوان معیاری برای تشخیص امنیت سیستم بیان می‌شود. در این صورت اگر ریزشبکه غیر ایمن باشد طرحی برای هماهنگ‌سازی تولید و مصرف در ریزشبکه موردنیاز است. برای این منظور، فاصله بین نقطه بهره‌برداری و مرز ایمنی می‌تواند برای میزان ریزش بار و تنظیم تولید (در صورت وجود امکان استفاده از ذخیره‌ساز با ظرفیت محدود و یا اتصال به شبکه) در ریزشبکه مورد استفاده قرار گیرد. اگر امکان اتصال به شبکه و یا استفاده از ذخیره‌ساز وجود نداشته باشد تنها باید با استفاده از ریزش بار به مرز ایمنی ریزشبکه دست یافت.

برای بیان این طرح کنترلی همانطور که در شکل(۷) نشان داده شده است محور افقی به مجموع توان مصرفی و محور عمودی به مجموع توان تولیدی در ریزشبکه اختصاص یافته است. سه نقطه در شکل در نظر گرفته شده‌اند که عبارتند از:

نقطه A, B, X_n

$$A(S_{con_t_A}, S_{gen_t}),$$
$$B(S_{con_t}, S_{gen_t_B}),$$
$$X_n(S_{con_t_n}, S_{gen_t_n}),$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.2.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018



شکل (۷): محاسبه کوتاهترین فاصله از مرز ایمنی

X_n نقطه‌ای بین A و B بر روی مرز ناحیه‌ی امن است. برای تولید داریم:

$$S_{gen_t} \in \lfloor S_{gen_min}, S_{gen_max} \rfloor \qquad (۱۲)$$

برای مصرف داریم:

$$S_{con_t} \in \lfloor S_{con_min}, S_{con_max} \rfloor \qquad (۱۳)$$

در لحظه t، سیستم در نقطه P که در بیرون از ناحیه ایمن ریزشبکه است اما هنوز در محدوده‌ی طبیعی ولتاژ و فرکانس است بهره‌برداری می‌شود.(به دلیل استفاده از منابع تولیدپراکنده با واسط الکترونیک قدرت و روش دروپ برای مدیریت توان، تنظیم فرکانس و ولتاژ صورت می‌گیرد و آنها از محدوده مجاز خارج نمی‌شوند)

$$S_{gen_t_n} \in \lfloor S_{gen_t}, S_{gen_t_B} \rfloor \qquad (۱۴)$$

$$S_{con_t_n} \in \lfloor S_{con_t_A}, S_{con_t} \rfloor \qquad (۱۵)$$

فرض می‌شود در صورتی که تولید و مصرف با هم برابر باشند نیمساز، مرز ناحیه امن جزیره است. در غیر این صورت ناحیه قرمز رنگ ناحیه غیر امن ریزشبکه است که باید طرحی برای هماهنگ‌سازی ریزشبکه در این ناحیه در نظر گرفت. کوتاهترین فاصله از نقطه بهره-برداری تا مرز ایمنی خطی عمود است که بر مرز ایمنی رسم می‌شود فاصله این خط برابر است با:

$$\overline{PX_n} = \sqrt{\left(S_{con_t} - S_{con_t_n}\right)^2 + \left(S_{gen_t_n} - S_{gen_t}\right)^2}$$
$$PD = S_{con_t} - S_{con_t_n} \qquad (۱۶)$$
$$PC = S_{gen_t_n} - S_{gen_t}$$

PD حداقل میزان ریزش بار و PC حداقل میزان تنظیم تولید را نشان می‌دهند که در روش پیشنهادی توسط ANFIS2 و ANFIS3 پیش‌بینی می‌شوند. اگر امکان تنظیم تولید وجود نداشته باشد و تنها با ریزش بار بخواهیم به مرز ایمنی دست یابیم این مقدار برابر است با:

$$\overline{PA} = S_{con_t} - S_{con_t_A} \qquad (۱۷)$$

اگر امکان تنظیم تولید وجود داشته باشد و نخواهیم ریزش بار وجود داشته باشد داریم:

$$\overline{PB} = S_{gen_t_B} - S_{gen_t} \qquad (۱۸)$$

۲-۲-۴- طراحی شبکه‌های عصبی- فازی تطبیقی برای اقدامات کنترلی در ریزشبکه غیرامن

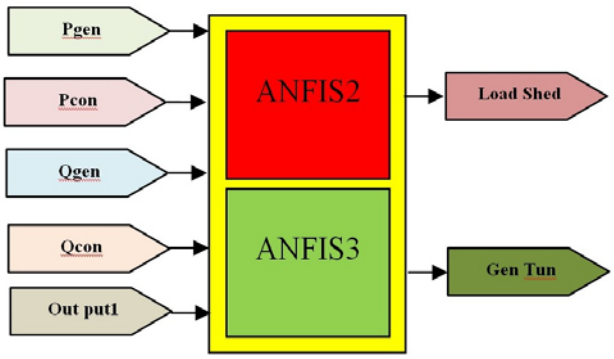
برای طرح هماهنگ‌سازی ریزشبکه نیز از شبکه‌های عصبی- فازی تطبیقی استفاده شده است. ورودی‌های شبکه عصبی- فازی تطبیقی، مجموع توان تولیدی توسط منابع با واسط الکترونیک قدرت، مجموع توان مصرفی فیدرها، نشانه ۰ یا ۱ برای تشخیص امن بودن ریزشبکه است. از خروجی ANFIS2 میزان ریزش بار و از خروجی ANFIS3 میزان تنظیم تولید را می‌توان بدست آورد. دو شبکه ANFIS به صورت موازی در نظرگرفته شده که در هرکدام تعداد ورودی ۵ و خروجی۱ می‌باشد. طراحی مرحله به مرحله به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱) مجموعه آموزشی جمع‌آوری شده برای کنترل‌کننده ANFIS تحت تغییرات تولید و مصرف توان حقیقی و واکنشی بدست می‌آید.

۲) مجموعه داده با استفاده از روش مینیمم- ماکزیمم نرمالیزه شده است و تمام مشخصات در مقیاس جدید بین ۰- ۱ قرار گرفتند.

۳) پس از بدست آوردن مجموعه داده، ساختارANFIS کامل می‌شود.

۴) پس از ایجاد ساختار کنترل‌کننده ، ANFIS آموزش دیده، با خطای کوچک در شکل های ۶، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

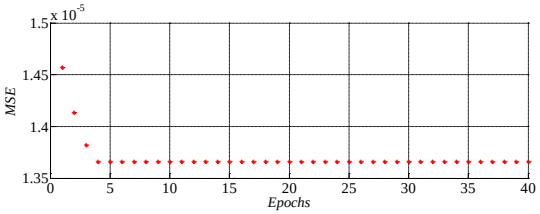


شکل (۸): طرح هماهنگ‌سازی ریزشبکه غیرایمن

شکل (۹) میانگین خطا در هر دسته برای شبکه طراحی شده‌ی به منظور پیش‌بینی حداقل میزان ریزش بار را نشان می‌دهد.

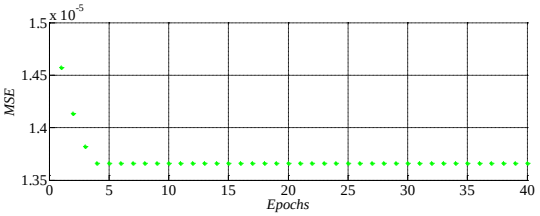
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.2.0]



شکل (۹): میانگین خطا در هر دسته برای ANFIS2

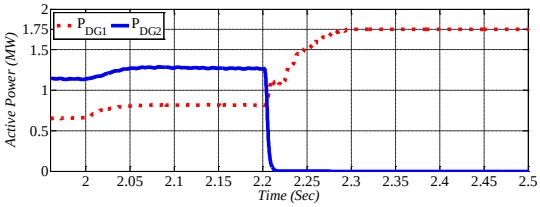
شکل (۱۰) میانگین خطا در هر دسته برای شبکه طراحی شده‌ی به منظور پیش‌بینی حداقل میزان تنظیم تولید را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): میانگین خطا در هر دسته برای ANFIS3

۵- نتایج در ریزشبکه مورد مطالعه

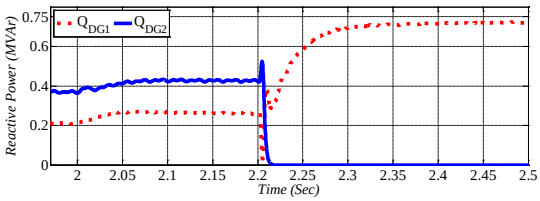
برای ارزیابی امنیت ریزشبکه مورد مطالعه در شرایط مختلف دو آزمایش انجام شده است. در آزمایش اول در لحظه ۲ ثانیه افزایش بار استاتیکی در فیدر یک رخ داده است و در لحظه ۲/۲ ثانیه تولیدپراکنده۲ قطع شده است. شکل (۱۱) توان حقیقی تولیدات-پراکنده در هنگام اختلالات توان و بار را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): میزان توان حقیقی تولیدی تولیدات‌پراکنده در ریزشبکه مورد مطالعه در هنگام اختلالات توان و بار

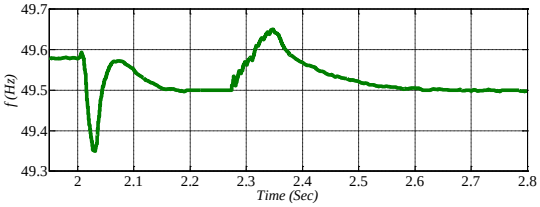
با افزایش تقاضای توان در ۲ ثانیه، این تقاضا با روش دروپ بین تولیدات‌پراکنده به اشتراک گذاشته می‌شود. اما هنگامی که در لحظه ۲/۲ ثانیه به دلیل بروز مشکلاتی، ناگهان تولیدپراکنده۲ قطع می‌شود، تولیدپراکنده ۱ برای پاسخ‌گویی به تقاضای بارهای ریزشبکه میزان توان حقیقی تولیدی خود را تا مقدار حداکثر افزایش می‌دهد، اما با این وجود قادر به تامین تقاضای بارهای ریزشبکه نیست.

شکل (۱۲) میزان توان واکنشی تولیدات‌پراکنده در ریزشبکه مستقل طبق رابطه (۵) و (۶) تغییر بار توسط تولیدات‌پراکنده تامین خواهد شد. همچنین در هنگامی که تولیدپراکنده ۲ قطع شده است، تولیدپراکنده ۱ با افزایش توان، توان واکنشی ریزشبکه را تامین می‌کند.

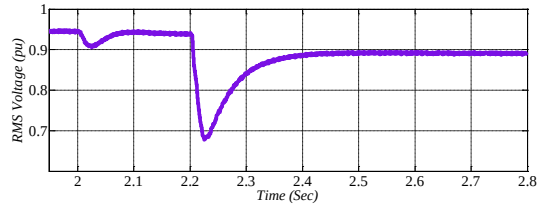


شکل (۱۲): میزان توان واکنشی تولیدی تولیدات‌پراکنده در ریزشبکه مورد مطالعه در هنگام اختلالات توان و بار

در هنگام این اختلالات میزان انحراف فرکانس و ولتاژ در ریزشبکه در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است.



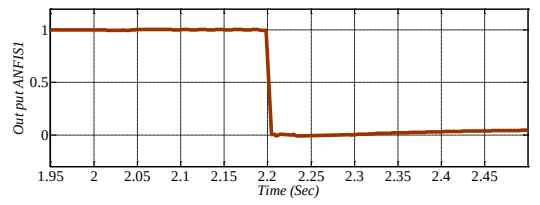
شکل (۱۳): میزان انحراف فرکانس در ریزشبکه مورد مطالعه در هنگام اختلالات توان و بار



شکل (۱۴): میزان انحراف ولتاژ در ریزشبکه مورد مطالعه در هنگام اختلالات توان و بار

در اثر تغییرات توان و بار در ریزشبکه مورد مطالعه، فرکانس ریزشبکه تغییر نموده است که به دلیل استفاده از مشخصه دروپ این تغییرات محدود می‌باشند. به گونه‌ای که تغییرات برای فرکانس حدود ۰/۵ هرتز است. همچنین ولتاژ ریزشبکه نیز تغییر نموده است که به دلیل استفاده از مشخصه دروپ تغییرات آن نیز محدود است و حدود ۰/۹ است. پس بدین ترتیب انحراف فرکانس و ولتاژ نمی‌تواند شاخصی برای ارزیابی امنیت ریزشبکه در نظر گرفته شود.

در شکل (۱۵) روش پیشنهادی برای ارزیابی امنیت ریزشبکه با استفاده از شبکه عصبی – فازی تطبیقی نشان داده شده است.



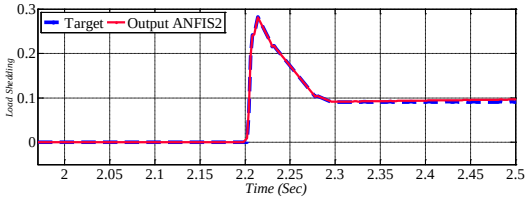
شکل (۱۵): ارزیابی امنیت ریزشبکه موردمطالعه در هنگام اختلالات توان و بار با استفاده از ANFIS1

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.2.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

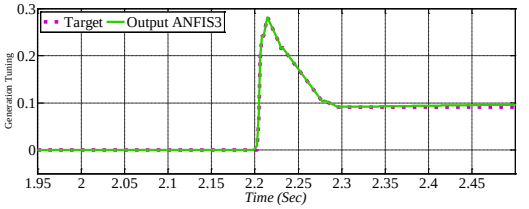
همان طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است در لحظه ۲ ثانیه تقاضای بار در ریزشبکه افزایش یافته است اما به دلیل امکان تامین تقاضای توان توسط تولیدات‌پراکنده ریزشبکه ایمن است که خروجی ANFIS1 ، ۱ این موضوع را تصدیق می‌کند. اما هنگامی که در لحظه ۲/۲ ثانیه تولیدپراکنده۲ قطع می‌شود، تولیدپراکنده۱ به تنهایی قادر به تامین تقاضای بار در ریزشبکه نخواهد بود و این عدم توازن توان منجر به غیر ایمن بودن ریزشبکه خواهد شد که خروجی ANFIS1 ، ۰ این موضوع را به خوبی تصدیق می‌کند.

حال که به دلیل بروز اختلالات توان ریزشبکه غیر ایمن شده است برای بهره برداری ایمن ریزشبکه باید با استفاده از طرح هماهنگ سازی پیشنهادی، حداقل میزان ریزش بار و حداقل میزان تنظیم تولید را برای ایمن سازی ریزشبکه بدست آورد. شکل (۱۶) با استفاده از شبکه عصبی- فازی تطبیقی ۲ حداقل میزان ریزش بار را برای ایمن سازی ریزشبکه در هنگام بروز اختلالات توان نشان می‌دهد. میزان دقیق حداقل ریزش بار که از رابطه (۱۶) بدست آمده نیز در شکل (۱۶) نشان داده شده است. مقایسه این دو شکل، نشان دهنده دقت بالای شبکه عصبی- فازی تطبیقی ۲ برای پیش‌بینی حداقل میزان ریزش بار در هنگام بروز اختلالات است.



شکل (۱۶): پیش‌بینی حداقل میزان ریزش بار با استفاده از ANFIS2

با توجه به امکان استفاده از ذخیره‌ساز در ریزشبکه در هنگام بروز اختلالات توان و بار، شکل (۱۷) پیش‌بینی حداقل میزان تنظیم تولید را با استفاده از شبکه عصبی- فازی تطبیقی ۳ نشان می‌دهد. میزان دقیق حداقل تنظیم تولید که از رابطه (۱۶) بدست آمده نیز در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مقایسه این دو شکل، نشان دهنده دقت بالای شبکه عصبی- فازی تطبیقی ۳ برای پیش‌بینی حداقل میزان تنظیم تولید در هنگام بروز اختلالات است.



شکل (۱۷): پیش‌بینی حداقل میزان تنظیم تولید با استفاده از ANFIS3

در لحظه ۲/۲ ثانیه به دلیل قطع ناگهانی تولیدپراکنده۲، نیاز به توان بیشتری است اما بعد از چند صدم ثانیه به دلیل افزایش توان خروجی تولیدپراکنده ۱، این مقدار تعدیل شده است. باید توجه داشت مقادیر بدست آمده برای تنظیم تولید و ریزش بار مقادیر نرمالیزه شده بین ۰-۱ می‌باشند.

۶- نتیجه‌گیری

در سیستم توزیع سنتی، حداکثر انحراف فرکانس و ولتاژ که با تغییر در فرکانس و ولتاژ سیستم بدست می‌آید به عنوان شاخصی برای ارزیابی امنیت سیستم مورد توجه قرار می‌گیرد. اما در یک ریزشبکه مستقل که تنها دارای منابع با واسط الکترونیک قدرت است به دلیل استفاده از روش کنترل دروپ فرکانس و ولتاژ برای مدیریت توان در ریزشبکه، انحراف فرکانس و ولتاژ در محدوده‌ی مجاز تنظیم می‌شود. در نتیجه بر خلاف سیستم‌های سنتی، در ریزشبکه مستقل دارای منابع با واسط الکترونیک قدرت انحراف فرکانس و ولتاژ نمی‌تواند شاخصی برای ارزیابی امنیت ریزشبکه در نظر گرفته شود. اما شاخص جدید برای ارزیابی امنیت ریزشبکه توازن توان بین تولید و مصرف در ریزشبکه است. اگر این توازن وجود نداشته باشد ریزشبکه غیرایمن خواهد بود. تشخیص سریع غیرامن بودن ریزشبکه موضوع مهم دیگری است که باید مورد توجه قرار گیرد و همچنین انجام اقدامات فوری کنترلی نیز دارای اهمیت بسیاری است. در این مقاله برای ارزیابی امنیت ریزشبکه ولتاژ متوسط شبکه عصبی – فازی تطبیقی پیشنهاد شده است. همچنین برای انجام اقدامات فوری نیز به منظور رسیدن سریع‌تر به حالت ایمن ریزشبکه، پیش‌بینی اعمال کنترلی توسط شبکه‌های عصبی – فازی تطبیقی دیگر پیشنهاد شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده سرعت و دقت بالای شبکه عصبی – فازی تطبیقی برای ارزیابی امنیت ریزشبکه و پیشنهاد اعمال کنترلی پیشگیرانه در صورت غیرامن بودن ریزشبکه برای اختلالات توان و بار از پیش‌تعیین شده است.

مراجع

[۱] چاودوری، اس.، چاودوری، اس. پی. و کراسلی، پی.، **ریزشبکه‌ها و شبکه‌های توزیع فعال**، ترجمه، جورابیان، محمود، قره‌پتیان، گئورگ و قاسمی، حسین، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، سال ۱۳۹۲.

[۲] اس. وی. کارتالوپولس.، **منطق فازی و شبکه‌های عصبی**، ترجمه، جورابیان، محمود، هوشمند، رحمت الله، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ دوم سال ۱۳۸۲.

[۳] پارسی، مهتاب، **مدیریت توان در ریزشبکه مستقل با واسط الکترونیک قدرت**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، تابستان ۱۳۹۲.

[۴] جورابیان، محمود، پارسی، مهتاب، **مدیریت توان در ریزشبکه**، کارگاه آموزشی دومین کنفرانس شبکه‌های الکتریکی هوشمند، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، خرداد ۱۳۹۱.

[۵] واحدی، حسان، نوروزیان، رضا، جلیلوند، ابوالفضل و قره‌پتیان، گئورگ **" ارائه روشی نوین برای بهره‌برداری و تشخیص حالت جزیره‌ای**

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.2.0]

تولیدات‌پراکنده مبتنی بر اینورتر"، مجله انجمن برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره دوم، ۱۳۹۰.

[۶] حسامی نقشبندی، علی، حبیبی، فرشید و بیورانی، حسن، " **طراحی یک کنترل‌کننده مقاوم برای پایداری ولتاژ یک ریزشبکه در حالات مختلف کاری**"، مجله انجمن برق و الکترونیک ایران، سال دهم، شماره اول، ۱۳۹۲.

[7] Lasseter, R. H., "Smart Distribution: Coupled Microgrid", Proceeding of IEEE, Vol. 99, No. 6, pp. 1074-1082, 2011.

[8] Lasseter, R. H., Paigi, P., "Microgrid a conceptual solution", Power Electronics Specialliasts Conference (PESC'04), Vol. 6, pp. 4285-4290, 2004.

[9] Farhangi, H., "The path of the Smart grid", IEEE PES magazine, Vol. 8, No.1, pp. 19-28, 2010.

[10] Lasseter, R. H., "Microgrids", Power Engineering Socitey Winter Meeting, Vol. 1, pp. 305-308, 2002.

[11] Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N. & Dimeas, A., "Microgrids Management", IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 6, No. 3, pp. 54-65, 2008.

[12] Peng, F. Z., Wei Li, Y., Tolbert, L. M., "Control and Protection of Power Electronics Interfaced Distributed Generation Systems in a Customer- Driven Microgrid", Power & Energy Society General Meeting (PES), pp. 26-30, 2009.

[13] Miao, Z., Domijan, A., Fan, L., "Investigation of Microgrids with Both Inverter Interfaced and Direct AC Connected Distributed Energy Resource", IEEE Tran., Power Delivery, Vol. 26, No. 3, pp. 1634-2642, 2011.

[14] Aktarujjaman, M., Haque, M. E., Muttaqi, K. M., Negnevitsky M., Ledwich, G. F., "Control Stabilisation of Multiple Distributed Generation", In Proceeding Australasian Universities Power Engineering Conference(AUPEC), Perth, Western Australia, pp. 636-640, 2007.

[15] Piagi, P., Lasseter, R. H., "Autonomous control of Microgrids", IEEE PES Meeting, Montreal, 2006.

[16] Gazanfari, A., Hamzeh, M., Mokhtari, H. & Karimi, H., "Active Power Management of Multi-Hybrid Fuel Cell/Supercapacitor Power Conversion System in a Medium Voltage Microgrid", IEEE Trans., Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 1903-1910, 2012.

[17] Chandorkar, M. C., Divan, M. D. and Adapa R., "Control of paralle connected inverters in standalone ac supply systems ", IEEE Trans., Ind. Appl., Vol. 29, No. 1, pp. 136-143, 1993.

[18] Katiraei, F., Iravani, M. R., "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units", IEEE Trans., Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1821-1831, 2006.

[19] Lopes, J. A. P., Moreira, C. L., Madureira, A. G., "Defining control strategies for Microgrids Islanded operation", IEEE Trans., Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 916-924, 2006.

[20] Hamzeh, M., Karimi, H., Mokhtari, H., "A New control Strategy for a Multi-bus MV Microgrid Under Unbalanced Conditions", IEEE Trans., Power Systems., Vol. 27, No. 4, pp. 2225-2232, 2012.

[21] Hamzeh, M., Mokhtari, H. & Karimi, H., "A decentralized self adjusting control strategy for reactive power management in an islanded multi-bus MV microgrid", Electrical and Computer Engineer, Canadian Journal, Vol. 36, No. 1, pp. 18-25, 2013.

[22] Moreira, C. L., Lopes, J. A. P., "Microgrids Dynamic Security Assessment", Clean Electrical Power (ICCEP'07), pp. 26-32, 2007.

[23] Jasni, J., Ab Kadir, M. Z. A., "Static Power System Security Assessment Via Artifical Neural Network", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 119-128, 2011.

[24] Roger Jang, J. S., "ANFIS: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference System", IEEE Trans., Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, 1993.

[25] IIIindala, M. S., Piagi, P., Zhang, H., Venkataramanan, G., Lasseter, R. H., "Hardware Development of a Laboratory- Scale Microgrid Phase2: Operation and Control of a Two-Inverter Microgrid", Subcontractor Report, National Renewable Energy Laboratory, 2004.

زیرنویس‌ها

[1]MicroGrid (MG)
[2]Distributed Generation (DG)
[3]Distributed Storage (DS)
[4]Slack
[5]Load Shedding
[6]Plug and Play
[7]Droop
[8]Artificial Neural Network (ANN)
[9]Fuzzy

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.2.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018