

# اصلاح و بهبود الگوریتم تزریق جریان جهت مطالعه پخش بار در سیستم‌های توزیع چهار سیمه

مهرداد عابدی      محمد منفرد      عباس مولوی داریانی  
دانشکده مهندسی برق-دانشگاه صنعتی امیرکبیر (قطب علمی قدرت ایران)

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های توزیع، پخش بار چهار سیمه نامتعادل، روش تزریق جریان

## چکیده:

بوسیله چندین شبکه مختلف آزموده شده و نشان داده خواهد شد که افزایش سرعت، کاهش تعداد تکرارها و حجم و زمان محاسبات، در مقایسه با روش قبلی، کاملاً چشمگیر است. با توجه به اینکه شبکه‌های توزیع فشار ضعیف، عموماً چهار سیمه هستند، و از سوی دیگر، پایداری، دقت و سرعت بالای روش اصلاح شده، این روش، به عنوان مناسبترین گزینه موجود برای انجام محاسبات پخش بار در شبکه‌های نامتعادل معرفی می‌شود.

بخش اعظم شبکه‌های توزیع، به سبب وجود بارهای نامتعادل، خطوط انتقال نامتقارن و انشعابات دو فاز و تک فاز، کاملاً نامتعادل هستند. این ویژگی شبکه‌های توزیع، نیاز به دستیابی به روشهای موثر پخش بار در موارد فوق را سبب می‌گردد. در این مقاله، ابتدا الگوریتم روش بسیار موثری برای پخش بار چهار سیمه، مبتنی بر روش تزریق جریان و حل نیوتن-رافسون معرفی شده که دارای پایداری عددی و سرعت همگرایی بهتری نسبت به روش‌های متداول است؛ بعلاوه این قابلیت را دارد که عناصر تولید پراکنده (DG) را بصورت باسهای PV در نظر گرفته و همچنین سیستم فوق توزیع (حلقه‌ها) را نیز به همراه سیستم توزیع نمایش داده و حل کند. سپس پیشنهادی برای اصلاح روش و تغییر الگوریتم ارائه خواهد شد که سبب افزایش قابل ملاحظه سرعت همگرایی و کاهش هرچه بیشتر تعداد تکرارها و زمان انجام محاسبات می‌شود. صحت عملکرد روش اصلاحی

## ۱- مقدمه:

حل مساله پخش بار، منجر به یافتن دامنه و فاز کلیه ولتاژها و جریانهای شبکه می‌گردد. از حدود ۴۰ سال پیش تاکنون، استفاده از روشهای نیوتن کلاسیک و نیوتن-رافسون مجزای سریع در مختصات قطبی، برای مدل توالی مثبت شبکه‌ها، ابزار اصلی حل مسائل پخش بار

هستند که غالباً عملکرد متعادل<sup>۱</sup> شبکه مورد توجه می‌باشد. این در حالی است که شبکه‌های توزیع، عموماً دارای عملکرد متعادل نبوده و دارای نسبت  $R/X$  کوچکی هستند. در حقیقت بخش اعظم شبکه‌های توزیع، به سبب وجود بارهای نامتعادل، خطوط انتقال نامتقارن و انشعابات دو فازه و تک فازه، کاملاً غیر بالانس هستند. این ویژگی شبکه‌های توزیع، نیاز به دستیابی به روشهای موثر پخش بار در موارد فوق را سبب می‌گردد. تا به حال چندین روش ارائه شده‌اند و اخیراً نیز، ایده استفاده از معادلات تزریق جریان بهمراه و یا به جای معادلات عدم برابری توانها<sup>۲</sup> منجر به ارائه روشهای موثری شده است. در این راستا، مرجع [۱]، در سال ۲۰۰۰ میلادی نتایج کاری را منتشر کرد که روش پخش بار نیوتن-رافسون سه فازه تهی<sup>۳</sup> با استفاده از روش تزریق جریان (CIM<sup>۴</sup>) را معرفی می‌کند. نشان داده شده است که این روش، از نظر عددی بسیار پایدار بوده و سرعت همگرایی آن، حدود ۳۰٪ بیش از روشهای متداول است؛ بعلاوه این امکان را می‌دهد تا عناصر تولید پراکنده (DG) را بصورت باسهای PV در نظر گرفت و همچنین سیستم فوق توزیع (حلقه‌ها) را نیز به همراه سیستم توزیع نمایش داده و حل کرد. همین گروه، در سال ۲۰۰۱ میلادی و در [۲]، توانایی روش ابداعی خود را در حل مدارات شامل ادوات FACTS و سایر ابزارهای کنترلی، هرچه بیشتر آشکار ساختند. در نهایت، در سال ۲۰۰۴ میلادی و در آخرین مقاله خود [۳]، روش را برای در نظر گرفتن سیم چهارم، اصلاح کرده و توسعه دادند، بطوریکه قادر است سیم‌های نول و امپدانس‌های زمین را در فرمول پخش بار سه فاز لحاظ کند. نشان داده شده است که روش هم قابل اعمال به سیستم‌های توزیع غیر بالانس شعاعی و هم شبکه‌ای است. همانگونه که اشاره شد، سرعت همگرایی و پایداری این روش نسبت به سایر روشهای متداول بهبود

چشمگیری دارد و می‌توان گفت که بهترین گزینه موجود برای حل این دسته از مسائل پخش بار می‌باشد [۱، ۲ و ۳]. لذا در این مقاله، ابتدا شرح مختصری از روش فوق و نحوه پیاده‌سازی آن بوسیله الگوریتم کامپیوتری، ارائه می‌گردد. سپس پیشنهادی برای اصلاح روش و تغییر الگوریتم، ارائه می‌کنیم که سبب افزایش قابل ملاحظه سرعت همگرایی و کاهش هرچه بیشتر تعداد تکرارها و زمان انجام محاسبات می‌شود. صحت عملکرد روش اصلاحی خود را بوسیله چندین مدار مختلف می‌آزماییم و نشان می‌دهیم که افزایش سرعت، کاهش تعداد تکرارها و حجم و زمان محاسبات، قابل توجه می‌باشد.

## ۲- الگوریتم پخش بار سه فاز چهار سیمه با استفاده از روش تزریق جریان و مبتنی بر حل نیوتن-رافسون:

ابتدا الگوریتمی را که بطور کامل، روش فوق و نحوه اجرای آن بوسیله ابزار محاسباتی مورد نظر را نشان می‌دهد ارائه می‌کنیم. این الگوریتم، خلاصه‌ای کامل از روند پیشرفتی است که در طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴ در [۱، ۲ و ۳] ارائه شده است. در نهایت نیز با توجه به همین الگوریتم، اصلاح مورد نظر خود را تشریح خواهیم کرد. در این روش، معادلات تزریق جریان سه فاز در دستگاه مختصات دکارتی نوشته می‌شوند که منجر به معادلات ماتریسی از مرتبه  $8n$  می‌گردد. ماتریس ژاکوبین، از بلوکهای ماتریسی  $8 \times 8$  تشکیل شده و دارای ساختار ماتریس ادمیتانس گره می‌باشد که بجز برای باسهای PV، دارای بلوکهای غیرقطری برابر با ماتریس ادمیتانس گره بوده و عناصر بلوکهای قطری نیز، در هر تکرار، با توجه به مدل بار در نظر گرفته شده برای باس مربوطه، مجدداً محاسبه می‌شوند. در مختصات دکارتی، ولتاژها و جریانها، مجموع مولفه‌های حقیقی و موهومی می‌باشند.

<sup>1</sup> Balanced operation

<sup>2</sup> Power mismatch equations

<sup>3</sup> Sparse

<sup>4</sup> Current Injection Method

از سوی دیگر ماتریس ادمیتانس گره نیز معین بوده و میتوان آنها را به فرم زیر نوشت:

$$\begin{aligned} V_k^d &= V_{r_k}^d + jV_{m_k}^d \\ I_k^s &= I_{r_k}^s + jI_{m_k}^s \\ Y &= G + jB \end{aligned}$$

الگوریتم حل مساله پنخش بار بصورت زیر خلاصه می شود:

**گام اول:** دادن مقادیر اولیه به ولتاژها که عموماً برابر ولتاژهای شینه مرجع، انتخاب می گردند.

**گام دوم:** محاسبه خطای جریانها برای کلیه شینه های شبکه با استفاده از فرمول های (۲) - (۵)

**گام سوم:** تست همگرایی؛ اگر خطای جریان، برای کلیه شینه ها، کمتر از حد خطای قابل قبول بود ( $|\Delta I| < \epsilon$ ) به گام هفتم و در غیر این صورت به گام بعدی خواهیم رفت.

**گام چهارم:** ماتریس ژاکوبین را برای معادله (۱) با استفاده از فرمول های (۶) و (۷) تشکیل می دهیم. ملاحظه می شود که عناصر غیرقطری ثابت نیستند؛ بنحویکه عناصر قسمت دوم ماتریس (۷) با توجه به ضرایب مدل بار و از روی مقادیر ولتاژ بدست آمده از تکرار قبل و با استفاده از روابط ضمیمه بدست می آیند.

**گام پنجم:** حل معادله (۱) برای یافتن تغییرات ولتاژ کلیه شینه ها.

**گام ششم:** اصلاح مولفه های حقیقی و موهومی ولتاژهای شبکه با استفاده از تغییرات ولتاژ محاسبه شده در گام قبلی، سپس افزایش شماره تکرار و رفتن به گام دوم.

**گام هفتم:** چاپ نتایج.

برای شینه های PV، توان راکتیو تولیدی در هر فاز آنها، بصورت یک متغیر حالت جدید، وارد معادلات می شود که برای جزئیات بیشتر، میتوان به [۳] و [۴] مراجعه کرد.

$V_k^t$ : ولتاژ مختلط در شینه kام، فاز  $t = \{a, b, c, n\}$

$\Omega_k$ : مجموعه باسهایی که مستقیماً به شینه kام متصل اند.

$V_k^d$ : ولتاژ مختلط در شینه kام، فاز  $d = \{a, b, c\}$

$V_k^n$ : ولتاژ مختلط سیم نول در شینه kام

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{m_1}^{abcn} \\ \Delta I_{r_1}^{abcn} \\ \Delta I_{m_2}^{abcn} \\ \Delta I_{r_2}^{abcn} \\ \vdots \\ \Delta I_{m_{nb}}^{abcn} \\ \Delta I_{r_{nb}}^{abcn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (J_{11})^{abcn} & (J_{12})^{abcn} & \dots & (J_{1nb})^{abcn} \\ (J_{21})^{abcn} & (J_{22})^{abcn} & \dots & (J_{2nb})^{abcn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (J_{nb1})^{abcn} & (J_{nb2})^{abcn} & \dots & (J_{nbnb})^{abcn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{r_1}^{abcn} \\ \Delta V_{m_1}^{abcn} \\ \Delta V_{r_2}^{abcn} \\ \Delta V_{m_2}^{abcn} \\ \vdots \\ \Delta V_{r_{nb}}^{abcn} \\ \Delta V_{m_{nb}}^{abcn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Delta I_{r_k}^d = \frac{(P_k^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n) + (Q_k^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)}{\left(\frac{(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2}{V_{r_k}^d} + \frac{(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2}{V_{m_k}^d}\right)} + \sum_{t \in \alpha_p} (G_{kk}^{dt} V_{r_k}^t - B_{kk}^{dt} V_{m_k}^t) - \sum_{\substack{i \in \Omega_k \\ i \neq k}} \sum_{t \in \alpha_p} (G_{ki}^{dt} V_{r_i}^t - B_{ki}^{dt} V_{m_i}^t) \quad (2)$$

$$\Delta I_{m_k}^d = \frac{(P_k^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n) + (Q_k^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)}{\left(\frac{(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2}{V_{r_k}^d} + \frac{(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2}{V_{m_k}^d}\right)} + \sum_{t \in \alpha_p} (B_{kk}^{dt} V_{r_k}^t + G_{kk}^{dt} V_{m_k}^t) - \sum_{\substack{i \in \Omega_k \\ i \neq k}} \sum_{t \in \alpha_p} (B_{ki}^{dt} V_{r_i}^t + G_{ki}^{dt} V_{m_i}^t) \quad (3)$$

$$\Delta I_{r_k}^n = -(I_{r_k \text{ cg}}^a + I_{r_k \text{ cg}}^b + I_{r_k \text{ cg}}^c) + \sum_{t \in \alpha_p} (G_{kk}^{nt} V_{r_k}^t - B_{kk}^{nt} V_{m_k}^t) - \sum_{\substack{i \in \Omega_k \\ i \neq k}} \sum_{t \in \alpha_p} (G_{ki}^{nt} V_{r_i}^t - B_{ki}^{nt} V_{m_i}^t) \quad (4)$$

$$\Delta I_{m_k}^n = -(I_{m_k \text{ cg}}^a + I_{m_k \text{ cg}}^b + I_{m_k \text{ cg}}^c) + \sum_{t \in \alpha_p} (B_{kk}^{nt} V_{r_k}^t + G_{kk}^{nt} V_{m_k}^t) - \sum_{\substack{i \in \Omega_k \\ i \neq k}} \sum_{t \in \alpha_p} (B_{ki}^{nt} V_{r_i}^t + G_{ki}^{nt} V_{m_i}^t) \quad (5)$$

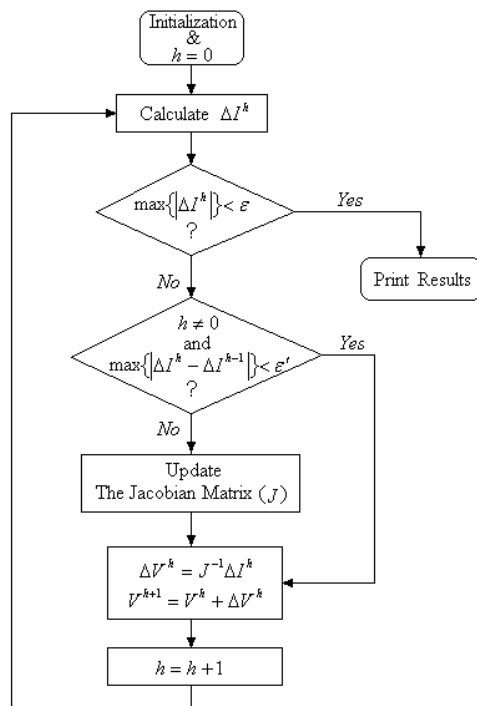
$$(J_{ki})^{abcn} = \begin{bmatrix} B_{ki}^{aa} & B_{ki}^{ab} & B_{ki}^{ac} & B_{ki}^{an} & G_{ki}^{aa} & G_{ki}^{ab} & G_{ki}^{ac} & G_{ki}^{an} \\ B_{ki}^{ba} & B_{ki}^{bb} & B_{ki}^{bc} & B_{ki}^{bn} & G_{ki}^{ba} & G_{ki}^{bb} & G_{ki}^{bc} & G_{ki}^{bn} \\ B_{ki}^{ca} & B_{ki}^{cb} & B_{ki}^{cc} & B_{ki}^{cn} & G_{ki}^{ca} & G_{ki}^{cb} & G_{ki}^{cc} & G_{ki}^{cn} \\ B_{ki}^{na} & B_{ki}^{nb} & B_{ki}^{nc} & B_{ki}^{nn} & G_{ki}^{na} & G_{ki}^{nb} & G_{ki}^{nc} & G_{ki}^{nn} \\ G_{ki}^{aa} & G_{ki}^{ab} & G_{ki}^{ac} & G_{ki}^{an} & -B_{ki}^{aa} & -B_{ki}^{ab} & -B_{ki}^{ac} & -B_{ki}^{an} \\ G_{ki}^{ba} & G_{ki}^{bb} & G_{ki}^{bc} & G_{ki}^{bn} & -B_{ki}^{ba} & -B_{ki}^{bb} & -B_{ki}^{bc} & -B_{ki}^{bn} \\ G_{ki}^{ca} & G_{ki}^{cb} & G_{ki}^{cc} & G_{ki}^{cn} & -B_{ki}^{ca} & -B_{ki}^{cb} & -B_{ki}^{cc} & -B_{ki}^{cn} \\ G_{ki}^{na} & G_{ki}^{nb} & G_{ki}^{nc} & G_{ki}^{nn} & -B_{ki}^{na} & -B_{ki}^{nb} & -B_{ki}^{nc} & -B_{ki}^{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$(J_{kk})^{abcn} = \begin{bmatrix} B_{kk}^{aa} & B_{kk}^{ab} & B_{kk}^{ac} & B_{kk}^{an} & G_{kk}^{aa} & G_{kk}^{ab} & G_{kk}^{ac} & G_{kk}^{an} \\ B_{kk}^{ba} & B_{kk}^{bb} & B_{kk}^{bc} & B_{kk}^{bn} & G_{kk}^{ba} & G_{kk}^{bb} & G_{kk}^{bc} & G_{kk}^{bn} \\ B_{kk}^{ca} & B_{kk}^{cb} & B_{kk}^{cc} & B_{kk}^{cn} & G_{kk}^{ca} & G_{kk}^{cb} & G_{kk}^{cc} & G_{kk}^{cn} \\ B_{kk}^{na} & B_{kk}^{nb} & B_{kk}^{nc} & B_{kk}^{nn} & G_{kk}^{na} & G_{kk}^{nb} & G_{kk}^{nc} & G_{kk}^{nn} \\ G_{kk}^{aa} & G_{kk}^{ab} & G_{kk}^{ac} & G_{kk}^{an} & -B_{kk}^{aa} & -B_{kk}^{ab} & -B_{kk}^{ac} & -B_{kk}^{an} \\ G_{kk}^{ba} & G_{kk}^{bb} & G_{kk}^{bc} & G_{kk}^{bn} & -B_{kk}^{ba} & -B_{kk}^{bb} & -B_{kk}^{bc} & -B_{kk}^{bn} \\ G_{kk}^{ca} & G_{kk}^{cb} & G_{kk}^{cc} & G_{kk}^{cn} & -B_{kk}^{ca} & -B_{kk}^{cb} & -B_{kk}^{cc} & -B_{kk}^{cn} \\ G_{kk}^{na} & G_{kk}^{nb} & G_{kk}^{nc} & G_{kk}^{nn} & -B_{kk}^{na} & -B_{kk}^{nb} & -B_{kk}^{nc} & -B_{kk}^{nn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -e_k^a & & e_k^a & -f_k^a & f_k^a & & & \\ & -e_k^b & e_k^b & -f_k^b & f_k^b & & & \\ & & -e_k^c & e_k^c & -f_k^c & f_k^c & & \\ e_k^b & e_k^b & e_k^b & -e_k^a - e_k^b - e_k^c & f_k^a & f_k^b & f_k^c & -f_k^a - f_k^b - f_k^c & h_k^a & h_k^a \\ -g_k^a & & & g_k^a & -h_k^a & & & & h_k^a & h_k^a \\ & & & -g_k^b & g_k^b & -h_k^b & & & h_k^b & h_k^b \\ & & -g_k^c & g_k^c & -h_k^c & & & & h_k^c & h_k^c \\ g_k^a & g_k^b & g_k^c & -g_k^a - g_k^b - g_k^c & h_k^a & h_k^b & h_k^c & -h_k^a - h_k^b - h_k^c & & \end{bmatrix} \quad (7)$$

۳- اصلاح الگوریتم فوق در جهت افزایش

سرعت همگرایی و کاهش تعداد تکرارها و

حجم و زمان محاسبات:



شکل (۱): فلوجارت الگوریتم اصلاح شده

سرعت تغییرات  $\Delta I$  است نیز بطرز قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و می‌تواند به عنوان معیار مناسبی برای تشخیص نزدیک شدن به جواب نهایی پخش بار، مورد استفاده قرار گیرد. وقتی که شیب تغییرات خطا کوچک شد، در حقیقت، مقدار  $\Delta I$  بسیار کوچک شده است؛ لذا تاثیر تغییرات ژاکوبین در حاصل  $\Delta V = J^{-1}\Delta I$  (رابطه (۱))، ناچیز گشته و براحتی می‌توان از آن چشم پوشی کرد؛ از سوی دیگر، با نزدیک شدن به جواب، تغییرات مقادیر ولتاژ نیز کوچک شده و لذا ماتریس ژاکوبین (عناصر قطری) نیز که وابسته به این مقادیر ولتاژها هستند، تغییرات کوچکی دارند. ثابت گرفتن ماتریس ژاکوبین در ادامه محاسبات پخش بار و عدم محاسبه مجدد آن در تکرارهای بعدی، تا حد قابل توجهی، حجم محاسبات و زمان پردازش را کاهش می‌دهد. مزیت اصلاح اعمال شده، تنها محدود به کاهش حجم و زمان انجام محاسبات نیست و همانطور که بیان خواهد شد، سبب کاهش تعداد تکرارها در رسیدن به جواب نیز می‌شود که خود افزایش هرچه بیشتر سرعت رسیدن به جواب را در پی دارد. سبب آن است که با نزدیک شدن به

ملاحظه شد که ماتریس ژاکوبین، تهی است و فرم کلی ماتریس ادمیتانس گره را حفظ می‌کند. این مزیت بزرگی است که در کنار استفاده از الگوریتم بهبود یافته نیوتن-رافسون، سبب شده تا سرعت همگرایی این روش تا حدود ۳۰٪ نسبت به سایر روشهای متداول، بهبود یابد [۱]. از سوی دیگر، لازم است تا در هر تکرار، بلوک‌های قطری ماتریس ژاکوبین، با توجه به مدل مورد استفاده برای بار، مجدداً محاسبه گردد که انجام آن، در هر تکرار و به تعداد کلیه باسها، در شبکه‌های بزرگ، حجم زیادی از محاسبات و صرف زمان طولانی را در پی خواهد داشت. لذا یافتن راهکاری مناسب و صحیح در این مورد، باعث کاهش قابل ملاحظه حجم محاسبات و متعاقباً کاهش هرچه بیشتر زمان انجام هر پخش بار می‌گردد. با استفاده از راه حلی که در این مقاله ارائه داده‌ایم، نه تنها حجم پردازشها و زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات پخش بار کاهش یافته، بلکه تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به پاسخ در هر پخش بار نیز کمتر شده است که این، خود نیز سبب افزایش هرچه بیشتر سرعت انجام پخش بار می‌گردد. اصلاح اعمال شده بدینصورت است که در هر پخش بار و پس از انجام چندین تکرار اولیه و زمانی که تغییرات خطای جریان برای کلیه شینه‌ها از حد معینی کوچکتر شد ( $\|\Delta I^{current}\| - \|\Delta I^{previous}\| < \epsilon'$ )، دیگر مقدار ماتریس ژاکوبین را تغییر نداده و از نتیجه آخرین محاسبه قبلی برای آن، تا انتهای پخش بار و رسیدن به حد خطای قابل قبول،  $\|\Delta I\| < \epsilon$ ، استفاده می‌کنیم. در واقع، از نرخ تغییرات خطای جریان، بعنوان معیار خطای دوم استفاده می‌کنیم که هرگاه از حد معینی ( $\epsilon'$ ) کوچکتر شد، دیگر ماتریس ژاکوبین را محاسبه مجدد نمی‌کنیم. شکل (۱)، فلوجارت الگوریتم اصلاحی پخش بار را نمایش می‌دهد. توجهی که برای انجام این تصحیح وجود دارد آن است که با نزدیک شدن به جواب، مقدار خطای جریان ( $\Delta I$ ) به سمت کوچک شدن پیش می‌رود، از سوی دیگر شیب تغییرات خطا که معیاری از

جواب، عموماً اندازه ولتاژها کاهش یافته تا به مقدار واقعی خود (که اغلب کمتر از حدس اولیه است) برسند، لذا همانگونه که از روابط ضمیمه استنباط می‌شود، اندازه عناصر قطری ژاکوبین که در هر تکرار، از روی این ولتاژها بدست می‌آیند، افزایش می‌یابند، در نتیجه  $J^{-1}$  با نزدیک شدن به جواب کوچکتر می‌شود. حال اگر پس از چند تکرار اولیه که نرخ تغییرات خطا به حد معینی ( $\epsilon'$ ) رسید (در نزدیکی جواب نهایی) و ماتریس ژاکوبین به مقدار واقعی خود کاملاً نزدیک شد، مقدار ماتریس ژاکوبین را ثابت بگیریم، مقدار محاسبه شده اندازه تغییرات ولتاژها در  $\Delta V = J^{-1} \Delta I$ ، کمی بزرگتر بدست آمده و سبب می‌گردد تا در تعداد تکرار کمتری به پاسخ نهایی برسیم. روشهای متداول همچون گوس-سایدل نیز برای افزایش سرعت همگرایی، از روش مشابهی استفاده کرده و مقدار خطای ولتاژ محاسبه شده در هر گام را در ضربی به نام ضریب تسریع ضرب می‌کنند [۵]. برای اعمال ایده خود، حد خطای دوم،  $\epsilon'$ ، را تعریف می‌کنیم و پس از آنکه نرخ تغییرات خطا، به این حد رسید، ماتریس ژاکوبین را ثابت گرفته و دیگر در تکرارهای بعدی، آنرا محاسبه مجدد نمی‌کنیم. ما یکبار ریشه دوم حد خطای اصلی پخش بار ( $\sqrt{\epsilon}$ ) و بار دیگر ریشه چهارم آنرا ( $\sqrt[4]{\epsilon}$ ) به عنوان حد خطای دوم،  $\epsilon'$ ، در نظر گرفته‌ایم.

#### ۴- استفاده از الگوریتم بهبود یافته و مقایسه

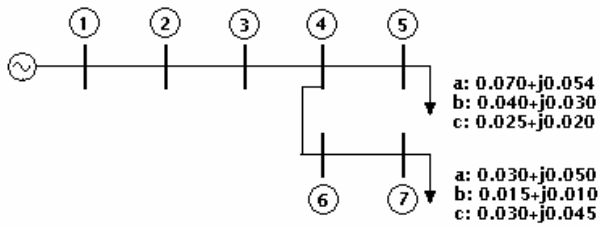
##### عملکرد آن با روش قدیمی [۳]:

برای آزمودن الگوریتم ارائه شده، از چهار شبکه مختلف استفاده کرده‌ایم. اولین شبکه، سیستم ساده‌ای است که برای نشان دادن عملکرد روش اصلی در مرجع [۳] بکار رفته است؛ شکل (۲) دیاگرام این سیستم را نشان می‌دهد. امپدانس‌های زمین مقادیر نامساوی داشته و بار نامتقارن است و برای افزایش عدم تقارن، فاز C از خط انتقال ۲-۳،

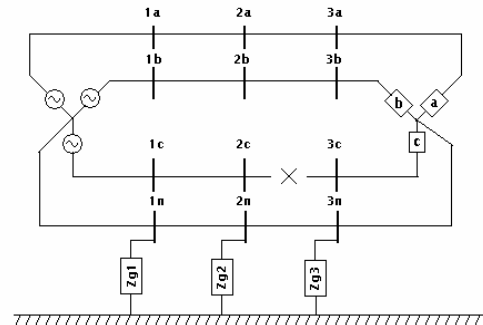
باز فرض شده است. شبکه‌های تست شکل‌های (۳) و (۴) نیز گسترشی نزدیک به واقعیت از شبکه فوق هستند. این دو شبکه نیز ۴ سیمه و دارای امپدانس‌های زمین بوده که برای سادگی نمایش، دیاگرام تک خطی آنها رسم شده است. بارها، نامتقارن بوده و برای افزایش عدم تقارن در سیستم ۷ شینه، فاز C خط ۲-۳ و فاز a خط ۴-۵ و در سیستم ۱۵ شینه، فاز C خط ۵-۷، فاز b خط ۸-۱۱ و فاز a خط ۱۴-۱۵ باز می‌باشند. شبکه چهارمی که برای تست استفاده می‌کنیم، شبکه ۴ شینه استاندارد IEEE است [۶]؛ در این مورد سیم چهارم و امپدانس‌های زمین نداریم و عدم تقارن نیز در آن حداقل و تنها ناشی از عدم تقارن بار است. برای حل این چهار شبکه، نرم‌افزاری که در محیط MATLAB نوشته شده است، بر روی کامپیوتر ۱/۵ مگاهرتزی اجرا شده‌اند. جدول (۱)، تعداد تکرارها، تعداد دفعات محاسبه مجدد ماتریس ژاکوبین و زمان انجام پخش بار شبکه‌های چهارگانه را در روش قبلی و روش اصلاحی ارائه شده در این مقاله، برای دو حالتی که حد خطای دوم برابر با ریشه دوم و ریشه چهارم حد خطای اصلی انتخاب شده است را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که به سبب اینکه حد خطای اصلی در هر دو روش یکسان است، هر دو به جوابهای برابری در محدوده این خطای قابل قبول می‌رسند. از جدول (۱)، به روشنی درمی‌یابیم که در روش اصلاح شده تعداد تکرارهایی که ماتریس ژاکوبین محاسبه مجدد می‌گردد، تا حد چشمگیری کاهش یافته است. همچنین، تعداد کل تکرارهای مورد نیاز برای حصول به جواب نهایی نیز کاهش می‌یابند. این دو، کاهش قابل ملاحظه حجم و زمان انجام محاسبات پخش بار را به دنبال دارند. از سوی دیگر مقدار بزرگتر حد خطای دوم (ریشه چهارم حد خطای اصلی)، منجر به نتایج بهتری شده بطوریکه برای شبکه‌های ۷ و ۱۵ شینه، سرعت همگرایی، بطور میانگین، دو برابر شده است.

تعداد تکرارها	شبکه تست ۳ شینه			شبکه تست ۷ شینه			شبکه تست ۱۵ شینه			شبکه ۴ شینه IEEE		
	$\mathcal{E}' = \sqrt[4]{\mathcal{E}}$	$\mathcal{E}' = \sqrt[2]{\mathcal{E}}$	روش قدیمی	$\mathcal{E}' = \sqrt[4]{\mathcal{E}}$	$\mathcal{E}' = \sqrt[2]{\mathcal{E}}$	روش قدیمی	$\mathcal{E}' = \sqrt[4]{\mathcal{E}}$	$\mathcal{E}' = \sqrt[2]{\mathcal{E}}$	روش قدیمی	$\mathcal{E}' = \sqrt[4]{\mathcal{E}}$	$\mathcal{E}' = \sqrt[2]{\mathcal{E}}$	روش قدیمی
	تعداد محاسبه مجدد J	۱	۴	۱۲	۷	۹	۳۸	۱	۴	۲۲	۲	۴
زمان انجام پخش بار (ms)	۱۸۸	۲۰۴	۲۱۹	۲۹۰	۳۲۸	۵۱۰	۳۴۴	۴۸۴	۷۹۷	۱۸۵	۲۰۳	۲۰۹

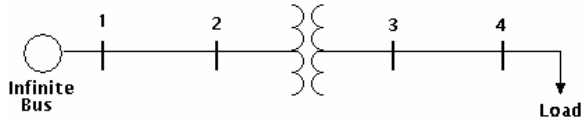
جدول (۱): مقایسه سرعت همگرایی و زمان پردازش در روش قدیمی [۳] و روش اصلاح شده



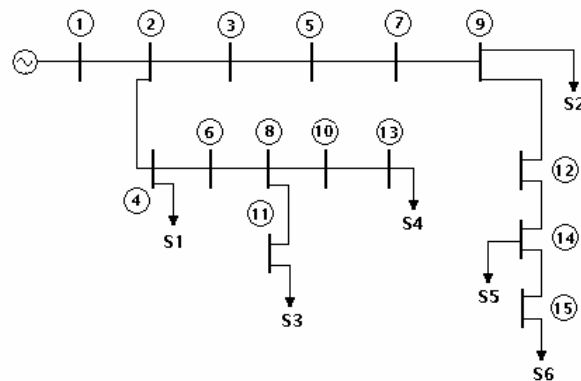
شکل (۳): شبکه تست ۷ شینه



شکل (۲): دیاگرام شبکه تست ۳ شینه



شکل (۵): شبکه تست ۴ شینه استاندارد IEEE



شکل (۴): شبکه تست ۱۵ شینه

## ۵- نتیجه گیری:

امپدانس‌های زمین مستقلاً لحاظ می‌گردند. مزیت دیگر آن، تهی بودن ماتریس ژاکوبین است. در ادامه، الگوریتم قبلی [۳] اصلاح گشته، بطوریکه سرعت همگرایی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته و تعداد تکرارها و زمان انجام محاسبات پخش بار، هرچه بیشتر کاهش می‌یابند. صحت عملکرد روش اصلاحی بوسیله چندین شبکه مختلف آزموده شده و نشان داده شده است که افزایش سرعت، کاهش تعداد تکرارها و حجم و زمان محاسبات بوسیله کامپیوتر، در مقایسه با روش قبلی، کاملاً چشمگیر است. از آنجا که شبکه‌های توزیع فشار ضعیف، عموماً چهار

در این مقاله، ابتدا الگوریتم تکنیک پخش بار سه فاز چهار سیمه، مبتنی بر روش تزریق جریان معرفی شده که دارای پایداری عددی و سرعت همگرایی بهتری نسبت به روش‌های متداولی است که از معادلات عدم برابری توانها استفاده می‌کنند؛ علاوه این قابلیت را دارد تا عناصر تولید پراکنده (DG) را بصورت باسهای PV در نظر گرفته و همچنین سیستم فوق توزیع (حلقه‌ها) را نیز به همراه سیستم توزیع حل کند. در این روش، سیم‌های نول و

## مراجع:

- [1] P. A. N. Garcia, J. L. R. Pereira, J. Carneiro, V. M. Costa, and N. Martins, "Three-phase power flow calculations using the current injection method", *IEEE Trans. Power systems*, vol. 15, no. 2, pp. 508-514, May 2000.
- [2] V. M. Costa, J. L. R. Pereira, and N. Martins, "An augmented Newton-Raphson power flow formulation based on current injections", *Electrical power and energy systems*, vol. 23, pp. 305-312, 2001.
- [3] D. R. R. Penido, L. R. Araujo, J. L. R. Pereira, P. A. N. Garcia, and J. Carneiro, "Four wire Newton-Raphson power flow based on the current injection method", in *proc. 2004 IEEE Power Engineering Society Power systems conference and exposition*, vol. 1, pp. 239-242.
- [4] P. A. N. Garcia, J. L. R. Pereira, J. Carneiro, M. P. Vinagre, and F. V. Gomes, "Improvements in the Representation of PV Buses on Three-Phase Distribution Power Flow", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 894-896, April 2004.
- [5] I. J. Nagrath, and D. P. Kothari, *Modern Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1983.
- [6] *IEEE 4 node test feeder*, IEEE Power Engineering Society, Distribution System Analysis Subcommittee:  
<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>

سیمه هستند، و با توجه به پایداری، دقت و سرعت بالای روش اصلاح شده، این الگوریتم، به عنوان مناسبترین گزینه موجود برای انجام محاسبات پخش بار در شبکه‌های نامتعادل معرفی می‌شود.

## ضمیمه:

عناصر قسمت دوم ماتریس (V) با توجه به ضرایب مدل بار و از روی مقادیر ولتاژ بدست آمده از تکرار قبلی و با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند (برای مدل چند جمله‌ای<sup>۵</sup> بار):

$$e_k^d = \frac{(Q_{0k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 - (Q_{0k}^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2 - 2(P_{0k}^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)}{[(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 + (V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2]^2} + \frac{(P_{1k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n) + (Q_{1k}^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2}{[(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 + (V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2]^{\frac{3}{2}}} + Q_{2k}^d$$

$$f_k^d = \frac{(P_{0k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 - (P_{0k}^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2 + 2(Q_{0k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)}{[(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 + (V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2]^2} + \frac{(Q_{1k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n) + (P_{1k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2}{[(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 + (V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2]^{\frac{3}{2}}} - P_{2k}^d$$

$$g_k^d = \frac{-(P_{0k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 + (P_{0k}^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2 - 2(Q_{0k}^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)}{[(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 + (V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2]^2} + \frac{(Q_{1k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n) - (P_{1k}^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2}{[(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 + (V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2]^{\frac{3}{2}}} - P_{2k}^d$$

$$h_k^d = \frac{(Q_{0k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 - (Q_{0k}^d)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2 - 2(P_{0k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)}{[(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 + (V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2]^2} + \frac{(P_{1k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)(V_{m_k}^d - V_{m_k}^n) - (Q_{1k}^d)(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2}{[(V_{r_k}^d - V_{r_k}^n)^2 + (V_{m_k}^d - V_{m_k}^n)^2]^{\frac{3}{2}}} - Q_{2k}^d$$

روش متداول برای نمایش وابستگی بار به ولتاژ، مدل چند جمله‌ای یا ZIP است:

$$P = P_2 V^2 + P_1 V + P_0$$

$$Q = Q_2 V^2 + Q_1 V + Q_0$$

<sup>5</sup> ZIP