اولین کنفرانس ملی
سیستمهای قدرت و انرژی های تجدیدپذیر
دانشگاه آزاد اسلامی واحد انار
1st APSREC
Anar Power Systems &Renewable Energies Conference

روشی ساده و سریع جهت حل پخش بار شبکه های توزیع

عباس شریفی[۱]، رضا قاضی [۲]
[۱]دانشگاه فردوسی مشهد، ashna۸۲۱۷۶@gmail.com
[۲]دانشگاه فردوسی مشهد، rghazi@um.ac.ir

چکیده - این مقاله یک روش جدید برای تجزیه و تحلیل مساله پخش بار شبکه های توزیع ارائه می کند. روش پیشنهادی از دو مرحله تشکیل می شود. در مرحله اول الگوریتم با استفاده از داده های ورودی، ساختار شبکه توزیع را شناسایی و نتایج آن در یک بردار به نام بردار شاخه ها قرار می گیرد که تعداد درایه های آن برابر با تعداد شاخه ها است. در مرحله دوم، روش پیشنهادی که با بهره گیری از الگوریتم رفت و برگشتی بر قانون جریان و ولتاژ کیرشهوف و بردار شاخه ها استوار است، به ارزیابی ولتاژ گره ها به صورت تکراری می پردازد. یک برنامه کامپیوتری برای پیاده سازی این طرح حل پخش بار توسعه داده شده است. این برنامه برای چند شبکه توزیع عملی با ساختار شعاعی و با اندازه و آرایش مختلف اجرا شد و نتایج نشان می دهد که روش پیشنهادی ضمن داشتن دقت کافی، از نظر محاسباتی سریع و کارامد است. این روش دارای ویژگی های همگرایی بسیار عالی و سرعت بالا است. بنابراین سرعت بالای آن بهره وری این الگوریتم را برای مطالعات بهینه سازی شبکه های توزیع که به دفعات نیاز به اجرای برنامه پخش بار می باشد، افزایش می دهد.

کلید واژه- تجزیه و تحلیل پخش بار، شبکه توزیع

۱- مقدمه

یکی از مسائلی که همیشه مورد توجه محققان و شرکت های توزیع بوده و اخیرا بیشتر به آن تاکید می شود مسائل بهینه سازی در شبکه های توزیع است. در همین راستا بسته های نرم افزاری جهت بهینه سازی شبکه های توزیع توسعه داده شد. اما از آنجایی که هر مطالعه بهینه سازی نیاز به اجرای متعدد پخش بار دارد، بهره وری الگوریتم پخش بار در این بسته های نرم افزاری بیشترین اهمیت را پیدا می کند.

تکنیک های حل پخش بار نیوتون رافسون، فاست دیکوپل و یک گروه از مشتقات آنها مسئله پخش بار سیستم های قدرت را با عملکرد خوب و موثر برای بیش از دو دهه حل کرده است. اگر چه این روش های پخش بار معمولی روش های ساده ای هستند اما این روش ها نمی توانند به طور موثر برای تجزیه و تحلیل پخش بار سیستم های توزیع شعاعی مورد استفاده قرار بگیرند. زیرا این شبکه ها به دلیل گستردگی محدوده مقدار مقاومت و راکتانس و همچنین ساختار شعاعی، برای الگوریتم های پخش بار نیوتون رافسون و فاست دیکوپل در رده سیستم های قدرت ضعیف هستند. اما پژوهشگران چندین بار تکنیک های حل پخش بار نیوتون رافسون و فاست دیکوپل را با توجه به ماهیت شبکه های توزیع اصلاح کرده اند [۱]-[۳]. این روش ها از نظر محاسباتی فاقد کارایی و برای سیستم های قدرت ضعیف فاقد همگرایی هستند. از این رو بسته های تجاری پخش بار همیشه این الگوریتم ها را برای افزایش دقت تغییر می دهند. ماهیت تغییر و درجه بهبود به دست آمده برای بسته های مختلف متفاوت است. تکنیک پخش بار گوس سایدل، یکی دیگر از روش های پخش بار کلاسیک، گرچه بسیار قوی است اما نشان داده شده است که در حل پخش بار سیستم های قدرت بزرگ بسیار ناکارامد است.

علاوه بر این، تلاش هایی با استفاده از تئوری شبکه نردبانی برای تجزیه و تحلیل پخش بار یک شبکه توزیع شعاعی صورت گرفته است [۴]، [۵]. در [۶] استیونس و سایر مولفان نشان داده اند که روش مبتنی بر نظریه شبکه نردبانی از نظر محاسباتی سریع اما در مواردی همگرا نیست.

در [۷] و [۸] یک رویکرد متفاوت برای حل مسئله پخش بار شامل دو مرحله پیشنهاد شده است. در مرحله اول تمام گره های واقع در خارج هر شاخه، شناسایی و در مرحله بعد جریان شاخه ها و ولتاژ گره ها محاسبه می شود. در یک سیستم بزرگ مدت زمان طولانی برای شناسایی گره ها طول میکشد و همچنین الگوریتم ارائه شده دارای سرعت بالایی نیست.

یک رویکرد دیگر مبتنی بر الگوریتم رفت و برگشتی در [۹] پیشنهاد شده است. در این روش، تجزیه و تحلیل پخش بار یک شبکه توزیع شعاعی توسط بررسی هر خط جانبی و زیر خط جانبی به عنوان یک خط منفرد اصلی انجام شده است. ارزیابی جریان شاخه ها از پایان هر زیر خط فرعی آغاز و به سمت خطوط فرعی، اصلی و حرکت به سمت گره مبنا ادامه می یابد. این روش مستلزم وارد کردن لیستی از داده ها با توجه به ساختار شبکه توزیع توسط کاربر است که بدست آوردن مقادیر این داده ها نیز برای سیستم های بزرگ وقت گیر است. از طرفی برای محاسبه جریان خطوط، الگوریتم به بخش هایی مجزا تقسیم شده که در هر بخش عملیات ریاضی تکراری برای شاخه های تعریف شده با بررسی لیستی از داده های ورودی انجام می دهد که این خود از سرعت الگوریتم خواهد کاست. هر چند این روش نسبت به روش ارائه شده در [۷] بهبود پیدا کرده است اما سرعت اجرای الگوریتم، آنقدر بالا نیست که برای مسائل بهینه سازی بهره وری داشته باشد.

یک روش پخش بار مبتنی بر جبران در [۱۰] پیشنهاد شده است. این تکنیک مستلزم اتخاذ یک روش برای شماره گذاری شاخه ها است. همچنین برای ارزیابی جریان شاخه ها از تعریف لایه ها استفاده شده که مراحل شناسایی این لایه ها از جمله شاخه های مربوط به هر لایه و نحوه اتصالات شاخه ها بین لایه های متوالی توسط کاربر انجام می گیرد و الگوریتمی برای اجرای هوشمند این مراحل وجود ندارد. برای شبکه های بزرگ وجود این الگوریتم هوشمند اهمیت پیدا می کند. همچنین زیاد بودن تعداد این لایه ها سرعت الگوریتم را کاهش می دهد.

در این چارچوب، یک رویکرد جدید برای تجزیه و تحلیل پخش بار در این مقاله پیشنهاد شده است که به تمام اشکالات بالا برای شبکه های توزیع شعاعی متعادل فائق می آید. در روش پیشنهادی، فقط مشخصات خطوط و باس ها به عنوان داده های ورودی در نظر گرفته می شود. الگوریتم ساختار شبکه توزیع شعاعی را به صورت کاملا مستقل از برنامه پخش بار، شناسایی و وارد برنامه پخش بار می شود. یک برنامه کامپیوتری پیاده سازی این طرح حل پخش بار توسعه داده شد. همچنین برای چند شبکه توزیع عملی با ساختار شعاعی و با اندازه و آرایش مختلف به کار برده شد. نتایج نشان می دهد که سرعت الگوریتم به نحو چشمگیری افزایش پیدا کرده است و از طرفی سرعت بالای آن بهره وری این الگوریتم را برای مطالعات بهینه سازی شبکه های توزیع افزایش می دهد.

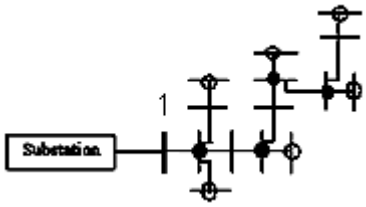
ادامه مقاله به شرح زیر تنظیم شده است : در بخش دوم، روش پیشنهادی برای تجزیه و تحلیل پخش بار شبکه توزیع شعاعی شرح داده شده و در بخش سوم، نتایج و نتیجه گیری در بخش چهارم ارائه شده است.

۲- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول الگوریتم با استفاده از داده های ورودی، ساختار شبکه توزیع را شناسایی و نتایج آن در یک بردار به نام بردار شاخه ها با طولی برابر با تعداد شاخه ها قرار می گیرد. در مرحله دوم، الگوریتم پیشنهادی با بهره گیری از روش رفت و برگشتی بر اساس قانون جریان و ولتاژ کیرشهوف و بردار شاخه ها به ارزیابی ولتاژ گره ها به صورت تکراری می پردازد.

۲-۱- شناسایی ساختار شبکه

یک شبکه توزیع شعاعی نمونه با n باس در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که از آرایش شبکه مشخص است باس های یک شبکه توزیع شعاعی به سه نوع کلی تقسیم می شوند. نوع اول، باس هایی هستند که هیچ خطی از آنها خارج نمی شود. نوع دوم و سوم به ترتیب باس هایی که یک خط و بیش از یک خط از آنها خارج می شود. اساس الگوریتم شناسایی به باس های نوع اول و سوم بر میگردد که در این مقاله به آنها نقاط شروع اطلاق شده است. در آرایش آورده شده از شبکه توزیع شعاعی نیز باس های نوع اول با دایره های تو خالی یا اصطلاحا در این مقاله انتهای باز و باس های نوع سوم با دایره های توپر یا انتهای بسته نشان داده شده است.



شکل ۱: شبکه توزیع شعاعی نمونه

مرحله اول برای شناسایی ساختار شبکه، شماره گذاری باس های شبکه است. در الگوریتم پیشنهادی برای شماره گذاری، سه نکته رعایت شده است. نکته اول اینکه شماره یک به باس مبنا اطلاق می شود. نکته دوم و سوم به ترتیب به این صورت است که شماره هر خط برابر با شماره باس انتهایی آن خط است منهای یک و شماره خطوط بین دو انتهای بسته یا یک انتهای بسته و یک انتهای باز باید به ترتیب باشد. داده های هر خط نیز در یک بردار که شامل باس ابتدا ، باس انتها و مشخصات خط است، وارد می شود. در ادامه، مرحله دوم الگوریتم شناسایی ساختار شبکه به صورت گام به گام ارائه شده است.

گام اول محاسبه برداری تحت عنوان بردار اتصال است. طول این بردار با تعداد باس های شبکه برابر و تعداد شاخه های خارج شونده از هر باس، مقدار درایه متناظر با آن باس در بردار است. برای مثال بردار اتصال برای شبکه نشان داده شده در شکل (۱) برای یک طرح شماره گذاری به صورت معادله (۱) است :

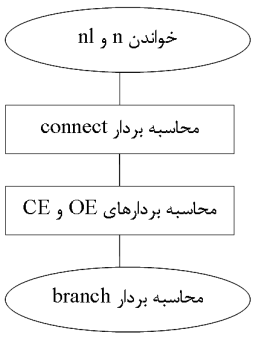
$$connect = [1\ 3\ 1\ 2\ 1\ 2\ 2\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0] \quad (۱)$$

گام دوم، تشکیل دو بردار باس های انتهای باز (OE) و انتهای بسته (CE) است. در این گام با استفاده از بردار بدست آمده از گام اول، باس های نوع یک و سه در بردارهای مربوطه قرار می گیرند.

در گام سوم از نقاط بردار OE به عنوان نقاط شروع استفاده می شود. در این گام حرکت از یک نقطه بردار OE به عنوان باس انتهای باز شروع می شود و تمام خطوط بین این باس و اولین باس انتهای بسته ای که به آن می رسد، به ترتیب در یک بردار تحت عنوان بردار شاخه ها (branch) که طول آن برابر با تعداد شاخه های شبکه است، قرار می گیرند. این گام برای همه نقاط بردار OE تکرار می شود.

در گام چهارم با استفاده از نقاط بردار CE به عنوان نقاط شروع و برداری تحت عنوان بردار شاخه ها که در گام سوم تعدادی از درایه های آن بدست آمده، نقطه ای از بردار CE انتخاب می شود که شاخه های خارج شونده از آن قبلا در ماتریس شاخه ها قرار گرفته باشد. حرکت از این نقطه شروع می شود و تمام خطوط بین این انتهای بسته و اولین انتهای بسته ای که به آن می رسد، به ترتیب در ماتریس شاخه ها قرار می گیرد. این گام تا زمانی که همه نقاط بردار CE انتخاب شوند، تکرار می شود تا اینکه همه شاخه ها با استفاده از این الگو در بردار شاخه ها قرار گیرند. بردار بدست آمده الگویی برای حرکت به عقب محاسبه جریان شاخه ها و حرکت به جلو محاسبه ولتاژ گره ها در برنامه پخش بار است. از آنجایی که جریان هر شاخه بستگی به جریان شاخه های متصل به باس انتهایی آن شاخه دارد بنابراین ایده اصلی بردار شاخه ها به این صورت است که شاخه ها باید به ترتیب وابستگی در این بردار قرار بگیرند. یعنی تعداد لایه های تعریف شده در مرجع [۱۰]، در این مقاله به نحو چشمگیری کاهش پیدا می کند و از بار جستجو کاسته می شود و چون شناسایی مستقل از برنامه پخش بار انجام می شود در نتیجه سرعت برنامه پخش بار را به صورت قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. بنابراین این بردار می تواند به عنوان نقشه ای از شبکه توزیع مورد مطالعه باشد که در مرحله دوم الگوریتم پیشنهادی یعنی برنامه پخش بار از آن استفاده می شود.

فلوچارت نشان داده شده در شکل (۲) گام به گام مراحل شناسایی ساختار شبکه را نشان می دهد.



شکل ۲: الگوریتم شناسایی ساختار شبکه

۲-۲- پخش بار

با توجه به ولتاژ داده شده در باس مبنا و با در نظر گرفتن یک پروفیل مسطح برای ولتاژهای اولیه در باس های دیگر، الگوریتم تکراری حل شامل سه گام زیر است :

گام اول : محاسبه جریان گره ای. در تکرار ام، جریان تزریقی گره ای، ، در گره ام شبکه بصورت معادله (۲) محاسبه می شود.

$$I_i^k = conj\left(S_i / V_i^{k-1}\right) - Y_i V_i^{k-1} \quad (۲)$$

بطوریکه ولتاژ گره ام محاسبه شده طی تکرار ام و توان تعیین شده تزریقی در گره ام است. مجموع عناصر موازی در گره ام است.

گام دوم : حرکت به سمت عقب : در تکرار ، شروع از خط اول واقع در بردار شاخه ها و حرکت به سمت خطوط پایانی بردار و جریان شاخه ، به صورت معادله (۳) محاسبه می شود.

$$J_L^k = -I_{n_2}^k + \sum(line\ flow\ connected\ to\ the\ L_2) \quad (۳)$$

بطوریکه جریان تزریقی در گره است.

گام سوم : حرکت به سمت جلو : ولتاژهای گره ای با شروع از گره مبنا به سمت گره های واقع در انتهای خطوط واقع در بردار شاخه ها، به ترتیب و توسط معادله (۴) محاسبه می شوند. برای هر شاخه ولتاژ در گره با استفاده از ولتاژ بدست آمده در گره و جریان شاخه محاسبه شده در حرکت به سمت عقب قبلی، محاسبه می شود.

(۴)

بطوریکه امپدانس سری شاخه است. گام های ۱، ۲ و ۳ تا زمانی که همگرایی به دست آید، تکرار می شوند.

ملاک همگرایی :

ماکزیمم عدم تطابق توان در گره های شبکه به عنوان ملاک همگرایی در نظر گرفته شده است. توان تزریق شده گره ام در تکرار ام، ، به صورت معادله (۵) محاسبه می شود.

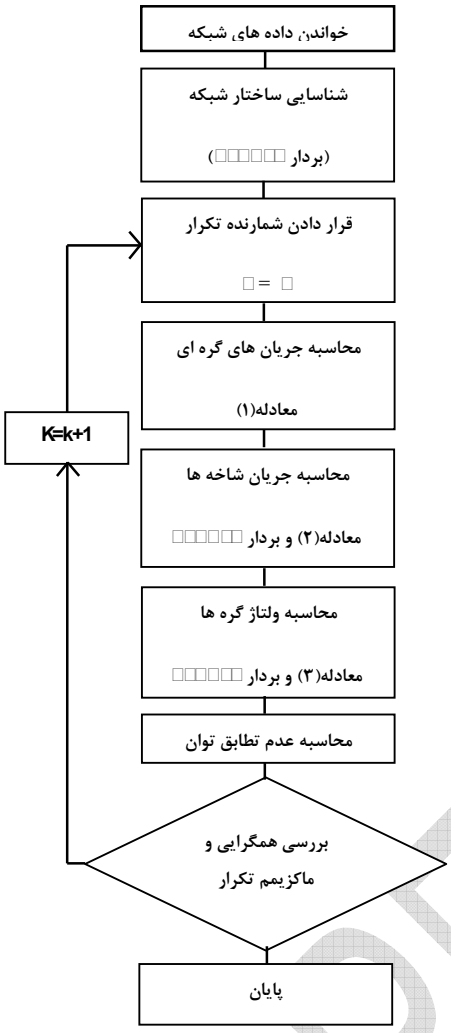
$$S_i^k = V_i^k conj(\quad (۵)$$

عدم تطابق توان اکتیو و راکتیو در باس ام به ترتیب به صورت معادله (۶) و (۷) محاسبه می شود.

$$\Delta \quad (۶)$$

$$\Delta \quad (۷)$$

فلوچارت نشان داده شده گام به گام مراحل روش پیشنهادی را نشان می دهد.

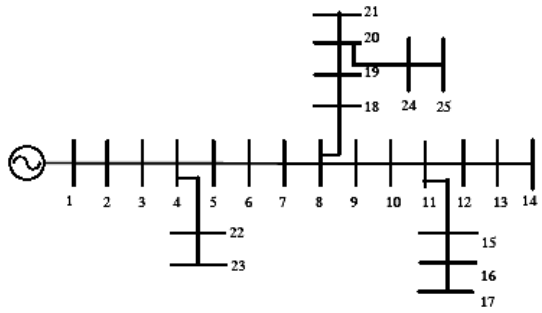


شکل ۳: الگوریتم پیشنهادی حل پخش بار شبکه های توزیع شعاعی

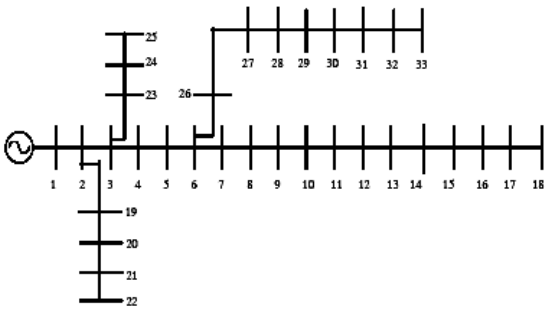
۳- نتایج

روش پیشنهادی با استفاده از پیاده سازی و روی کامپیوتر ، ، تست شده است. راندمان محاسباتی رویکرد ارائه شده با استفاده از شبکه های توزیع شعاعی ۲۵، ۳۳ و ۶۹ باس که به ترتیب در شکل های (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده، تست شده است. مشخصات این شبکه های توزیع شعاعی در [۹] آورده شده است. برای نشان دادن دقت روش پیشنهادی، پروفیل ولتاژ بدست آمده برای هر یک از شبکه ها به ترتیب در شکل های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده و همچنین برای نمایش میزان همگرایی در جدول (۱) مقایسه ای صورت گرفت.

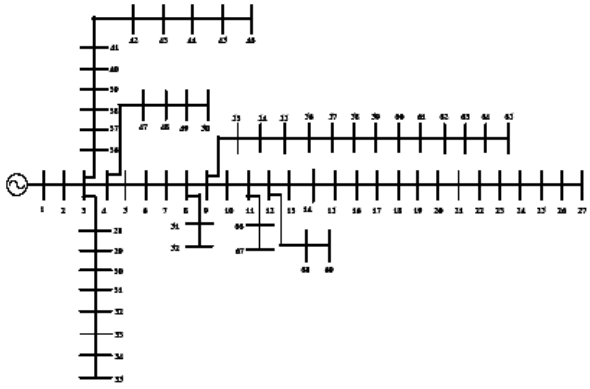
APSRC2016



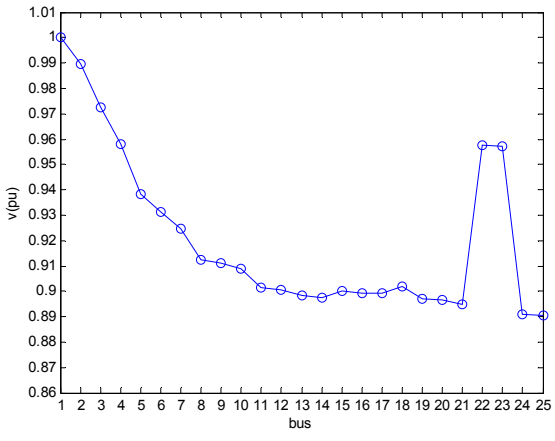
شکل ۴: شبکه توزیع شعاعی ۲۵ باس



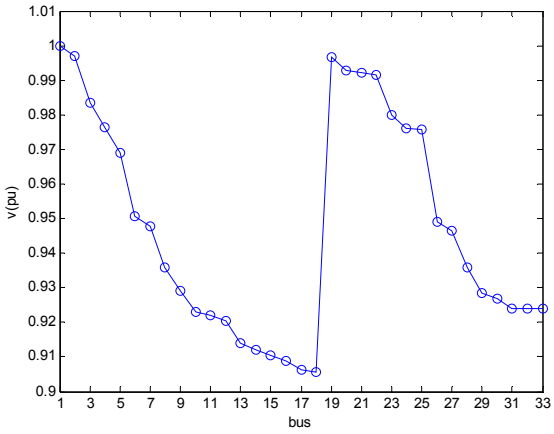
شکل ۵: شبکه توزیع شعاعی ۳۳ باس



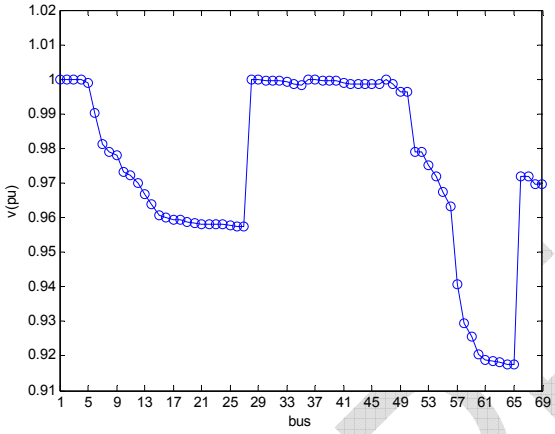
شکل ۶: شبکه توزیع شعاعی ۶۹ باس



شکل ۷: پروفیل ولتاژ شبکه توزیع شعاعی ۲۵ باس



شکل ۸: پروفیل ولتاژ شبکه توزیع شعاعی ۳۳ باس



شکل ۹: پروفیل ولتاژ شبکه توزیع شعاعی ۶۹ باس

میزان همگرایی روش پیشنهادی و روش های موجود[۷] و [۹] مقایسه شده و جزئیات آن برای هر کدام از شبکه های توزیع شعاعی در جدول(۱) آورده شده است.

جدول ۱: مقایسه سرعت روش پیشنهادی با روش های موجود

سیستم ۳۳	زمان CPU	روش پیشنهادی	۰,۰۱۶
		روش ارائه شده در [۷]	۰,۰۷۸
		روش ارائه شده در [۹]	۰,۱۱۰
سیستم ۲۵ باس	زمان CPU بر حسب ثانیه	روش پیشنهادی	۰,۰۱۶
		روش ارائه شده در [۷]	۰,۰۷۸
		روش ارائه شده در [۹]	۰,۱۱۰

APSRC

۰,۰۴۷	روش ارائه شده در [۷]	زمان CPU بر حسب ثانیه	سیستم ۶۹ باس
۰,۱۱۰	روش ارائه شده در [۹]		
۰,۰۱۶	روش پیشنهادی		
۰,۰۴۷	روش ارائه شده در [۷]		
۰,۱۱۰	روش ارائه شده در [۹]		

۴- نتیجه گیری

یک رویکرد جدید برای تجزیه و تحلیل پخش بار شبکه توزیع شعاعی بدون نیاز به شماره گذاری خاص و دارای سرعت بالا پیشنهاد و با جزئیات در این مقاله توصیف شده است. اهمیت این روش، ساده و آسان بودن آن به خاطر شناسایی هوشمند و همچنین سریع برای مطالعات بهینه سازی است چون شناسایی کاملا مستقل از برنامه پخش بار انجام می شود و کافیست یک بار ساختار شبکه شناسایی شود. راندمان محاسباتی و سرعت روش پیشنهادی با استفاده از شبکه های توزیع شعاعی ۲۵، ۳۳ و ۶۹ باس تست شده است. مقایسه بین روش پیشنهادی و روش های موجود، سرعت و دقت روش پیشنهادی را بر حسب زمان پردازنده برای شبکه های توزیع شعاعی با اندازه و آرایش مختلف تضمین می کند.

مراجع

[۱] S. Iwamoto, Y. Tamura, "A load flow calculation method for ill-conditioned power systems," IEEE Transactions on Power apparatus and Systems, Vol. ۱۰۰, No. ٤, pp. ۱۷۳٦-۱۷٤۳, ۱۹۸۱.

[۲] S. C. Tripathy, G. Durgaprasad, O.P.Malik, G.S.Hope, "Load flow solutions for ill-conditioned power systems by a Newton like method," IEEE Transactions on Power apparatus and Systems, Vol. ۱۰۱, No. ۱۰, pp. ۳٦٤۸ ۳٦٥۷،۱۹۸۲.

[۳] D. Rajicic, Y. Tamura, "A modification to fast decoupled power flow for networks with high R/X ratios," IEEE Trans. on Power System, Vol. ۳, No. ۲, pp. ۷٤۳-۷٤٦, ۱۹۸۸.

[٤] W. H. Kersting, D. L. Mendive, "An application of ladder network theory to the solution of three phase radial load flow problem" IEEE PES winter meeting, New York, Jan. ۱۹۷٦.

[٥] W. H. Kersting, "A method to teach the design and operation of a distribution system," IEEE Transactions on Power apparatus and Systems, Vol. ۱۰۳, No. ۷,pp. ۱۹٤٥-۱۹٥۲, ۱۹۸٤.

[٦] R. A. Stevens, D. T. Rizy, S. L. Purucker, "Performance of conventional power flow routines for real time distribution automation application" Proceedings of ۱۸th southeastern symposium on system theory, pp. ۱۹٦-۲۰۰, April ۱۹۸٦.

[۷] S. Ghosh., D. Das, "Method for load flow solution of radial distribution network," IEE Proc.- Generation Transmission and Distribution Vol. ۱٤٦, No. ٦, pp. ٦٤۱-٦٤۸, ۱۹۹۹.

[۸] Rakesh Ranjan, D. Das, "Simple and efficient computer algorithm to solve radial distribution networks," Electric power components and systems, Vol. ۳۱, No. ۱, pp. ۹٥-۱۰۷, ۲۰۰۳.

[۹] K. V. Kumar, M. P. Selvan, "A simplified approach for load flow analysis of radial distribution network with embedded generation," IEEE Region ۱۰ Conference, ۱۹-۲۱ Nov. ۲۰۰۸ Page(s): ۱ – ٦

[۱۰] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo,"A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. ۳, No. ۲, pp. ۷٥۳-۷٦۲, ۱۹۸۸.

APSRE2016