

پیش‌بینی وضعیت بهره‌برداری سیستم قدرت با در نظر گرفتن حد راکتیو ژنراتورها و حد دینامیکی پایداری ولتاژ با استفاده از شبکه عصبی

عیسی خواجه‌وندی^{۱*}، نیما امجدی^۲، محمدحسین ولایتی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۳۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۰۵	در یک سیستم قدرت، حد دینامیکی پایداری ولتاژ متناظر با دوشاخگی HB و حد راکتیو ژنراتورها به‌عنوان دو مفهوم اساسی از منظر پایداری ولتاژ در بهره‌برداری سیستم تعریف می‌شوند. وقوع HB سبب بروز نوسانات با دامنه ثابت یا افزایشی در سیستم قدرت می‌شود. علاوه بر این، رسیدن ژنراتورها به حد راکتیو خود، تأثیری بسزا بر پایداری سیستم قدرت داشته، سبب کاهش حد پایداری ولتاژ و در مواردی بروز فروپاشی ولتاژ می‌شود. بنابراین آگاهی از اینکه در لحظه بهره‌برداری، نقطه کار سیستم نسبت به حدود تعریف‌شده در چه شرایطی است، اهمیت زیادی برای بهره‌بردار سیستم قدرت به‌منظور ارائه راهکارهای پیشگیری‌کننده یا اصلاح‌کننده خواهد داشت. بر این اساس، استفاده از یک ابزار مناسب به‌نحوی که بتوان با استفاده از آن وضعیت بهره‌برداری سیستم قدرت را با توجه به حدود بیان‌شده تعیین و پیش‌بینی کرد، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. بدین‌منظور، با توجه به حدود بیان‌شده، در این مقاله یک دسته‌بندی جدید از حیث بهره‌برداری برای سیستم قدرت تعریف شده، در نهایت با استفاده از شبکه عصبی PNN، وضعیت بهره‌برداری سیستم قدرت موردپیش‌بینی قرار خواهد گرفت. نتایج عددی حاصل از این تحلیل بر روی سیستم‌های تست ۳۹ و ۶۸ IEEE ارائه شده است.
واژگان کلیدی: دوشاخگی HB، دوشاخگی LIDB، حد توان راکتیو ژنراتور، شبکه عصبی.	

۱- مقدمه

در یک سیستم قدرت، عوامل متعددی از قبیل مدل بار، پارامترهای سیستم‌های کنترلی مانند سیستم تحریک ژنراتورها، محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها، تنظیمات ولتاژ ترمینال ژنراتورها و وقوع حالات اضطراری مانند تغییرات بار سیستم یا خروج خطوط انتقال از مدار از جمله مواردی هستند که تأثیری بسزا بر پایداری ولتاژ سیستم قدرت دارند [۱-۴].

در مطالعات پایداری ولتاژ، حدود یا مرزهای متعددی با مفاهیم مختلف تعریف می‌شوند. از جمله این مرزها، دوشاخگی HB^۴ بوده که متناظر با قرارگرفتن یک جفت مقدار ویژه بحرانی ماتریس ژاکوبین جبری دینامیکی

سیستم قدرت بر روی محور موهومی صفحه اعداد مختلط است. [۱-۳] از نظر مطالعات سیگنال کوچک، پایداری ولتاژ سیستم زمانی برقرار است که نسبت میرایی مد بحرانی مثبت و در نتیجه نوسانات سیستم میراشونده باشد. در غیر این صورت، به علت قرارگرفتن یک جفت مقدار ویژه مختلط و بحرانی سیستم در سمت راست صفحه اعداد مختلط، میرایی منفی و در نتیجه سیستم قدرت دچار نوسانات نامیرا با دامنه افزایشی خواهد شد. [۱-۳] از سوی دیگر با رسیدن یکی از ژنراتورهای سیستم قدرت به حد توان راکتیو، یکی دیگر از مرزهای پایداری ولتاژ تحت عنوان دوشاخگی LIB^۵ رخ می‌دهد. [۵-۷] بروز این دوشاخگی، در مواردی سبب کاهش حد پایداری ولتاژ شده، حد

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: issa.khajevandi@yahoo.com

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

^۴ Hopf Bifurcation

^۵ Limit Induced Bifurcation

- ارائه شده در [۱۷-۱۵] شامل موارد زیر است:
- برخلاف الگوریتم‌های ارائه شده در [۱۷-۱۵] که تنها یکی از مرزهای دوشاخگی (SNB) بررسی و وضعیت پایداری سیستم قدرت بر اساس آن، پیش‌بینی شده است، در این مقاله، دو نوع دوشاخگی‌های (HB و LIB) بررسی شده و وضعیت پایداری سیستم قدرت با در نظر گرفتن هم‌زمان مرزهای مذکور، مورد پیش‌بینی قرار گرفته است.
 - تحلیل و دستیابی به مرز HB پیچیده‌تر از مرز SNB است. بنابراین در این مقاله، راه‌حلی به منظور بررسی وضعیت سیستم قدرت بر اساس این مرز و بدون حل معادلات جبری دینامیکی سیستم قدرت ارائه شده است.
 - در این مقاله، مسئله پایداری ولتاژ به صورت یک مسئله دسته‌بندی مورد بررسی و پیش‌بینی قرار گرفته است. بر اساس [۸]، خطای این روش در مقایسه با روش‌هایی که مسئله پایداری ولتاژ را با تخمین حد پایداری ولتاژ حل نموده‌اند، بسیار کمتر است.

بدین منظور، در بخش دوم مقاله، مفاهیم اولیه دوشاخگی‌های HB و LIDB بیان خواهد شد. در بخش سوم، مسئله پیش‌بینی پایداری ولتاژ بر اساس مرزهای HB و LIDB تشریح شده، در بخش چهارم، الگوریتم پیش‌بینی پایداری ولتاژ بر اساس مرزهای HB و LIDB بیان خواهد شد. در بخش پنجم، نتایج عددی مطالعات مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

۲- نقاط دوشاخگی HB و LIDB

برای انجام مطالعات دینامیکی در یک سیستم قدرت، مدل‌سازی دقیق تجهیزات موجود در سیستم و استفاده از شبیه‌سازی حوزه زمان اجتناب‌ناپذیر است. در مطالعات پایداری ولتاژ، نوع تجهیزات مدل‌سازی شده بر اساس زمان مطالعات که می‌تواند کوتاه‌مدت یا بلند مدت باشد، تغییر می‌کند. [۳] در هر حال، در هر دو نوع مطالعات، ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت مطابق با روابط زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (1)$$

دینامیکی پایداری ولتاژ را که فاصله میان بار پایه سیستم و سطح بار منجر به HB تعریف می‌شود [۲ و ۸] کاهش می‌دهد. چنین حالتی که در آن پس از رسیدن ژنراتورها به حد راکتیو خود، حد پایداری ولتاژ کاهش می‌یابد و پس از آن سیستم دارای نقطه تعادل بوده، همچنان در ناحیه پایدار قرار دارد، متناظر با دوشاخگی^۱ LIDB است.

برای کاهش آثار چنین رخدادهایی، راهکارهای مختلفی به منظور بهبود شرایط بهره‌برداری از سیستم قدرت ارائه شده است. [۹-۱۲] اغلب این راهکارها، به عنوان راهکارهای اصلاح‌کننده^۲ شناخته می‌شوند. از جمله این راهکارها می‌توان به تغییر تپ ترانسفورماتورها، کلیدزنی بانک‌های خازنی، بارزدایی در سیستم قدرت و... اشاره کرد.

باتوجه به پیچیده‌تر شدن سیستم‌های قدرت و نیز بروز رفتارهای غیرخطی در آن‌ها به‌ویژه در سمت مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی، پیش‌بینی بار آینده سیستم‌های قدرت اهمیت زیادی پیدا کرده است. [۱۳] باین حال در کنار پیش‌بینی بار، آگاهی از اینکه آیا به‌ازای بارهای پیش‌بینی شده (که هر کدام از آن‌ها متناظر با یک نقطه کار سیستم قدرت هستند) شرایط بهره‌برداری از سیستم قدرت نیز مناسب است یا خیر، اهمیت زیادی خواهد داشت. درحقیقت، آگاهی از این موضوع سبب شناخت بهتر بهره‌بردار شبکه از وضع سیستم و در نتیجه ارائه بهترین راهکار برای بهبود وضعیت بهره‌برداری سیستم قدرت می‌شود. این‌گونه راهکارها، به عنوان راهکارهای پیش‌گیری‌کننده^۳ در سیستم‌های قدرت شناخته می‌شوند. بنابراین، پیش‌بینی وضعیت بهره‌برداری سیستم قدرت در کنار پیش‌بینی بار، اهمیت زیادی خواهد داشت. برخلاف مطالعات گذشته که اغلب به پیش‌بینی حد پایداری ولتاژ سیستم قدرت بر اساس فاصله میان نقطه کار سیستم و مرز فروپاشی ولتاژ (SNB^۴) پرداخته‌اند [۱۷-۱۵]، در این مقاله، با استفاده از شبکه عصبی وضعیت پایداری ولتاژ مورد پیش‌بینی قرار خواهد گرفت. بدین منظور باتوجه به مرزهای HB و LIDB، دسته‌بندی جدیدی برای شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت ارائه خواهد شد. در این زمینه، با استفاده از شبکه عصبی، ارتباط میان هر نقطه کار و دسته‌بندی بیان شده مورد پیش‌بینی قرار خواهد گرفت. مهم‌ترین ویژگی‌های مقاله حاضر در مقایسه با روش‌های

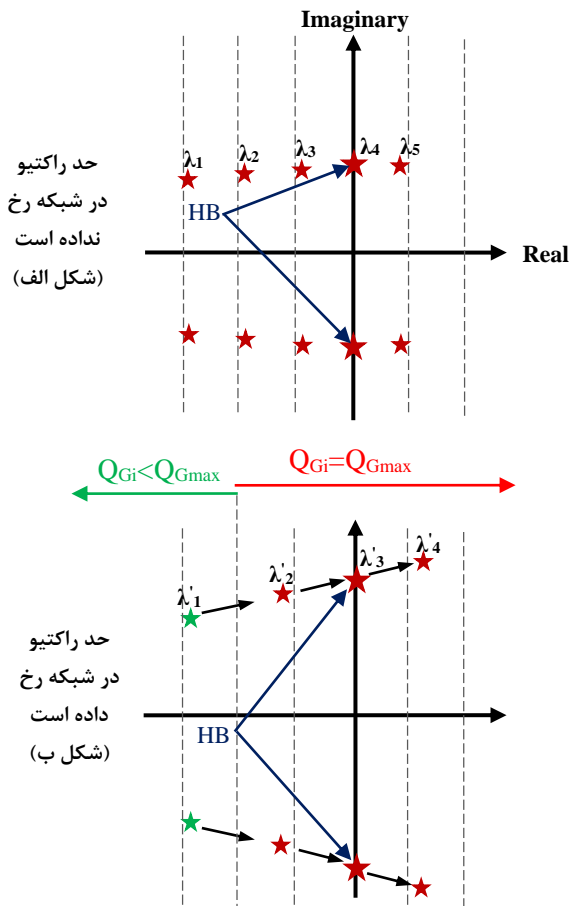
³ Preventive Strategies

⁴ Saddle Node Bifurcation

¹ Limit Induced Dynamic Bifurcation

² Corrective strategies

این حالت، هیچ‌کدام از ژنراتورها یا دیگر ادوات تولید توان راکتیو سیستم به حد راکتیو خود نرسیده‌اند. این در حالی است که در شکل (۱-ب) حداقل یک ژنراتور به حد راکتیو خود رسیده، HB در سطح بار λ_3 ($\lambda_3 < \lambda_4$) رخ می‌دهد. این موضوع به‌خوبی جهش مقدار ویژه بحرانی را در شرایطی که ژنراتورها به حد راکتیو خود می‌رسند، نشان می‌دهد.



شکل ۱: رفتار مقدار ویژه بحرانی در دو حالت HB و LIDB

در نقطه مقابل LIDB، با وقوع LISB سیستم دچار فروپاشی ولتاژ می‌شود و پس از آن نقطه تعادلی در سیستم وجود ندارد [۵-۷].

۳- تشریح مسئله پیش‌بینی پایداری ولتاژ بر اساس مرزهای HB و LIDB

بر اساس آنچه در شکل (۲) نشان داده شده است، با افزایش یا کاهش سطح بار سیستم از مقدار λ_1 (نقطه کار λ_1 ام)، ۱۰ حالت مختلف رخ خواهد داد. به‌عنوان مثال، با افزایش بار سیستم در حالت ۱۰، هیچ‌کدام از نقاط دوشاخگی در

$$\Delta \dot{x} = (J_{11} - J_{12} J_{22}^{-1} J_{12}) \Delta x = A \Delta x \quad (2)$$

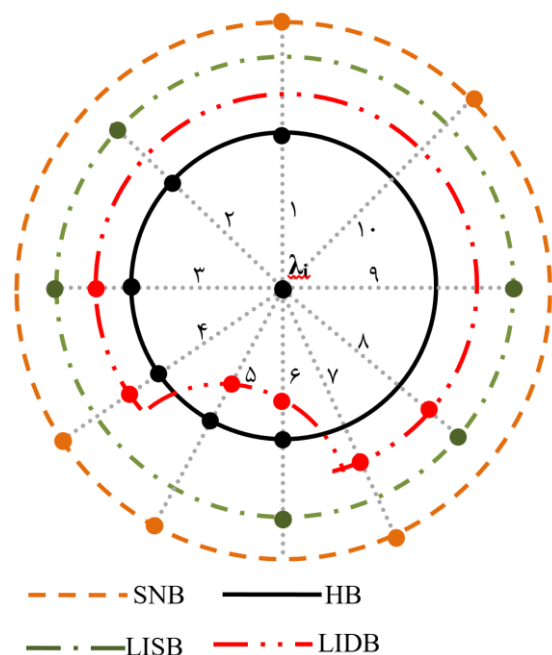
در روابط (۱) و (۲)، J ژاکوبین جبری دینامیکی و A ژاکوبین جبری دینامیکی کاهش یافته، سیستم قدرت هستند. همچنین x متغیرهای حالت سیستم مانند زاویه رتور و سرعت ژنراتورها و y نیز متغیرهای جبری‌اند [۱، ۳، ۵، ۸].

از حیث دینامیکی، پایداری ولتاژ یک سیستم قدرت زمانی برقرار است که تمامی مقادیر ویژه ژاکوبین A که با استفاده از تحلیل مدال قابل دستیابی‌اند، در سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط واقع شده باشد. [۳-۱ و ۸] بر اساس ژاکوبین A ، دوشاخگی HB متناظر با حالتی است که یک جفت مقدار ویژه بحرانی ژاکوبین A بر روی محور موهومی صفحه اعداد مختلط واقع می‌شود. در این حالت، نسبت میرایی چنین مدی صفر شده، در نتیجه سیستم دچار رفتار نوسانی با دامنه ثابت یا دامنه افزایشی می‌شود. [۱ و ۳] برخلاف دوشاخگی HB که با استفاده از ترکیب شبیه‌سازی حوزه زمان، تحلیل مدال و تئوری دوشاخگی تعیین می‌شود، دوشاخگی LIB ناشی از محدودیت توان راکتیو تولیدی در سیستم قدرت بوده، متناظر با حالتی است که ژنراتور/ژنراتورها یا دیگر ادوات تنظیم ولتاژ به حد راکتیو خود می‌رسند. بروز LIB سبب جهش ناگهانی مقدار ویژه بحرانی ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت می‌شود و حد پایداری ولتاژ را کاهش می‌دهد [۵-۷].

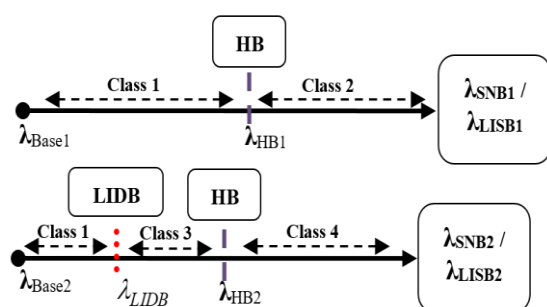
جهش ناگهانی مقدار ویژه بحرانی ممکن است همچنان در ناحیه پایدار (سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط) باشد یا به‌طور ناگهانی ناپایدار شود و در نتیجه فروپاشی ولتاژ در سیستم قدرت رخ دهد. این رفتار مقادیر ویژه بحرانی، سبب ایجاد دو نوع دوشاخگی تحت عناوین LIDB و LISB^۱ در سیستم قدرت می‌شود. [۵-۷] دوشاخگی LIDB متناظر با حالتی است که پس از وقوع آن، سیستم دارای نقطه تعادل بوده، همچنان در ناحیه پایدار قرار دارد. در این حالت، امکان افزایش بار تا مرز فروپاشی ولتاژ وجود دارد. شکل (۱) رفتار مقدار ویژه بحرانی یک سیستم قدرت را به‌زای افزایش بار سیستم در دو حالت HB (شکل الف) و LIDB (شکل ب) نشان می‌دهد. باتوجه‌به شکل (۱-الف) با افزایش بار سیستم از λ_1 تا λ_5 ، HB در ضریب بارگذاری λ_4 رخ می‌دهد. در

^۱ Limit Induced Static Bifurcation

در کلاس ۱ و پس از آن در کلاس ۳ دسته‌بندی می‌شوند. همچنین عملاً از نقاط پس از LISB به دلیل اینکه معادل فروپاشی ولتاژ است، صرف نظر می‌شود.



شکل ۲: وقوع مرزهای دوشاخگی مختلف در سیستم قدرت به‌ازای بارگذاری‌های مختلف



شکل ۳: دسته‌بندی پیشنهادی به‌منظور پیش‌بینی رفتار سیستم قدرت از دید مرزهای HB و LIDB

بنابراین، با توجه به توضیحات ارائه‌شده، جمع‌بندی دسته‌بندی پیشنهادی به شرح زیر است:

- در شرایطی که در سیستم حد راکتیو منابع توان راکتیو رخ ندهد و تمام نقاط کار سیستم قبل از HB باشند، این نقاط متناظر با کلاس ۱ هستند.
- در شرایطی که در سیستم حد راکتیو منابع توان راکتیو رخ ندهد و تمام نقاط کار سیستم پس از HB باشند، این نقاط متناظر با کلاس ۲ هستند.
- در شرایطی که در سیستم حد راکتیو منابع توان راکتیو رخ دهد و تمام نقاط کار سیستم قبل از HB باشند، این نقاط متناظر با کلاس ۳ هستند.

سیستم تا لحظه وقوع SNB رخ نمی‌دهد. به عبارت دیگر، بار سیستم تا لحظه فروپاشی ولتاژ که همان دوشاخگی SNB در سیستم قدرت است [۱ و ۳] می‌تواند افزایش یابد. به‌عنوان مثال دیگر، با افزایش بار سیستم در حالت ۴، ابتدا دوشاخگی HB، سپس LIDB و در نهایت SNB رخ می‌دهد. این در حالی است که در حالت ۵، HB پس از LIDB رخ داده است. بنابراین به‌ازای بار پیش‌بینی‌شده، نقطه کار جدید سیستم نسبت به هر کدام از مرزهای HB، LIDB، LISB و SNB، وضعیت متفاوتی خواهد داشت. به‌عنوان مثال، نقطه کار جدید سیستم ممکن است بین مرزهای LIDB و SNB قرار بگیرد. این حالت نشان می‌دهد حد راکتیو شبکه رخ داده است و در نتیجه پایداری ولتاژ سیستم از جانب این محدودیت تهدید می‌شود. بنابراین اپراتور شبکه باید یک راهکار اصلاحی مانند افزودن منابع توان راکتیو به شبکه در پیش‌گیرند. بدیهی است پیش‌بینی بار سیستم، این رفتار را برای اپراتور شبکه مشخص نمی‌کند؛ از این‌رو ارائه یک ابزار کارآمد برای پیش‌بینی رفتار احتمالی هر نقطه کار سیستم، ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به رفتارهای متفاوت نقاط کار مختلف سیستم قدرت نسبت به هر کدام از مرزهای بیان‌شده، در این مقاله، دسته‌بندی نقاط کار مختلف سیستم بر اساس مرزهای HB و LIDB و در نهایت SNB و LISB، مطابق با شکل (۳) تعریف می‌شود. این دسته‌بندی تقریباً تمام حالات ممکن را که در شکل (۲) نشان داده شده است نمایش می‌دهد. باین‌حال در دسته‌بندی پیشنهادی از مواردی که LIDB پس از HB رخ می‌دهد، صرف نظر شده است. علت این موضوع آن است که عملاً بهره‌برداری از سیستم قدرت پس از وقوع HB، به‌علت ناپایداری نوسانی، پشتوانه منطقی ندارد. بنابراین اطلاع از شرایط سیستم پس از وقوع HB، اطلاعات اضافی در اختیار بهره‌بردار سیستم قرار نمی‌دهد و تنها مشخص می‌کند که ناپایداری سیستم از نوع HB است و صرف اینکه مشخص شود سیستم در شرایط ناپایدار قرار دارد، اهمیت پیدا می‌کند. در نتیجه همه نقاط پس از HB در یک کلاس دسته‌بندی می‌شوند. از سوی دیگر بر اساس دسته‌بندی پیشنهادی در شکل (۳)، در مواردی مانند حالت ۹ که به‌ازای تمام نقاط کار سیستم، HB رخ نمی‌دهد، این نقاط کار در کلاس ۱ یا ۳ دسته‌بندی می‌شوند. به‌عنوان مثال در حالت‌های ۸ و ۷، نقاط کار قبل از LIDB

(جنس ناپایداری) خواهد داشت. نمونه‌هایی از این اقدامات را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- چنانچه به‌ازای بار پیش‌بینی‌شده، نقطه کار سیستم جزء کلاس ۲ بوده، بهره‌برداری از آن اجتناب‌ناپذیر باشد، در این صورت با توجه به اینکه این نقطه کار ناپایدار نوسانی بوده، میرایی سیستم قدرت در آن منفی است. بنابراین اپراتور شبکه با آگاهی از این مسئله، راهکارهایی را که سبب افزایش میرایی سیستم قدرت خواهد شد به‌عنوان یک اقدام پیشگیری‌کننده به شبکه اعمال خواهد کرد. از جمله این راهکارها کاهش ثابت زمانی یا بهره سیستم تحریک ژنراتورهای سیستم است [۱ و ۳].

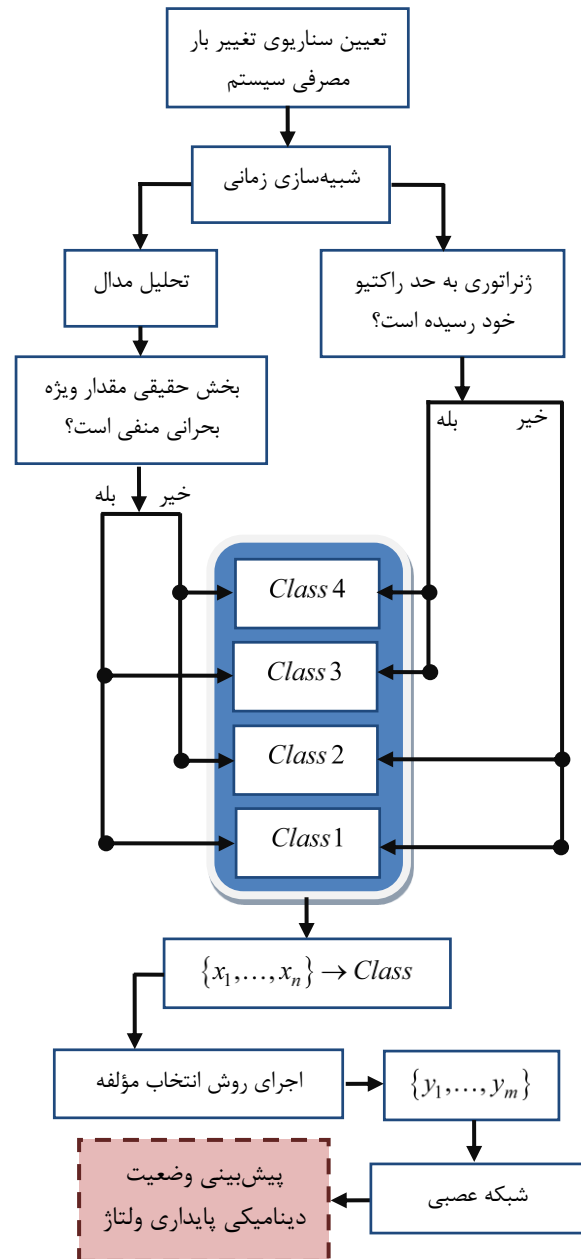
- چنانچه نقطه کار سیستم در کلاس ۳ قرار گرفته باشد، با توجه به اینکه در این نقطه کار حد راکتیو ژنراتورهای سیستم قدرت رخ داده است، اپراتور شبکه با آگاهی از این موضوع، منابع توان راکتیو ذخیره را به‌عنوان یک راهکار پیشگیری‌کننده وارد مدار خواهد کرد. علت اینکه از این راهکار به‌عنوان راهکاری پیشگیری‌کننده یاد می‌شود آن است که وقوع حد راکتیو ژنراتورها سبب می‌شود سیستم سریع‌تر به سمت ناپایداری ولتاژ سوق پیدا کند. بنابراین اضافه‌شدن منابع جبران‌ساز سبب پیشگیری از چنین رخدادی خواهد شد. همچنین توزیع مجدد توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم می‌تواند به‌عنوان یک ابزار در کنترل توان راکتیو ژنراتورها و در نتیجه جلوگیری از وقوع LIB در سیستم قدرت و عواقب ناشی از آن مورد استفاده قرار بگیرد. [۱۱ و ۱۲] در حقیقت، جلوگیری از وقوع LIB علاوه بر ضرورت داشتن از جنبه پایداری، به دلیل کاهش استرس روی ژنراتورهای بحرانی اهمیت پیدا می‌کند.

۴- الگوریتم پیش‌بینی پایداری ولتاژ بر اساس

مرزهای HB و LIDB

در شکل (۴)، الگوریتم ایجاد نمونه‌های^۱ مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی، دسته‌بندی نمونه‌های ایجاد شده و نیز زمان انجام روش انتخاب مؤلفه نشان داده شده است. با توجه به این شکل، پس از تعریف سناریوی تغییر بار که با استفاده از اطلاعات پیش‌بینی بار صورت می‌گیرد،

- در شرایطی که حد راکتیو منابع توان راکتیو سیستم قبل از وقوع HB رخ دهد و تمام نقاط کار سیستم پس از HB باشند، این نقاط متناظر با کلاس ۴ هستند.



شکل ۴: الگوریتم پیشنهادی به منظور پیش‌بینی رفتار سیستم قدرت از دید مرزهای HB و LIDB

آگاهی از اینکه هر کدام از نقاط کار سیستم قدرت در چه دسته‌ای از چهار گروه بیان شده قرار می‌گیرند، نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌های اپراتور شبکه به منظور بهره‌برداری بهتر از سیستم قدرت و تشخیص علل ضعف و منشأ ناپایداری

^۱ Samples

می‌گیرد و در نهایت با استفاده از نمونه‌های تست، عملکرد شبکه عصبی مورد آزمایش قرار خواهد گرفت. شایان ذکر است در فرآیند آموزش شبکه عصبی، نمونه‌های تست رؤیت‌ناپذیر بوده، در نتیجه، فرآیند آموزش با استفاده از نمونه‌های آموزش صورت می‌گیرد.

شبکه عصبی استفاده‌شده در این مقاله، PNN^۵ است که در مطالعات دسته‌بندی اطلاعات، قابلیت‌های بالایی دارد. [۸] شکل (۵)، ساختار این شبکه را نشان می‌دهد. در این شکل، NS تعداد نمونه‌های آموزش و NC تعداد کلاس‌های تعریف‌شده است که در این مقاله، NC = 4 به منظور پیش‌بینی وضعیت پایداری ولتاژ، رابطه میان Z امین نمونه آموزش و خروجی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$[y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jm}, z_j] \quad 1 \leq j \leq NS \quad (۴)$$

در رابطه فوق، m تعداد مؤلفه‌های انتخاب‌شده پس از اجرای روش انتخاب مؤلفه است ($m < n$). همچنین در شکل (۵)، W_{ji} بیانگر وزن میان هر نرون لایه ورودی و نرون لایه پنهان و W_{ji} بیانگر وزن میان هر نرون لایه پنهان و نرون لایه الگو^۶ است. جزئیات شبکه عصبی PNN در [۸] قابل دسترسی است.

۵- نتایج عددی

در این مقاله، الگوریتم اشاره‌شده در شکل (۴)، بر روی سیستم‌های تست ۳۹ باسه و ۶۸ باسه IEEE که به طور مرسوم در مطالعات پایداری ولتاژ استفاده می‌شوند [۱، ۳، ۸] بررسی خواهد شد. سیستم ۳۹ باسه IEEE، دارای ۱۰ ژنراتور، ۱۹ بار و ۴۶ شاخه (شامل خط انتقال و ترانسفورماتور) است. [۲۰] بنابراین با توجه به رابطه (۳)، این سیستم دارای ۹۷ مؤلفه است. همچنین با توجه به اینکه سیستم ۶۸ باسه IEEE، دارای ۱۶ ژنراتور، ۳۵ بار و ۸۳ شاخه (شامل خط انتقال و ترانسفورماتور) است [۲۰]، تعداد مؤلفه‌های آن ۱۷۰ است.

در مطالعات صورت‌گرفته، مدل بارهای سیستم تست ۳۹ باسه به صورت بارهای ترکیبی استاتیکی شامل توان ثابت (P)، جریان ثابت (I) و امپدانس ثابت (Z) در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، جزئیات این تقسیم‌بندی نشان داده

شبهه‌سازی حوزه زمان انجام شده، در پایان این شبهه‌سازی، دو تحلیل شامل موارد زیر صورت می‌گیرد؛

- تحلیل مدال؛ بررسی وضعیت مقدار ویژه بحرانی سیستم. اگر قسمت حقیقی مقدار ویژه بحرانی منفی باشد، سیستم پایدار و در غیر این صورت ناپایدار خواهد بود.

- تحلیل توان راکتیو؛ بررسی وضعیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها.

در نهایت بر پایه خروجی این تحلیل‌ها، دسته‌بندی نقاط کار سیستم بر اساس چهار کلاس تعریف‌شده، صورت می‌گیرد. گفتنی است نمونه‌های مورد نیاز در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار [18] DiGSILENT ایجاد شده است. هر نمونه ایجاد شده، شامل مجموعه‌ای از مؤلفه‌هاست که در این مقاله مؤلفه‌های^۱ استفاده‌شده مطابق با رابطه (۳) تعریف می‌شوند.

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] = [V, P_L, Q_L, P_G, Q_G] \quad (۳)$$

در رابطه فوق، V ولتاژ تمام باس‌های سیستم، P_L و Q_L به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بارهای سیستم است. همچنین P_G و Q_G به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورها است.

استفاده از تمامی مؤلفه‌ها، سبب افزایش مدت زمان آموزش شبکه عصبی شده، همچنین در سیستم‌های بزرگ، احتمال افزایش خطای پیش‌بینی شبکه عصبی افزایش پیدا می‌کند. به همین علت، امروزه استفاده از روش‌های انتخاب مؤلفه کاربرد گسترده‌ای در مطالعات مبتنی بر شبکه عصبی پیدا کرده است. [۸] بنابراین به منظور انتخاب بهترین مؤلفه‌ها، کاهش زمان آموزش شبکه عصبی و افزایش دقت آن، از روش انتخاب مؤلفه دومرحله‌ای با عنوان MIMI^۲ در این مقاله استفاده خواهد شد. جزئیات این روش در [۱۹] بیان شده است. بدین منظور نمونه‌های ایجاد شده برای هر سیستم تست، به دو گروه شامل نمونه‌های آموزش^۳ و نمونه‌های تست^۴ تقسیم می‌شوند. در مرحله بعد، روش انتخاب مؤلفه بر روی نمونه‌های آموزش اجرا شده، در نتیجه مؤلفه‌های بهینه و مناسب $\{x_1, \dots, x_n\} \subset \{y_1, \dots, y_m\}$ انتخاب می‌شوند. پس از تعیین مؤلفه‌های بهینه، فرآیند آموزش شبکه عصبی با استفاده از نمونه‌های آموزش صورت

^۴ Test Samples

^۵ Probabilistic Neural Network

^۶ Pattern Layer

^۱ Features

^۲ Mutual Information-Mutual Information

^۳ Train Samples

فیلترینگ مرحله اول $3/129 = 31 \div 97$ و مرحله دوم $2/0667 = 15 \div 31$ است.

مرحله اول روش انتخاب مؤلفه MIMI، همبستگی میان مؤلفه‌های کاندید اولیه سیستم و مؤلفه هدف (که در اینجا دارای ۴ کلاس ۱ تا ۴ است) را به‌ازای مقدار Th_1 بررسی می‌کند. اگر همبستگی هر مؤلفه به ستون هدف بیشتر از مقدار Th_1 باشد، آن مؤلفه انتخاب شده، به مرحله بعد منتقل می‌شود. بنابراین مؤلفه‌های بیان‌شده در جدول ۲ نسبت به مؤلفه هدف دارای همبستگی بیش از $Th_1 = 0.55$ هستند. همچنین در مرحله دوم روش انتخاب مؤلفه پیشنهادی، همبستگی میان مؤلفه‌های انتخاب‌شده از مرحله اول بر اساس مقدار Th_2 بررسی می‌شود. اگر همبستگی میان هر دو مؤلفه بیشتر از مقدار Th_2 باشد، هر دو مؤلفه حذف شده، در غیر این صورت مؤلفه‌ای که در رتبه بالاتری قرار داشته باشد، انتخاب و به مرحله بعد منتقل می‌شود. بنابراین مؤلفه‌های بیان‌شده در جدول ۳ مؤلفه‌هایی هستند که نسبت به مؤلفه‌های دیگر دارای همبستگی کمتر از $Th_1 = 0.42$ هستند.

در جدول ۴، خطای اعتبارسنجی و تست شبکه عصبی به‌ازای نتایج به‌دست‌آمده از جداول ۲ و ۳، بیان شده است. با توجه به این نتایج، ملاحظه می‌شود که PNN با خطای صفر، دسته‌بندی نقاط کار سیستم را انجام داده است.

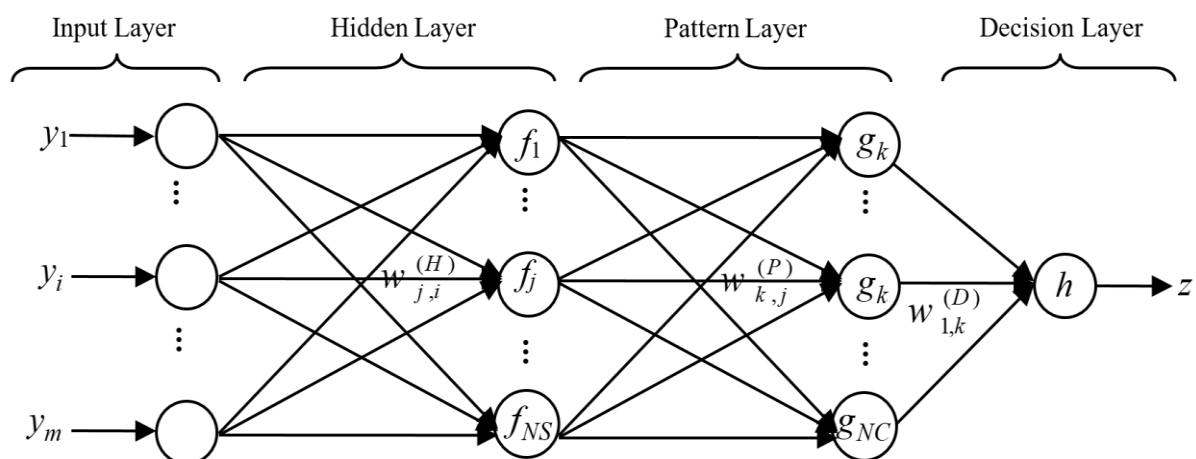
شده است. به‌عنوان مثال، بار ۳، ۵۰٪ توان ثابت و ۵۰٪ جریان ثابت و بار باس ۴، ۱۰۰٪ توان ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین تمام بارهای سیستم تست ۶۸ باسه و توان ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

در این مطالعات، تعداد نمونه‌های ایجادشده برای هر کدام از سیستم‌های تست ۳۹ باسه و ۶۸ باسه IEEE، ۴۸۰ نمونه است که به دو گروه شامل ۴۲۰ نمونه آموزش و ۶۰ نمونه تست دسته‌بندی شده است.

همچنین نمونه‌های آموزش به دو گروه شامل ۳۸۰ نمونه آموزش و ۴۰ نمونه اعتبارسنجی^۱ تقسیم‌بندی می‌شوند. درحقیقت به‌منظور آموزش بهتر شبکه عصبی، ابتدا با استفاده از نمونه‌های اعتبارسنجی، تست اولیه شبکه عصبی انجام می‌شود. در ادامه چنانچه خطای اعتبارسنجی صفر باشد (در ایدئال‌ترین حالت)، شبکه عصبی آماده تست نهایی است.

۵-۱- سیستم تست ۳۹ باسه IEEE

در جدول ۲، مؤلفه‌های انتخاب‌شده از مرحله اول روش انتخاب مؤلفه MIMI به‌ازای $Th_1 = 0.55$ و در جدول ۳، مؤلفه‌های انتخاب‌شده از مرحله دوم روش انتخاب مؤلفه MIMI به‌ازای $Th_2 = 0.42$ برای سیستم تست ۳۹ باسه IEEE، بیان شده است. با توجه به این نتایج، نسبت



شکل ۵: ساختار شبکه عصبی PNN

^۱ Validation

جدول ۱: درصد ترکیب بارهای سیستم تست ۳۹ باسه IEEE

نوع بار			باس	نوع بار			باس
Z	I	P		Z	I	P	
50	50	0	23	0	50	50	3
0	0	100	24	0	0	100	4
0	0	100	25	100	0	0	7
100	0	0	26	0	0	100	8
0	0	100	27	0	100	0	12
0	0	100	28	0	0	100	15
0	0	100	29	100	0	0	16
33.33	33.33	33.33	31	0	100	0	18
0	0	100	39	50	0	50	20
---			--	0	0	100	21

۵-۲- سیستم تست ۶۸ باسه IEEE

در جدول ۵، مؤلفه‌های نهایی به‌دست‌آمده از روش انتخاب مؤلفه MIMI برای سیستم تست ۶۸ باسه IEEE، بیان شده است. باتوجه‌به رابطه (۳)، سیستم تست ۶۸ باسه IEEE دارای ۱۷۰ مؤلفه شامل ۶۸ مؤلفه ولتاژ، ۱۶ مؤلفه توان اکتیو و ۱۶ مؤلفه توان راکتیو ژنراتورها و ۳۵ مؤلفه توان اکتیو و ۳۵ مؤلفه توان راکتیو بارهای سیستم است. همچنین مانند سیستم تست ۳۹ باسه، تعداد نمونه‌های در نظر گرفته‌شده برای هرکدام از نمونه‌های آموزش، اعتبارسنجی و تست به ترتیب ۳۸۰، ۴۰ و ۶۰ نمونه است. در جدول ۶، خطای اعتبارسنجی و تست شبکه عصبی PNN به‌زای نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۵، بیان شده است. باتوجه‌به این نتایج، ملاحظه می‌شود PNN با خطای صفر، دسته‌بندی نقاط کار سیستم را انجام داده است. همچنین ملاحظه می‌شود نسبت فیلترینگ در مرحله اول اجرای روش MIMI، $1/976 = 170 \div 86$ و مرحله دوم $1/954 = 86 \div 44$ است. با مقایسه نسبت فیلترینگ سیستم‌های تست ۶۸ باسه و ۳۹ باسه، می‌بینیم که با بزرگ‌تر شدن سیستم، این نسبت کاهش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر برای دستیابی به خطای کمتر در سیستم‌های بزرگ‌تر، تعداد مؤلفه‌های بیشتری مورد نیاز است.

جدول ۲: مؤلفه‌های انتخاب‌شده از مرحله اول روش MIMI برای سیستم تست ۳۹ باسه IEEE

Q_{L7}	P_{L7}	Q_{L12}	V_7
Q_{G31}	P_{L15}	P_{L21}	Q_{L15}
V_{22}	V_8	Q_{L21}	V_6
V_5	P_{L23}	V_{21}	V_{28}
P_{L18}	Q_{L23}	V_{12}	Q_{G32}
V_{11}	V_{29}	V_{19}	V_{23}
V_{10}	V_1	V_{25}	V_{15}
V_{20}	V_{13}	P_{G38}	----

جدول ۳: مؤلفه‌های انتخاب‌شده از مرحله دوم روش MIMI برای سیستم تست ۳۹ باسه IEEE

Q_{L7}	Q_{L12}	P_{L15}	P_{L21}	V_{22}
V_8	P_{L23}	V_{28}	P_{L18}	V_{12}
Q_{G32}	V_{19}	V_1	V_{15}	P_{G38}

جدول ۴: خطای اعتبارسنجی و تست PNN برای سیستم تست ۳۹ باسه IEEE

تعداد مؤلفه‌های مرحله ۲	تعداد مؤلفه‌های مرحله ۱	Th_1	Th_2	پارامتر PNN
15	31	0.55	0.42	0.018
خطای تست 0 of 60		خطای اعتبارسنجی 0 of 40		

جدول ۵: مؤلفه‌های انتخاب‌شده از روش MIMI برای سیستم تست ۶۸ باسه IEEE

$PL7$	$PL20$	$PL24$	$PL26$	$PL27$	$QL2$	$PL36$	$PL23$
$QG56$	$PL33$	$PL1$	$V24$	$PL18$	$V7$	$QG53$	$PL4$
$PL40$	$QG60$	$V5$	$V1$	$PL15$	$V15$	$V23$	$V27$
$QG61$	$PL3$	$QG64$	$V17$	$V18$	$V4$	$PL45$	$QL16$
$V26$	$V28$	$PL37$	$PL29$	$V35$	$V19$	$V3$	$PL41$
$V20$	$PL25$	$PL46$	$V41$	----	----	----	----

جدول ۶: خطای اعتبارسنجی و تست PNN برای سیستم تست ۶۸ باسه IEEE

تعداد مؤلفه‌های مرحله ۲	تعداد مؤلفه‌های مرحله ۱	Th_1	Th_2	پارامتر PNN
86	44	0.6	0.28	0.016
خطای تست 0 of 60		خطای اعتبارسنجی 0 of 40		

۶- جمع‌بندی

در این مقاله، باتوجه به اهمیت مرزهای HB و LIB در سیستم قدرت و تأثیر وقوع این مرزها بر شرایط بهره‌برداری از سیستم قدرت و در نتیجه اعمال روش‌های جبران‌سازی مانند روش‌های پیشگیری‌کننده و اصلاح‌کننده، یک دسته‌بندی جدید برای نقاط کار سیستم قدرت ارائه شد. بر این اساس، نقاط کار سیستم قدرت به چهار دسته تقسیم‌بندی شد. در ادامه به منظور پیش‌بینی به‌هنگام نقطه بهره‌برداری سیستم بر اساس دسته‌بندی بیان‌شده، ترکیب روش انتخاب مؤلفه دو مرحله‌ای MIMI و شبکه عصبی PNN ارائه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد روش ترکیبی پیشنهادی، به‌خوبی قابلیت دسته‌بندی اطلاعات نقاط کار سیستم را داراست.

۷- مراجع

- [1] Amjady, N., Ansari, M. R. "Small Disturbance Voltage Stability Assessment of Power Systems by Modal Analysis and Dynamic Simulation", *Int. J. of Energy Conversion and Management (ECM)*, Vol. 49 (10), 2008, pp. 2629-2641.
- [2] Mithulananthan, N., Canizares, C. "Effect of Static Load Models on Hopf Bifurcation Point and Critical Modes of Power Systems", *Thammasat Int.J.SC. Tech*, Vol. 9 (4), 2004, pp. 69-76.
- [3] Amjady, N., Velayati, M. H. "Evaluation of Hopf Bifurcation Considering the Effect of Load Models and Excitation System Parameters", *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Vol. 6 (5), 2011, pp. 2419-2427.
- [4] Amjady, N., Velayati, M. H. "Evaluation of the Maximum Loadability Point of Power Systems Considering the Effect of Static Load Models", *Int. J. of Energy Conversion and Management (ECM)*, Vol. 50 (12), 2009, pp. 3202-3210.
- [5] Avalos, R. J., Canizares, C., Milano, F., Conejo, A. J. "Equivalency of Continuation and Optimization Methods to Determine Saddle-node and Limit-induced Bifurcations in Power Systems", *IEEE Trans. Circuits and Systems-I: Regular Paper.*, Vol. 56 (1), 2009, pp. 210-223.
- [6] Echavarren, F. M., Lobato, E., Rouco, L. "Steady-State Analysis of the Effect of Reactive Generation Limits in Voltage Stability", *Electric Power Systems Research (EPSR)*, Vol. 79 (9), 2009, pp.1292-1299.
- [7] Li, S. H., Chiang, H. D. "Impact of Generator Reactive Reserve on Structure-induced Bifurcation", *IEEE*, 2009, pp. 1-5.
- [8] Amjady, N., Velayati, M. H. "Dynamic Voltage Stability Prediction of Power Systems by a New Feature Selection Technique and Probabilistic Neural Network", *Euro. Trans. Electr. Power (ETEP)*, Vol. 21 (1), 2011, pp. 312-328.
- [9] Lerm, A. P. "Control of Hopf Bifurcation in MultiArea Power Systems via a Secondary Voltage.Regulation Scheme", *IEEE*, 2002.
- [10] Yang, C. F., Lai, G. G., Lee, C. H., Su, C. T., Chang, G. W. "Optimal Setting of Reactive Compensation Devices with an Improved Voltage Stability Index for Voltage Stability Enhancement", *Electrical Power and Energy Systems (EPES)*, Vol. 37 (1), 2012, pp. 50-57.
- [11] Raoufi, H., Kalantar, M. "Reactive Power Rescheduling with Generator Ranking for Voltage Stability Improvement", *Energy Conversion and Management (ECM)*, Vol. 50 (4), 2009, pp. 1129-1135.
- [12] Kargarian, A., Raoofat, M., Mohammadi, M. "Reactive Power Market Management Considering Voltage Control Area Reserve and System Security", *Applied Energy*, Vol. 88 (11), 2011, pp. 3832-3840.
- [13] Amjady, N. "Short-Term Bus Load Forecasting of Power Systems by a New Hybrid Method", *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 22 (1), 2007, pp. 333-341.
- [15] Nizam, M. Mohamed., A. Al-Dabbagh, M., Hussain, A. "Using Support Vector Machine for Prediction Dynamic Voltage Collapse in an Actual Power System", *Proceedings of world academy of science, engineering and technology*, Vol. 31 (1), 2008, pp. 711-716.
- [16] Kamalasadana, S., Thukaram, D., Srivastava, A. K. "A New Intelligent Algorithm for Online Voltage Stability Assessment and Monitoring", *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 31 (2-3), 2009, pp. 100-110.
- [17] Chakrabarti, S. "Voltage Stability Monitoring by Artificial Neural Network Using a Regression-based Feature Selection Method", *Expert Systems with Applications*, Vol. 35 (4), 2008, pp. 1802-1808.
- [18] DIGSILENT User Manual Toolbox, Available: [http:// www.digsilent.de/](http://www.digsilent.de/).
- [19] Amjady, N., Keynia, F. "Day-Ahead Price Forecasting of Electricity Markets by Mutual Information Technique and Cascaded Neuro-Evolutionary Algorithm", *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 24, 2009, pp. 306-318.
- [20] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.