کاربرد روش جدید برای حل مسئله پخش بار در سیستم‌های قدرت با نسبت بالای R/X

عبدالرضا ربیعی[۱]، استادیار

۱- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد- شهرکرد- ایران- rabiee@eng.sku.ac.ir

چکیده: در یک سیستم قدرت مقدار راکتانس خط، عموماً بیش‌تر از مقدار مقاومت خط می‌باشد و درنتیجه روش‌هایی همچون روش نیوتن رافسون استاندارد و روش‌های مبتنی بر نیوتن رافسون، به‌راحتی در این سیستم‌ها همگرا می‌شوند. اما در حالت استفاده از جبران‌سازی سری همانند استفاده از خازن سری، میزان راکتانس خط کاهش پیدا می‌کند و درنتیجه نسبت R/X خط انتقال افزایش می‌یابد که در این حالت شرایط سیستم تغییر کرده و روش‌های مبتنی بر نیوتون رافسون استاندارد، یا دارای همگرایی با سرعت کم (تعداد تکرار بالا) و یا به‌کلی واگرا می‌شوند. درواقع با کم شدن مقدار راکتانس خط،اصطلاحاً عدد شرایط سیستم (نسبت بیش‌ترین مقدار ویژه به کمترین مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین) افزایش یافته و روش نیوتون رافسون استاندارد در این سیستم همگرا نمی‌شود. در این مقاله از کاربرد یک روش جدید مبتنی بر تکرار برای حل سیستم‌های با نسبت R/X بالا ارائه شده است. مزیت این روش ارائه شده این است که مستقل از نسبت R/X، در کلیه سیستم‌ها با تعداد تکرار کم، همگرا می‌شود. روش پیشنهادی روی شبکه‌های تست ۹، ۳۰ و ۱۱۸ باس IEEE همچنین ۱۱ و ۲۳۸۳ باس شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان از دقت بالا و کارایی روش ارائه شده در حل مسائل پخش بار سیستم‌های قدرت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پخش بار نیوتن رافسون، عدد شرایط سیستم، نسبت R/X خط، ماتریس ژاکوبین

Application of new Method to Solve Load Flow Problem in Power Systems with High Ratio of R/X

A. Rabiee[1], Assistant Professor

1- Faculty of Engineering and Technology, Shahrekord University (SKU), Shahrekord, Iran, Email: rabiee@eng.sku.ac.ir

Abstract: In the power system, usually the reactance of transmission line is greater than its resistance and thereby power flow algorithms such as Newton Raphson methods and newton based methods can easily converged. However, in the case of series compensation such as series capacitor, the reactance of transmission line is decreased and accordingly the ratio of R/X is increased. In such case system condition is changed and therefore Newton based power flow methods will converged hardly or even diverged. In fact, with increase of R/X ratio, conventionally the system condition number (the ratio of maximum to minimum eigenvalue of Jacobian matrix) is increased and Newton Raphson method is not converged. In this paper, a new iterative based method is present to solve power flow of system with high ratio of R/X. The main advantage of the proposed method is its independence to R/X ratio and will converged even for system with high ratio of R/X. The suggested method is studied based on IEEE 9-bus, 30-bus and 118-bus also 11-bus and 2383-bus test systems. The obtained results show the effectiveness and accuracy of the proposed method in solving power flow problem of power systems, independent to R/X ratio.

Keywords: Newton Raphson load flow, Condition number of system, R/X ratio of line, Jacobian matrix.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۳
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۱

نام نویسنده مسئول: عبدالرضا ربیعی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - شهرکرد - بلوار رهبر - دانشگاه شهرکرد- دانشکده فنی مهندسی .

۱- مقدمه

پخش‌بار در سیستم‌های قدرت یک ابزار بسیار مهم و کارا برای به‌دست‌آوردن کلیه متغیرهای سیستم قدرت مثل ولتاژ تمامی باس‌ها، توان اکتیو و توان راکتیو و جریان بین باس‌ها در حالت ماندگار می‌باشد. تاکنون روش‌های متعددی برای حل مسئله پخش بار در سیستم‌های قدرت توسط مقالات مختلف پیشنهاد شده است که عموماً این روش‌ها به دو دسته کلی روش‌های تحلیلی و روش‌های غیرتحلیلی تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از روش‌های تحلیلی برای حل معادلات جبری غیرخطی، روش گوس سایدل است که یک الگوریتم مبتنی بر تکرار می‌باشد. در این روش ابتدا باید معادله هر متغیر را بر حسب دیگر متغیرها به‌دست آورد. همچنین در این روش حصول همگرایی و سرعت این روش به تخمین اولیه بستگی زیادی دارد [۱]. روش نیوتن رافسون [۲] که یک روش بسیار کارا و مفید و همچنین دارای سرعت و دقت بسیار بالا در سیستم‌های قدرت است. عیب اصلی این روش، حجم محاسبات بالا به خاطر محاسبات مربوط به ماتریس ژاکوبین و عدم همگرایی در سیستم‌های با نسبت R/X بالا می‌باشد[۶-۳]. برای افزایش سرعت همگرایی در سیستم‌های قدرت عموماً از روش‌های مشتق شده از روش نیوتن رافسون استفاده می‌شود که این روش‌ها شامل روش‌های مجزا [۷] و مجزای سریع [۸] می‌باشند. دقت محاسبات در روش‌های مجزا و مجزای سریع پخش بار، در مقایسه با حالت روش نیوتون رافسون استاندارد کمتر است؛ اما، تعیین پاسخ شرایط اضطراری در چند ثانیه با خطای حدود ۵ درصد به پاسخ دقیق در زمان یک یا دو دقیقه، ارجحیت دارد. کارایی این معادلات زمانی خودش را نشان می‌دهد که نسبت R/X خطوط زیاد باشد. در روش مجزای سریع علاوه بر آن‌چه در روش مجزا معتبر است، با افزایش تقریب محاسبات در هر تکرار، سرعت محاسبات را می‌توان افزایش داد. اگر هدف از انجام پخش بار، تعیین مقدار تقریبی توان اکتیو خطوط باشد، خصوصاً هنگامی‌که لازم باشد این مقادیر بسیار سریع تعیین شوند، از روش DC استفاده می‌شود [۹]. یکی دیگر از روش‌های حل مسئله پخش بار در سیستم‌های قدرت، روش گرادیان است که از نظر محاسبات، کاملاً شبیه روش نیوتن رافسون می‌باشد، با این تفاوت که در هر مرحله، برخی اجزاء باید محاسبه شوند. در این روش ماتریسی شبیه ماتریس ژاکوبین وجود دارد، ولی عناصر ان با عناصر ماتریس ژاکوبین کاملاً متفاوت می‌باشند. این روش یکی از قدیمی‌ترین روش‌های پخش بار می‌باشد و به دلیل حجم محاسبات بالا، به‌طورکلی این روش منسوخ شده و استفاده نمی‌گردد [۱۰].

زمانی که بار سیستم زیاد باشد و یا نسبت R/X خط زیاد باشد، استفاده از روش نیوتن رافسون استاندارد، مشکلاتی ازجمله عدم همگرایی را به دنبال دارد. پس باید به دنبال روش‌هایی بود که محدودیت‌های کم‌تری داشته‌باشد. یکی از این روش‌ها، الگوریتم ژنتیک است. در این روش نیازی به محاسبات ژاکوبین نیست. همچنین این الگوریتم برای شرایط چندحالته نیز جواب‌گو است. برای مدل کردن ولتاژ هر شین از مدل کروموزوم استفاده می‌شود [۱۱]. در سال ۲۰۱۲ یک روشی تحت عنوان روش مرکب پیشنهاد شد که در این روش هم از پخش توان AC وهم از پخش توان DC استفاده می‌شود. دلیل استفاده هم‌زمان از هر دو روش به دو دلیل عمده می‌باشد: از پخش بار AC به‌منظور رسیدن به‌دقت مورد نیاز و از پخش بار DC برای سرعت‌بالا استفاده می‌شود. در این روش سیستم به سه زیر بخش تقسیم می‌شود. از مزایای این روش نسبت به روش نیوتن رافسون می‌توان به دو مورد زیر اشاره کرد:

- سرعت‌بالا به دلیل استفاده از پخش توان DC
- دقت بالا به دلیل استفاده از پخش توان AC [۱۲].

یکی دیگر از روش‌های غیرتحلیلی برای مدل‌سازی عدم قطعیت برخی پارامترهای معادلات پخش بار در سیستم‌های قدرت، روش منطق فازی می‌باشد که برای رسیدن به نتیجه قابل اطمینان در زمان کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. عیب اصلی همه روش‌های پیشرفته پخش توان، زمان بسیار زیاد مورد استفاده برای محاسبات می‌باشد. این روش‌ها هنگامی‌که شبکه‌هایی با ابعاد وسیع وجود دارد عمدتاً ناکارآمد می‌باشند زیرا نیازمند محاسبات زیاد و نیز حافظه زیادی می‌شوند. اساساً منطق فازی در مسئله پخش بار دکوپله FDLF انجام می‌شود. در روش پخش بار با منطق فازی FLF نیاز به پاسخ تکراری مجموعه معادلات پخش بار از طریق کنترل منطق فازی، به‌جای به‌کاربردن روش نیوتن رافسون کلاسیک، می‌باشد [۱۳].

در سال ۲۰۱۴ یک روش تحلیلی تحت عنوان روش هموتوپی برای حل پخش بار در سیستم‌های قدرت ارائه شد که این روش اساس کارش یک روش ترسیمی برای نمایش همگرایی می‌باشد[۱۵,۱۴].

روش هموتوپی یک روش مبتنی بر الگوریتم‌های پیوستگی می‌باشد و درواقع یک روش ترسیمی با یک نقطه شروع می‌باشد و در این روش به‌هیچ‌وجه از ماتریس ژاکوبین استفاده نمی‌شود. همچنین این روش مبتنی بر تکرار نیست. اما در روش نیوتن رافسون از ماتریس ژاکوبین استفاده می‌شود و مبتنی بر تکرار می‌باشد.

در سال ۲۰۱۵ یک روش جدید مبتنی بر تقریب معادلات با عنوان روش هولومورفیک برای حل معادلات پخش بار ارائه شده است [۱۶]. مقاله ارائه شده در مرجع [۱۷]، یک مقاله در مورد حل سیستم‌های قدرت در شبکه‌های با شرایط بد[1] می‌باشد. شرایط بد حالتی است که در آن عدد شرایط سیستم بسیار بزرگ است (حدود ده هزار) و درواقع مقادیر ویژه نزدیک به صفر دارد و به همین دو سطر یا دو ستون کاملاً شبیه هم در ماتریس ژاکوبین به وجود می‌آید که مرتبه سیستم ناکامل و دترمینان ماتریس ژاکوبین نزدیک صفر خواهد شد و وارون‌پذیری ماتریس بسیار سخت و برخی مواقع غیرممکن خواهد بود که این موضوع باعث مشکل همگرایی روش نیوتون رافسون خواهد شد. در مقاله [۱۷] از عدد شرایط سیستم برای تشخصی نوع سیستم استفاده شده است. شایان ذکر است که در این مقاله نیز از عدد شرایط سیستم استفاده خواهد شد.

روش‌هایی همچون نیوتن رافسون، گوس سایدل، گرادیان، هموتوپی و روش هولومورفیک، دارای مبنای ریاضی بوده، اما در سیستم‌های قدرت استفاده می‌گردد. در این مقاله، از کاربرد روش ریاضی ارائه شده در [۱۸]، برای حل مسئله پخش‌توان در سیستم قدرت، به‌عنوان روشی جدید، استفاده شده است.

مقاله کارایی روش پخش بار همواره زمانی خود را نشان می‌دهد که این روش برای تمامی حالات سیستم قدرت چه در شرایط نرمال و چه در شرایط غیر نرمال جواب‌گو باشد. ازجمله حالاتی که شرایط یک سیستم را غیرنرمال می‌کند، کاهش راکتانس خطوط می‌باشد. راکتانس خطوط انتقال همواره با جبران‌سازی سری با خازن،کاهش می‌یابد. با کم شدن مقدار راکتانس خط،نسبت R/X خطوط زیادشده و اکثر روش‌های جبری مثل نیوتن رافسون استاندارد، دچار عدم همگرایی می‌شوند. در این مقاله یک روش تحلیلی مبتنی بر تکرار، ارائه شده است. در این روش از یک فاکتور مهم به نام فاکتور همگرایی λ_k استفاده می‌شود. استفاده از این فاکتور باعث شده است که در هر تکرار علاوه بر ماتریس ژاکوبین، از یک ماتریس دیگر نیز استفاده شده که این کار باعث بهبود در وارون‌پذیری ماتریس ژاکوبین و درنتیجه بهبود همگرایی پخش بار شده است.

انتخاب فاکتور همگرایی (λ_k) بر اساس نرم ماتریس باقی‌مانده توان[۱] عمل می‌کند. مزیت دیگر روش پیشنهادی این است که علاوه بر همگرایی در تمامی حالات سیستم، نسبت به روش نیوتن رافسون استاندارد که در حالت R/X بالا، واگرا شده و یا دارای همگرایی ضعیفی می‌باشد، دارای مدت زمان همگرایی کم‌تر و نیز تعداد تکرار کم‌تر برای رسیدن به همگرایی می‌باشد. در روش نیوتن رافسون استاندارد، به دلیل عدم همگرایی یا همگرایی ضعیف، مدت زمان محاسبات بسیار زیاد می‌باشد. عموماً در روش جدید مستقل از نسبت میزان R/X دارای تکرار کم برای رسیدن به همگرایی بوده که درنتیجه زمان رسیدن به همگرایی پایین می‌باشد.

در بخش دوم مقاله به بررسی مفاهیم اولیه پخش بار در سیستم‌های قدرت و معادلات اصلی حل مسئله پخش بار با روش نیوتن رافسون پرداخته شده است. در بخش سوم این مقاله عدد شرایط سیستم که به‌عنوان یک معیاری برای تشخیص نوع سیستم می‌باشد، بیان شده است. همچنین محدوده مورد نیاز برای اینکه سیستم با روش نیوتن رافسون همگرایی داشته باشد به‌صورت یک رابطه جامع بیان شده است. بخش چهارم مقاله به بیان ریاضی روش پیشنهادی می‌پردازد.

روش پیشنهادی روی سه سیستم ۹، ۳۰ و ۱۱۸ گره‌ای استاندارد IEEE و همچنین ۱۱ و ۲۳۸۳ باس پیاده‌سازی و نتایج تحلیل شده است.

۲- مفاهیم پخش بار در سیستم قدرت

یکی از روش‌های مبتنی بر تکرار برای حل مسئله پخش توان، روش نیوتن رافسون می‌باشد. اگر تعداد کل شین‌ها برابر n و تعداد کل شین‌های کنترل‌شده (PV) برابر m باشد و قدرت اکتیو برنامه‌ریزی شده در هر شین (PQ) برابر مقدار $\boldsymbol{P_k^{sch}}$ و قدرت راکتیو برنامه‌ریزی‌شده در هر شین (PQ) برابر $\boldsymbol{Q_k^{sch}}$ باشد و اگر شین مرجع کنار گذاشته شود تعداد مجهولات کل برابر (2n-m-1) می‌باشد. معادلات اصلی برای حل به‌صورت (۱) و (۲) می‌باشند[۱و۱۹] .

$$P_k = |V_k| \sum_{j=1}^{n} |Y_{kj}|\, |V_j| \cos(\delta_k - \delta_j - \varphi_{kj}) \quad (۱)$$

$$Q_k = |V_k| \sum_{j=1}^{n} |Y_{kj}|\, |V_j| \sin(\delta_k - \delta_j - \varphi_{kj}) \quad (۲)$$

در هر تکرار بر حسب مقادیر حدس‌های اولیه و یا آخرین مقادیر موجود، اندازه ولتاژها و زاویه ولتاژها، قدرت‌های اکتیو و راکتیو را از معادلات (۱) و (۲) به‌دست می‌آید. در صورتی همگرائی حاصل می‌شود که این مقادیر محاسبه شده با مقادیر برنامه‌ریزی‌شده P_k^{sch} و Q_k^{sch} برای هر شین برابر باشد.

$$\Delta P_k = P_k^{sch} - P_k = 0 \quad (۳)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{sch} - Q_k = 0 \quad (۴)$$

با توجه به اینکه در این روش از مشتقات جزئی استفاده می‌شود، شکل فشرده معادلات پخش توان به‌صورت معادله (۵) می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (۵)$$

برای تعیین عناصر ماتریس ژاکوبین از روابط (۹)-(۶) استفاده می‌شود.

$$H_{kj} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_j} \quad (۶)$$

$$N_{kj} = \frac{\partial P_k}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (۷)$$

$$J_{kj} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_j} \quad (۸)$$

$$L_{kj} = \frac{\partial Q_k}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (۹)$$

با انجام محاسبات روی عناصر ماتریس ژاکوبین

$$H_{kk} = -Q_k - |V_k|^2 B_k \quad (۱۰)$$

$$N_{kk} = P_k + |V_k|^2 G_k \quad (۱۱)$$

$$J_{kk} = P_k - |V_k|^2 G_k \quad (۱۲)$$

$$L_{kk} = Q_k - |V_k|^2 B_k \quad (۱۳)$$

در مسئله پخش توان معادلات (۱۴) و (۱۵) در حین حل مسئله در نظر گرفته خواهد شد.

$$Q_{k,min} \le Q_k \le Q_{k,max} \quad (۱۴)$$

$$V_{k,min} \le V_k \le V_{k,max} \quad (۱۵)$$

عدد شرایط سیستم قدرت در یک سیستم قدرت برای این‌که مشخص شود یک سیستم از نظر همگرایی دارای شرایط نرمال یا شرایط غیرنرمال می‌باشد. یکی از معیارهای اساسی برای تشخیص شرایط سیستم، معیار عدد شرایط سیستم می‌باشد که به‌صورت (۱۶) خواهد بود [۱۹].

$$CPS = \frac{\eta_{max}}{\eta_{min}} \quad (۱۶)$$

در (۱۶) منظور از η_{max} و η_{min} ماکزیمم و مینیمم مقدار مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین می‌باشد.در یک سیستم قدرت با تقریب خوبی می‌توان تقسیم‌بندی زیر را طبق رابطه (۱۷) انجام داد [۱۹].

$$\begin{cases} if\,\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{X}}\sim 1 & CPS \geq 400 \\ if\quad \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{X}}<1 & CPS<400 \end{cases} \qquad (۱۷)$$

به‌طور معمول در سیستم‌های انتقال مقدار $\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{X}} < 1$ می‌باشد. وقتی مقدار راکتانس خط به دلایلی کاهش پیدا کند مقدار $\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{X}}$ خطوط نزدیک عدد ۱ می‌شود. مقدار راکتانس خطوط انتقال تحت تأثیر جبران‌ساز سری مثل خازن سری کم می‌شود و درنتیجه مقدار $\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{X}}$ خط زیاد شده و عدد شرایط سیستم از رابطه $CPS \geq 400$ پیروی می‌کند.

زمانی که عدد شرایط سیستم به حالت $CPS \geq 400$ تبدیل شود، روش نیوتن رافسون استاندارد و روش‌های مبتنی بر آن در حل مسئله پخش بار واگرا خواهند شد [۱۹].

۳- مبحث ریاضی روش تعمیمی تک‌مرحله‌ای

معادلات قابل حل به فرم ماتریسی به‌صورت (۱۸) می‌باشد.

$$\mathrm{F}(X) = 0 \quad \mathrm{X} = [\mathrm{x1}, \mathrm{x2}, \ldots, \mathrm{Xn}] \qquad (۱۸)$$

در معادله (۱۸) که درواقع یک دستگاه معادلات غیرخطی می‌باشد، شرایط سیستم به‌گونه‌ای است که دترمینان ماتریس ژاکوبین عددی نزدیک به صفر می‌باشد. نزدیک بودن عدد دترمینان ژاکوبین درواقع یعنی زیاد بودن شاخص شرایط سیستم و بزرگ بودن شاخص شرایط سیستم به معنای عدم همگرایی این معادلات در روش نیوتن رافسون استاندارد است. این روش برای این تک‌مرحله‌ای نام دارد که در هر تکرار فقط یک‌بار از پارامتر همگرایی استفاده شده است. منظور از روش تعمیمی و تک‌مرحله‌ای بودن، درواقع تعمیمی بر روش نیوتن رافسون می‌باشد، بدین معنا که روش نیوتن‌رافسون فقط برای سیستم‌های با عدد شرایط سی‌ستم کم (زیر چهارصد) جواب می‌دهد، اما این روش ازآن‌جهت روش تعمیمی می‌باشد که برای سیستم‌های با عدد شرایط سی‌ستم بالا (بزرگ‌تر از چهارصد) هم پاسخگو می‌باشد. منظور از تک‌مرحله‌ای بودن این است که فقط یک‌بار در هر تکرار از پارامتر همگرایی استفاده می‌شود.

برای حل معادلات یک سیستم با عدد CPS بزرگ مراحل زیر برای روش جدید طی می‌گردد[۱۹].

گام اول

انتخاب بردار مقادیر اولیه (X_0) و تشکیل ماتریس ژاکوبین $(\mathcal{J})$

گام دوم

انتخاب مقدار اولیه (λ_k) با توجه به رابطه (۱۹).

$$\lambda_k = \|\mathrm{F}(x)\|^{\mu} \qquad \mu \in \left[1و2\right] \qquad (۱۹)$$

در این رابطه مقدار پارامتر (μ) با توجه به نوع سیستم و ابعاد سیستم انتخاب می‌شود به‌طوری‌که اگر ابعاد سیستم کوچک باشد، مقدار این پارامتر را برابر $(\mu = 1)$، اگر ابعاد سیستم خیلی بزرگ باشد، مقدار این پارامتر برابر $(\mu = 2)$ و برای سیستم‌های متوسط مقدار این پارامتر عددی بین ۱ تا ۲ در نظر گرفته می‌شود.

در این رابطه منظور از $\|\mathrm{F}(x)\|$ نُرم ماتریس $\mathrm{F}(x)$ می‌باشد که عبارت است از مجذور حاصل جمع توان دوم تمامی درایه‌های ماتریس.

گام سوم

با توجه به رابطه (۱۹) و بردار مقادیر اولیه، مقدار بردار اختلاف جواب‌ها، (ψ_k^{LM}) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\psi_k^{LM} = -\left(\mathcal{J}_k^T\mathcal{J}_k + \lambda_k I\right)^{-1}\mathcal{J}_k^T F(x_k) \qquad (۲۰)$$

در کلیه روابط منظور از I ماتریس واحد می‌باشد. در رابطه (۲۰)، از پارامتر همگرایی λ_k جهت رفع مشکل عدم همگرایی روش نیوتن رافسون استفاده شده است. در این رابطه چنانچه مقدار λ_k برابر صفر باشد، آن‌گاه رابطه (۲۰) به رابطه (۲۱) و (۲۲) نهایتاً (۲۳) تبدیل می‌شود

$$\psi_k^{LM} = -\left(\mathcal{J}_k^T\mathcal{J}_k\right)^{-1}\mathcal{J}_k^T F(x_k) \qquad (۲۱)$$

$$\psi_k^{LM} = -{\mathcal{J}_k}^{-1}{\mathcal{J}_k^T}^{-1}\mathcal{J}_k^T F(x_k) \qquad (۲۲)$$

$$\psi_k^{LM} = -{\mathcal{J}_k}^{-1}F(x_k) \qquad (۲۳)$$

همان‌طور در رابطه (۲۳) مشاهده می‌شود،زمانی که پارامتر همگرایی λ_k برابر صفر باشد، آنگاه روش جدید به همان روش نیوتن رافسون استاندارد تبدیل می‌شود. به‌عبارت‌دیگر روش پیشنهادی در این مقاله، تعمیم روش نیوتون رافسون استاندارد می‌باشد.

گام چهارم

با توجه به مقدار $\left(\psi_k^{LM}\right)$ و مقادیر به دست در مرحله قبل، (X_k) ، جواب مرحله بعدی، به فرم معادله (۲۴) قابل محاسبه است.

$$X_{k+1} = X_k + \psi_k^{LM} \qquad (۲۴)$$

گام پنجم

شرط توقف در این روش را طبق رابطه زیر بررسی می‌شود.

$$Max\{F(x_{k+1})\} \leq \epsilon \qquad (۲۵)$$

در رابطه (۲۵) منظور از ϵ مقدار تعیین‌کننده برای توقف روش می‌باشد.

۴- الگوریتم پیشنهادی برای پخش بار در سیستم‌های با R/X بالا

برای فرمول‌بندی این روش،با توجه به روابط (۱) تا (۱۵)، برای حل مسئله پخش‌بار باید به این نکته توجه کرد که در پخش بار، منظور از مقدار اولیه درواقع همان بردار اندازه و زوایای ولتاژ می‌باشد که تحت عنوان بردار ولتاژ که در معادله (۲۶) آمده مشخص می‌شود.

$$X_k = \theta_k = \begin{bmatrix} \delta_k \\ --- \\ |V|_k \end{bmatrix} \qquad (۲۶)$$

همچنین منظور از مقدار $R(\theta_k)$ ، مقدار باقیمانده توان مرحله kام می‌باشد (رابطه (۲۷)). منظور از باقیمانده توان، درواقع همان اختلاف توان محاسباتی و توان برنامه‌ریزی شده خواهد بود.

$$F(x_k) = R(\theta_k) = \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ --- \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} \qquad (۲۷)$$

درنتیجه این الگوریتم برای مسئله پخش بار به فرم زیر می‌باشد.

گام اول

ابتدا مقدار ماتریس ژاکوبین و همچنین مقدار λ_k طبق باقیمانده توان از طریق رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_k = \|R(\theta_k)\|^{\mu} \qquad \mu \in [1,2] \qquad (۲۸)$$

گام دوم

با محاسبه مقدار λ_k از گام اول، مقدار $\Delta\theta_k$ از رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود.

$$\psi_k^{LM} = \Delta\theta_k = -\left(\mathcal{J}_k^T \mathcal{J}_k + \lambda_k I\right)^{-1} \mathcal{J}_k^T R(\theta_k) \qquad (۲۹)$$

گام سوم

با توجه به مقدار به‌دست‌آمده $\Delta\theta_k$، مقدار بردار ولتاژ را از رابطه (۰۳) محاسبه می‌شود.

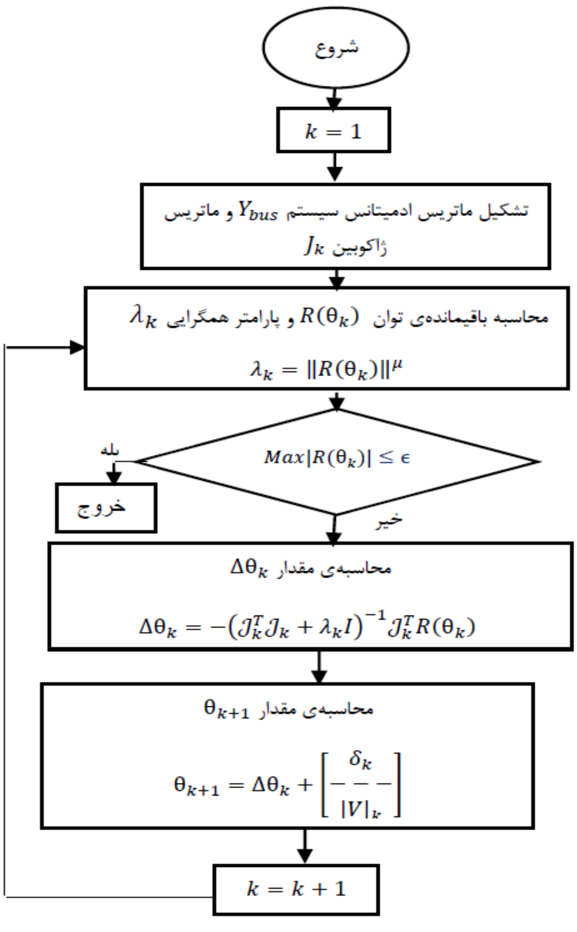
$$\theta_{k+1} = \Delta\theta_k + \theta_k = \Delta\theta_k + \begin{bmatrix} \delta_k \\ --- \\ |V|_k \end{bmatrix} \qquad (۳۰)$$

گام چهارم

در این روش شرط خارج شدن برنامه از تکرار برابر است با:

$$Max|R(\theta_{k+1})| \leq) \epsilon \qquad (۳۱)$$

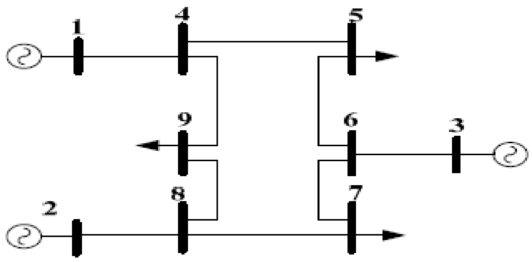
فلوچارت این روش در شکل ۱ آمده است.



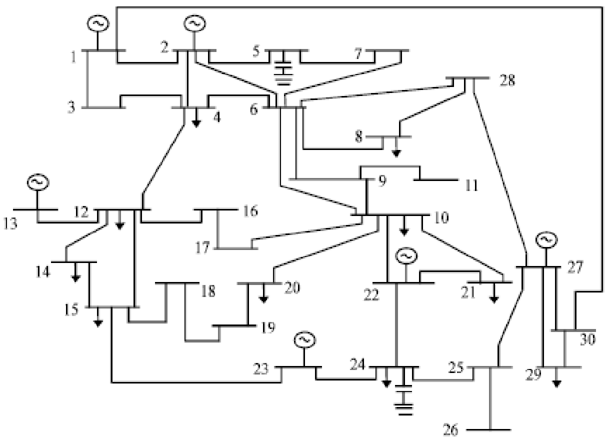
شکل ۱: فلوچارت روش جدید

۵- شبیه‌سازی

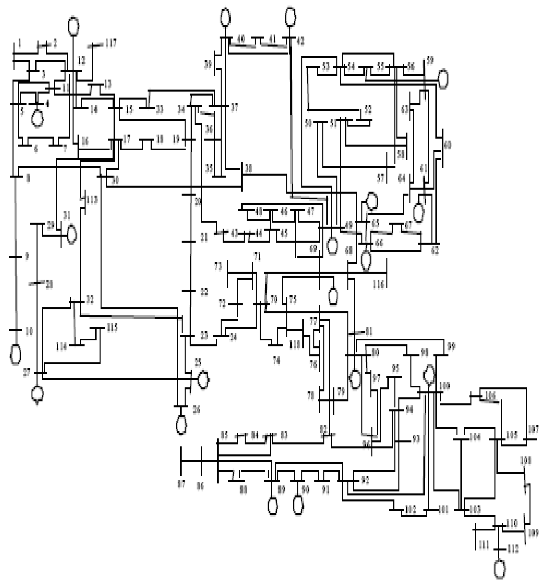
روش جدید بـر روی سـه شـبکه تسـت اسـتاندارد ۹، ۳۰، ۱۱۸ و ۲۳۸۳ گـره‌ایIEEEو همچنـین سیسـتم توزیـع ۱۱ گـره‌ای [۱۸]، شبیه‌سازی شده است که در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲: سیستم ۹ گره‌ای IEEE



شکل ۳: سیستم ۳۰ گره‌ای IEEE



شکل ۴: سیستم ۱۱۸ گره‌ای IEEE

بـرای شبیه‌سـازی در صـد جبران‌سـازیK به‌صـورت زیـر تعریـف می‌گردد [۲۱و۲۲].

$$K = \frac{R}{X} \tag{۳۲}$$

در هر یک از سیستم‌های شبیه‌سازی شده، مقدار K به‌صورت پله‌ای از ۲۰٪ تا ۸۰٪ افزایش داده شده و تعداد تکرارها و زمان رسیدن به همگرایی، برای هر یک از شبکه‌ها گزارش شده که در جداول ۱ تا ۳ آورده شده است. با کاهش میزان راکتانس خط (مثلاً توسط جبران‌ساز خازن سری) عدد شرایط سیستم (CPS) بزرگ شده و درنتیجه همگرایی روش نیوتن رافسون را دچار مشکل می‌نماید.

برای تحلیل نتایج از نرم‌افزار متلب برای شبیه‌سازی استفاده شده است و سیستم مورد استفاده برای شبیه‌سازی نیز دارای ویژگی‌های CPU Intel core i5-4200u, 1.6GHz, 4GB RAM می‌باشد.

برای شبکه ۹ گره‌ای، با توجه به جدول شماره ۱، همواره ۴ یا ۵ تکرار برای رسیدن به همگرایی در این روش نیاز می‌باشد. درصورتی‌که در روش نیوتن رافسون سیستم حتی با بیش از ۵۰ تکرار نیز به همگرایی نمی‌رسد. همچنین نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که زمان رسیدن به همگرایی با افزایش K، افزایش نیافته است. به ازای مقدار K برابر ۸۰٪ ، زمان مورد نیاز برای رسیدن به همگرایی برابر ۰/۰۹۱ ثانیه می‌باشد.

با افزایش میزان جبران‌سازی در خطوط در این سیستم تعداد تکرارها از ۵ تکرار به ۴ تکرار می‌رسد. درواقع تا میزان جبران‌سازی ۴۰٪ تعداد تکرار برابر ۵ و با جبران‌سازی ۵۰٪ به بالا این تعداد تکرار به ۴ می‌رسد.

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی در شبکه ۹ گره‌ای IEEE

روش پیشنهادی		نیوتن رافسون استاندارد		$K = \frac{R}{X}$
تعداد تکرار	زمان (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان (ثانیه)	
۵	۰/۱۱۰	۷	۰/۲۵۴	۲۰٪
۵	۰/۰۹۸	۷	۰/۲۵۷	۳۰٪
۵	۰/۱۰۱	۱۱	۰/۳۳۵	۴۰٪
۴	۰/۱۰۵	واگرا	---	۵۰٪
۴	۰/۰۹۷	واگرا	---	۶۰٪
۴	۰/۱۰۲	واگرا	---	۷۰٪
۴	۰/۰۹۱	واگرا	---	۸۰٪

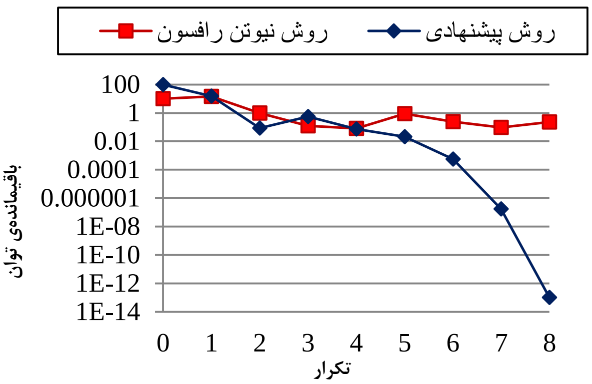
یکی دیگر از سیستم‌های موردمطالعه برای نشان دادن کارایی این روش، سیستم ۳۰ گره‌ای IEEE می‌باشد. مطابق جدول شماره ۲ در کلیه مقادیر K، تعداد تکرار برای همگرایی برابر ۶ تکرار می‌باشد. در این سیستم نیز به دلیل کاهش راکتانس خط شبیه‌سازی با روش نیوتن رافسون جوابگو نمی‌باشد. در این سیستم در بهترین شرایط زمان رسیدن به همگرایی برابر ۰/۱۸۸ ثانیه می‌باشد.

نمودار همگرایی در شکل شماره ۵، مقایسه‌ای بین روش جدید ارائه شده و روش نیوتن رافسون، برای مقدار K برابر ۸۰٪، نشان داده‌شده است که در آن با افزایش تکرار تا تکرار ۸ام، روش پخش‌بار پیشنهادی با دقت 10^{-12} به همگرایی می‌رسد؛ درصورتی‌که، با همین تعداد ۸ تکرار، روش نیوتن رافسون به‌صورت نوسانی عمل می‌کند و درواقع واگرا می‌شود. به ازای K برابر ۸۰٪، چون عدد شرایط سیستم به سمت اعداد بزرگ میل می‌کند، درنتیجه تعداد تکرار برای رسیدن به همگرایی به عدد ۸ می‌رسد.

جدول ۲: نتایج شبیه‌سازی در شبکه۳۰گره‌ای IEEE

روش پیشنهادی		نیوتن رافسون استاندارد		$K = \frac{R}{X}$
تعداد تکرار	زمان (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان (ثانیه)	
۶	۰/۲۲۳	۹	۰/۳۱۱	۲۰٪
۶	۰/۲۴۸	۱۰	۰/۳۱۷	۳۰٪
۶	۰/۲۰۶	۱۲	۰/۳۳۵	۴۰٪
۶	۰/۲۰۹	واگرا	---	۵۰٪
۶	۰/۲۳۱	واگرا	---	۶۰٪
۶	۰/۲۰۹	واگرا	---	۷۰٪
۶	۰/۱۸۸	واگرا	---	۸۰٪

در نهایت روش پیشنهادی روی شبکه بزرگ ۱۱۸ گره‌ای، شبیه‌سازی شده است که نتایج آن در جدول شماره ۳ آورده شده است.



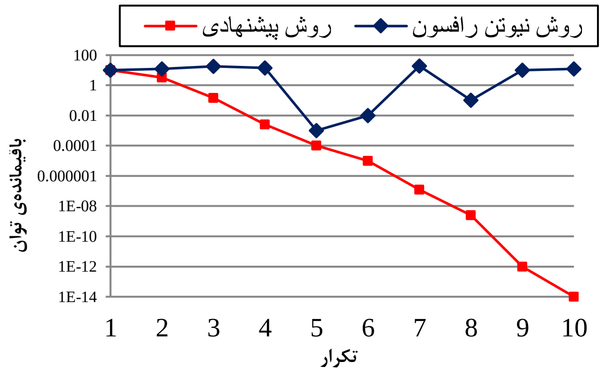
شکل ۵: نمودار مقایسه همگرایی روش جدید و روش نیوتن رافسون در سیستم ۳۰ گره‌ای

با توجه به نتایج جدول۳ میزان تعداد تکرار برای رسیدن به همگرایی در حالاتی که K بین ۳۰٪ تا میزان ۷۰٪ می‌باشد، برابر ۹ تکرار است ولی با افزایش میزان K به میزان ۸۰٪، تعداد تکرارها به میزان ۲ واحد افزایش یافته و از ۹ تکرار به ۱۱ تکرار می‌رسد. همچنین با افزایش K در سیستم ۱۱۸ گره‌ای، تا ۸۰٪ باعث افزایش زمان همگرایی از مقدار ۱/۵ ثانیه به ۱/۸ ثانیه می‌شود.

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی در شبکه۱۱۸گره‌ای IEEE

روش پیشنهادی		نیوتن رافسون استاندارد		$K = \frac{R}{X}$
تعداد تکرار	زمان (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان (ثانیه)	
۱۰	۱/۶۴۹	۱۵	۲/۰۳	۲۰٪
۹	۱/۳۸۷	۱۵	۲/۴۲	۳۰٪
۹	۱/۴۵۶	واگرا	---	۴۰٪
۹	۱/۴۷۶	واگرا	---	۵۰٪
۹	۱/۴۷۹	واگرا	---	۶۰٪
۹	۱/۵۱۲	واگرا	---	۷۰٪
۱۱	۱/۸۴۷	واگرا	---	۸۰٪

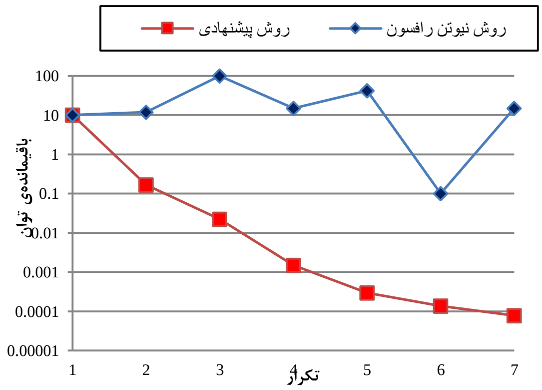
همان‌گونه که از جداول مشخص است با افزایش میزان R/X خطوط سیستم به سمت واگرا شدن پیش می‌رود . برای سیستم ۹ باسه سیستم فقط قابلیت همگرا شدن برای افزایش R/X تا میزان ۴۰٪ را دارا می‌باشد. این میزان افزایش R/X خطوط در سیستم ۳۰باسه ۴۰٪ است ولی با افزایش تعداد باس‌های سیستم قدرت مثلاً ۱۱۸ باس میزان افزایش R/X خطوط برای‌همگرایی با روش نیوتن رافسون استاندارد به ۳۰٪ کاهش پیدا می‌کند. همچنین در کلیه سیستم‌های مورد بحث با افزایش میزان R/X تعداد تکرارها نیز رو به افزایش می‌رود.



شکل۶: نمودار مقایسه همگرایی روش جدید و روش نیوتن رافسون در شبکه ۱۱۸ گره‌ای

در سیستم ۱۱ باسه که یک سیستم توزیع می‌باشد نتایج شبیه‌سازی گویای این حقیقت است که این روش برای سیستم‌های توزیع نیز یک روش مناسب برای حل مسئله پخش توان می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی بر روی سیستم ۱۱ باسه در جدول ۴ آورده شده است. روش ارائه‌شده در این مقاله برای تمامی محدوده‌های R/X جواب‌گو می‌باشد. نمودار همگرایی شکل ۶، مقایسه‌ای بین روش جدید ارائه شده و روش نیوتن رافسون، برای مقدار K برابر ۴۰٪، نشان داده شده است که در آن با افزایش تکرار تا تکرار ۱۰ام، روش پخش‌بار پیشنهادی با دقت 10^{-14}به همگرایی می‌رسد؛ در حالی‌که روش نیوتون رافسون واگرا می‌شود. همچنین در سیستم توزیع ۱۱ باسه نیز این روش کاملاً جواب‌گو می‌باشد (شکل ۷).



شکل۷: نمودار مقایسه همگرایی روش جدید و روش نیوتن رافسون در شبکه ۱۱گره‌ای توزیع

در شبکه ۲۳۸۳ باسه با ابعاد بزرگ نیز این روش شبیه‌سازی شده و نتایج آن به‌صورت جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی در شبکه ۲۳۸۳ گره‌ای

روش پیشنهادی		نیوتون رافسون استاندارد		$K=\frac{R}{X}$
تعداد تکرار	زمان (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان (ثانیه)	
۱۵	۱۳۲	۲۳	۳۳۵	۲۰٪
۱۷	۱۵۶	۲۵	۳۶۷	۳۰٪
۱۷	۱۶۱	۲۵	۳۷۳	۴۰٪
۱۸	۱۸۲	واگرا	---	۵۰٪
۱۸	۱۸۰	واگرا	---	۶۰٪
۱۸	۱۷۶	واگرا	---	۷۰٪
۲۰	۲۱۲	واگرا	---	۸۰٪

جدول ۵: علائم

توضیحات	علائم اختصاری
شاخص برای نمایش گره شبکه	k , j
علامت نُرم ماتریس x	$\|x\|$
توان اکتیو برنامه‌ریزی شده	P_k^{sch}
توان راکتیو برنامه‌ریزی شده	Q_k^{sch}
توان اکتیو گره kام	P_k
توان راکتیو گره kام	Q_k
اندازه ولتاژ گره kام	$\lvert V_k \rvert$
زاویه ولتاژ گره kام	δ_k
اندازه ادمیتانس متصل بین گره kام و jام	$\lvert Y_{kj} \rvert$
زاویه ادمیتانس متصل بین گره kام و jام	φ_{kj}
باقیمانده توان اکتیو گره kام	ΔP_k
باقیمانده توان راکتیو گره kام	ΔQ_k
ماتریس ژاکوبین	$\mathcal{J}$
پارامتر همگرایی	λ_k
عدد همگرایی نُرم	μ
ماتریس همانی	I
بردار ولتاژ	θ_k
بردار باقیمانده توان	$R(\theta_k)$
نسبت مقاومت خط به راکتانس خط	K
عدد کوچک	ε

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش مبتنی بر تکرار برای حل مسئله پخش توان در سیستم‌های قدرت با مقادیر متفاوت نسبت R/X، ارائه شده است. در یک سیستم قدرت با نسبت بالای R/X، رفتار سیستم به سمت یک سیستم با مقدار عدد شرایط بالا سوق پیدا می‌کند. با افزایش عدد شرایط سیستم (CPS)، روش‌هایی مثل روش نیوتن رافسون و روش‌های مبتنی بر نیوتن قادر به همگرایی نیستند. در روش جدید ارائه شده سیستم حتی با مقدار عدد شرایط بالا نیز همگرا می‌شود.

به‌طور خلاصه مزیت‌های این روش را می‌توان این‌چنین برشمرد: سرعت‌بالا در همگرایی، تعداد تکرار کم برای رسیدن به همگرایی، سادگی روش، قابلیت اطمینان بالای جواب‌ها

مراجع

[1] B. Stott, ”Review of Load-Flow Calculation Methods,” Proc. of the, vol. 62, no. 7, pp.916-929, Jul. 1974.

[2] W. F. Tinney. and C. E. Hart., “Power Flow Solution by Newton's Method,” IEEE Trans. Power App. and Syst., vol. 86, no. 11, pp.1449-1460, Nov. 1967.

[3] P. R. Bijwe, S. M. Kelapure, “Nondivergent fast power flow methods,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, no. 2, pp.633-638, 2003.

[4] S. Iwamoto, Y. Tamura, “A load flow calculation method for ill-conditioned power Systems,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-100, no. 4, pp. 1736-1743, Apr. 1981.

[5] F. Milano, “Continuous newton's method for power flow analysis,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 1, pp.50-57, 2009.

[6] M. M. M. El-Arini, “Decoupled power flow solution method for well-condition and ill-conditioned power systems,” IET Gen, Trans. Distri, vol. 140, no. 1, pp. 7-10, 1993.

[7] Enns and Mark, “An improved version of the fast decoupled load flow,” Proceedings of the IEEE, vol.65, no.2, pp. 278-279, Feb. 1977.

[8] J. Arrillaga and B. J. Harker, “Fast-decoupled three phase load flow,” Proc. Inst. Elec. Eng. Gen, Trans. Distri., vol. 125, no. 8, pp.734–740, Aug. 1978.

[9] B. Stott, J. Jardim and O. Alsaç, “DC Power Flow Revisited” IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 3, pp.1290-1300, Aug. 2009.

[10] Yehoda and Wallac, “Gradient Methods for Load-Flow Problems,” IEEE Trans. Power App. and Syst., vol. PAS-87, no. 5, pp.1314-1318, May. 1968.

[11] K. P. Wong, A. Li. and M. Y. Law, “Development of constrained-genetic-algorithm load-flow method,” Proc. IEE Gen., Trans. & Dist., vol. 144, no. 2, pp.91-99, Mar. 1997.

[12] S. Kim. and T. J. Overbye, ”Mixed power flow analysis using AC and DC models,” IET Gen., Trans. & Dist., vol. 6, no. 10, pp.1053–1059, Oct. 2012.

[13] J. G. Vlachogiannis, ”Fuzzy logic application in load flow studies,” IEE Gen., Trans. & Dist., vol. 148, no. 1, pp.34-40, Jun. 2001.

[14] X. Yang and X. Zhou, ”Application of asymptotic numerical method with homotopy techniques to power flow problems,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 57, no. 1, pp. 375–383, May 2014.

[15] D. Mehta, H. D. Nguyen and K. Turitsyn, “Numerical polynomial homotopy continuation method to locate all the power flow solutions,” IET Gen. Trans. Distr, vol.**10**,no. 12, pp. 2972-2980, 2016

[16] S. Rao, Y. Feng, D. J. Tylavsky and M. K. Subramanian, “The Holomorphic Embedding Method Applied to the Power-Flow Problem,” IEEE Trans. Power App. and Syst. pp. 1-13, 2015

[17] S. C. Tripathy, G. D. Prasad, O. P. Malik and G. S. Hope, “Load-flow solutions for ill-conditioned power systems by a Newton-like method,” IEEE Trans. Power App. Syst., 1982, PAS-101, (10), pp. 3648–3657.

[18] K. Amini, F. Rostami, “A modified two steps Levenberg–Marquardt method for nonlinear equations,” Journal of Computational and Applied Mathematics, 2015, 288, pp.341–350

[19] A. Trias, “Sigma Algebraic Approximants as a Diagnostic Tool in Power Networks,” U.S. Patent 2014/0156094, Jun. 5, 2014.

[20] زهیر هوشی، مهرداد طرفدار حق و مهران صباحی، ″جبران‌ساز خط به خط: نسل جدیدی از ادوات FACTS″، مجله مهندسی تبریز، دوره ۴۴، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳، صفحات: ۶۶-۵۷.

[21] عباس ربیعی، مرتضی محمدی، ″پخش بار بهینه مقید به پایداری گذرا: رهیافت برنامه‌ریزی تصادفی″مجله مهندسی تبریز، دوره ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحات: ۱۸۳-۱۶۹.

زیرنویس‌ها

1 ill-conditioned