

KNO-0903-3702

پخش بار احتمالی با حضور خودروهای هایبریدی

آزاد رحیمی^۱ a-rahimi@tvu.ac.ir^۱ هیئت علمی، دپارتمان مهندسی برق دانشگاه فنی و حرفه ای کردستان، ایران

چکیده: با افزایش آلاینده‌های هوا و اتمام سوخت‌های فسیلی، نیاز به انرژی‌های تجدیدپذیر و خودروهای برقی بیش از پیش افزایش یافته است. در این میان بهره‌برداری از مزارع خورشیدی و بادی، به دلیل توانایی تولید بیشتر، مقبولیت عام‌تر و مقرون به صرفه‌تر بودنشان از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. با ورود تجهیزات مصرفی نظیر خودروهای هایبریدی، پخش بار احتمالی پیچیده‌تر خواهد شد. در این مقاله، یک الگوریتم پیشنهادی در پخش بار احتمالی به عنوان اساس مطالعات و برنامه‌ریزی در سیستم‌های قدرت به کار گرفته شده است جهت ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، پخش بار احتمالی در دو شبکه انتقال و توزیع با استفاده از تحلیل‌های متفاوت در شبکه‌های تست با ابعاد مختلف در نظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی گستره کاربرد الگوریتم پیشنهادی در شبکه‌های تست مختلف، تولید احتمالی توربین‌های بادی در شبکه‌های انتقال و مدل احتمالی شارژ خودروهای هایبرید در شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شده است. الگوریتم ارائه شده، بر اساس پارامترهای محاسباتی بهینه با کمترین تعداد نمونه تصادفی ورودی می‌تواند اطلاعات بسیار دقیقی از احتمال خروجی‌های مورد نظر در اختیار قرار دهد. الگوریتم پیشنهادی در این مطالعه، قادر به پوشش دهی بخشی از محدودیت‌های روش‌های محاسبات پخش بار ارائه شده در مطالعات پیش از این می‌باشد.

واژگان کلیدی: پخش بار احتمالی، خودروهای هایبرید، توربین‌های بادی، تابع چگالی احتمال

۱. مقدمه

می‌کنیم. در پخش بار از آنجا که حتی مدت زمان‌های کوتاه (چندین دقیقه) مدت پایدار محسوب می‌شود لذا معادلات فازوری پخش بار متداول می‌باشد. [۵ و ۳].



شکل ۱: جایگاه خودروهای هابیریدی در سیستم قدرت

تحلیل شبکه قدرت به صورت حالت پایدار، حاصل ساده سازی‌های بسیار و صرف نظر کردن از بسیاری از پارامترهای متغیر در شبکه می‌باشد. صرف نظر کردن از پارامترهایی احتمالی بودن تولید منابع پراکنده، خطاهای احتمالی در اندازه گیری و حفاظت، حوادث غیر مترقبه و نوسانات بارها متناسب با الگوی رفتار احتمالی آنها در شبکه که عمدتاً به صورت احتمالی می‌باشند تحلیل‌های شبکه را با مشکل مواجه می‌کنند. بنابراین باید تحلیلی مورد بررسی قرار گیرد که بتواند پخش بار شبکه را در حضور پارامترهای فوق انجام دهد. این نوع تحلیل را با عنوان پخش بار احتمالی شبکه قدرت در نظر می‌گیرند [۴].

۲. ضرورت پخش بار احتمالی در شبکه‌های مدرن

پخش بار احتمالاتی ابزاری مناسب برای ارزیابی کارایی سیستم قدرت در محدوده کاری محتمل آن است. با تعریف متغیرهای ورودی تصادفی پخش بار، امکان تعیین رفتار احتمالاتی متغیرهای خروجی فراهم خواهد شد. پخش بار احتمالاتی با تأمین کردن اطلاعاتی در نقاط کار متنوع سیستم قدرت، دارای کاربرد وسیعی در مطالعات طراحی سیستم قدرت است [۵].

با حضور تولیدات پراکنده و انرژی‌های نو در شبکه‌های توزیع و انتقال، بررسی مطالعه رفتار شبکه را پیچیده تر کرده است. با در نظر گرفتن تولید پراکنده به عنوان یک مولد توان، بررسی

پخش بار با فراهم آوردن اطلاعاتی چون ولتاژ باس‌ها و توان عبوری از خطوط یکی از مهم ترین ابزارها برای آنالیز و تحلیل عملکرد سیستم قدرت است. ورودی‌های پخش بار ساختار شبکه، بار باس‌ها و مشخصات خطوط است که همگی مقادیر ثابتی دارند. از آنجا که شرایط سیستم قدرت به طور مداوم در حال تغییر است، برای ارزیابی شبکه تحت شرایط مختلف نیاز به اجرای پخش بارهای متعدد است. از آنجا که سیستم قدرت با نفوذ روزافزون منابع تجدید پذیر با مشخصه‌های تصادفی نظیر نیروگاه بادی و خورشیدی روبروست، نیاز به محاسبات متنوع پخش بار در نقاط کاری مختلف سیستم مطرح می‌شود. با حضور منابع، خطوط انتقال، ترانسفورماتورهای قدرت، بارها و... در شبکه قدرت، شبکه‌های توزیع با توجه به دارا بودن پتانسیل بالا در بحث بهره‌گیری از منابع تولید پراکنده، بارهای قابل کنترل، خودروهای برقی و زیرساخت‌های لازم جهت اجرای برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، توانایی استفاده اقتصادی‌تر و بهینه‌تر از منابع انرژی را دارد. تعداد و تنوع خودروهای برقی به صورت مستمر در حال افزایش است و کنترل این تجهیزات جهت عملکرد با بازده بالا به یکی از مسائل مهم تبدیل شده است. در صورتی که بتوان از برنامه‌های مدیریت بار خودروهای برقی به صورت کارآمد استفاده کرد صرفه جویی قابل توجهی حاصل می‌شود. کاهش مصرف کلی علاوه بر منافع شبکه‌های که نصیب شرکت‌های برق می‌کند باعث افزایش پایداری و قابلیت اطمینان شبکه شده، منافع زیست محیطی از طریق کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای ایجاد کرده و منافع اقتصادی زیادی برای مشتریان و کشور ایجاد می‌کند.

از سوی دیگر هموارتر شدن منحنی بار باعث کاهش از آنجا که در ادوات قدرت مقدار قابل توجهی از توان تولیدی به صورتهای مختلفی (گرما، ایجاد تزویج در سیم پیچ‌های ترانسفورماتورها، ظرفیت‌های خازنی و...) تلف می‌شود، لذا معادله تعادل تولید توان و بار، با امان‌های غیر خطی روبرو خواهد بود. بنابراین با ساده سازی معادلات پخش بار می‌توان با روش‌های عددی مرسوم این معادلات را حل کرد و پارامترهای مربوط به شین‌های بارها، شین‌های تولیدی را بدست آورد. نکته ای که در محاسبات پخش بار حائز اهمیت است [۲ و ۱]، معادلات برای حالت پایدار سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ بدین معنی که شبکه قدرت را در یک لحظه از زمان در نظر گرفته و معادلات پخش بار را برای آن نوشته و خروجی‌های پخش بار را برای آن لحظه از زمان محاسبه

پیچیدگی محاسبات را در حضور چنین منابعی در پی خواهیم داشت. تولید توان توربین‌های بادی که با تغییرات باد به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد، می‌بایست در معادلات پخش بار احتمالی مدل مناسبی و قریب به واقعی داشته باشد تا بتوان مطالعات و برنامه ریزی مناسبی از دید قابلیت اطمینان شبکه در پی داشت [۴].

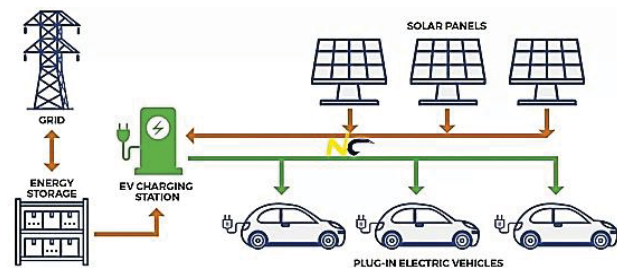
۳. پیشینه پژوهش

به طور کلی روش‌های تحلیلی بر اساس مرجع [۱۹] به دو دسته برای محاسبات پخش بار احتمالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک روش به این گونه ای است که یک الگوریتم تخمین گر حالت در نظر گرفته می‌شود. کاری که این تخمین گر انجام می‌دهد با استفاده از داده‌های آماری موجود عدم قطعیت مربوط به متغیر تصادفی را حول یک مقدار پیش بینی شده (امید) در بلند مدت در نظر گرفته می‌شود. اگر W بردار مقادیر مربوط به خروجی پخش بار باشد و h روابط غیر خطی مبتنی بر پخش بار و رفتار احتمالی متغیرهای پخش بار و X بردار حالت باشد، می‌توان تغییرات بردار خروجی پخش بار را حول امید مقادیر خروجی بدست آورد و رابطه ی آن بدین صورت تعریف می‌شود:

$$W = h(x) + n \quad (1)$$

که در این رابطه n یک بردار نویز تصادفی می‌باشد که واریانس این مقدار نشان دهنده ی تغییرات متغیرهای تصادفی حول مقدار امیدشان خواهد بود. روش دیگری که معرفی می‌شود و عمدتاً از این روش در محاسبات پخش بار استفاده می‌شود روش اصلی پخش بار احتمالی (PPF) می‌باشد. در این روش با استفاده از خود روابط پخش بار و ساده سازی آنها (روش تحلیلی) و تخمین گری (روش تخمینی) در خروجی‌های پخش بار می‌توان به جواب مسایل رسید. در مرجع [۱۹] با استفاده از خطی سازی روابط پخش بار و همچنین انجام پخش بار به روش DC با اعمال روش کانولوشن می‌توان تابع چگالی احتمال خروجی‌های پخش بار را بدست آورد. معایبی که این روش دارد ساده سازی و خطی سازی روابط پخش بار می‌باشد. در مرجع [۲۰] با استفاده از پخش بار DC که ساده شده ی معادلات پخش بار می‌باشد و با در نظر گرفتن تولید توربین‌های بادی و استفاده از تقریب در منحنی توان آن خروجی پخش بار را بدست می‌آید. در مرجع [۲۱] تأثیر ساده سازی‌های معادلات غیر خطی پخش بار را بررسی می‌کند.

تأثیر آن بر حفاظت، قابلیت اطمینان، پایداری، امنیت شبکه بسیار حائز اهمیت است. همچنین شبکه‌های مدرن، بر خلاف شبکه‌های سنتی که شارش توان از سمت نیروگاه‌های بزرگ به سمت بارها بوده است، خود بارها نیز به عنوان مولدهای توان در شبکه حضور پیدا می‌کنند. به علاوه، رفتار کاملاً تصادفی این تولیدات پراکنده باعث شده است تا پارامترهای شبکه از جمله ولتاژ بارها، توان شارش یافته بین خطوط، اندازه ی توان تولیدی باس اسلک شبکه دچار تغییرات شوند و رفتار آنها نیز احتمالی شود. حضور بارهای توان بالا همانند خودروهای هیبرید در یک منطقه ی بزرگ نیز مزید بر احتمالی بودن رفتار شبکه‌های مدرن می‌شود که باد توسط روش‌های مناسبی تحلیل و بررسی شود.



شکل ۲: اتصال خودرو به شبکه قدرت

با افزایش نیاز به خودروهای حمل و نقل با مصرف سوخت بهینه، ایده ی تجاری سازی خودروهای هیبرید مطرح شد. این خودروها دارای دو منبع سوخت فسیلی و سوخت الکتریکی می‌باشند [۲]. به دلیل ویژگی‌های خاصی که هر نوع سوخت در دینامیک خودروها دارند در مواقع مختلف از سوخت مناسب با شرایط خاصی به کار گرفته می‌شود. تأثیر خودروهای هیبرید بر شبکه قدرت در ابعاد وسیع چشمگیر خواهد بود. اگر یک منطقه ی مسکونی را در نظر بگیریم که هر خانه حداقل دارای یک خودروی هیبرید متصل به شبکه باشد، میزان توانی که کل منطقه از شبکه برق می‌گیرد بسیار چشمگیر خواهد بود [۳]. این در حالی است که بسیاری از تحقیقات پیرامون پایداری ولتاژ در شبکه‌های شعاعی در حضور خودروهای هیبرید انجام می‌شود. بنابراین حضور احتمالی خودروها در شبکه برق و اتصال یا عدم اتصال آنها به می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. همچنین نیاز به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر همانند باد و خورشید و دامن زدن به رفتار تصادفی آنها،

صادق است با این تفاوت که معادلات به صورت احتمالی خواهند بود و نیاز به تحلیل با استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی خواهیم بود. به علاوه بررسی احتمالی پخش بار به مدل واقعی بسیار نزدیک تر است.

۴.۱.۱. پخش بار در سطح انتقال

در این حالت تمام اطلاعات مربوط به مولدهای توان و بارها به صورت فشرده در یک باس مدل می‌شود و شبکه به صورت دیاگرام تک خطی ساده شده در می‌آید. به منظور انجام محاسبات پخش بار شین‌های شبکه قدرت را به سه دسته شین اصلی، شین‌های ولتاژ کنترل شده و شین‌های بار تقسیم می‌کنند که معادلات پخش بار در آنها بصورت زیر است:

$$P_j^{net} = \sum_i^{N_{aj}} P_j^i - \sum_k^{N_{aj}} P_j^k = V_j \sum_i^N Y_{ji} v_i \cos(\delta_j - \delta_i - \theta_{ji}) \quad (2)$$

$$Q_j^{net} = \sum_i^{N_{Gj}} Q_j^i - \sum_k^{N_{Dj}} Q_j^k = V_j \sum_i^N Y_{ji} v_i \sin(\delta_j - \delta_i - \theta_{ji}) \quad (3)$$

در این معادلات به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی از باس j می‌باشند. V و V_j ولتاژهای باس‌های نو می‌باشند. δ_i و δ_j زاویه i و ولتاژ باس‌های نو می‌باشند. با استفاده از روش‌های تکرار نیوتن رافسون، گوس-سایدل، پخش بار DC و... می‌توان معادلات پخش بار برای حالت مانای شبکه بدست آورد.

۴.۱.۲. پخش بار در شبکه توزیع

از آنجایی که شبکه‌های توزیع بخش کوچکی از شبکه‌های انتقال را شامل می‌شوند تحلیل پخش بار در این شبکه‌ها با شبکه انتقال به صورت جزئی تفاوت دارد. در این شبکه‌ها، بر خلاف شبکه‌های انتقال، میزان تلفات در خطوط قابل توجه می‌باشد و مقاومت خطوط توزیع در معادلات باید در نظر گرفته شود. ویژگی دیگر این شبکه‌ها در شعاعی بودن آنها است. شبکه‌های توزیع معمولاً یا از یک سو و یا از دو سو تغذیه می‌باشند. روش‌هایی که در شبکه انتقال به منظور محاسبات پخش بار انجام می‌گیرد عمدتاً

همچنین مشکل مدل کردن متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال را نیز بررسی می‌کند. در تحقیقات اخیر پیرامون موضوع پخش بار احتمالی، روش‌های مبتنی بر ضرایب کومولنت‌ها و استفاده از بسط‌های گرام-چارلییر و کورنیش-فیشره در محاسبات پخش بار به کار گرفته شده است [۲۲-۲۳]. دقت این روش به تعداد نقاط کومولنت‌ها بستگی دارد. همچنین هرچه توزیع چگالی متغیرهای تصادفی به نرمال نزدیک تر باشد، دقت محاسبات پخش بار بالاتر خواهد بود. در مرجع [۲۵] پخش بار احتمالی معرفی می‌شود و روش‌های ساده سازی معادلات به منظور محاسبات پخش بار در حضور متغیرهای تصادفی به کار برده شده است.

در مرجع [۲۶] پخش بار احتمالی در حضور بارهای وابسته به هم در نظر گرفته شده است. در این تحقیق فرضیاتی را منطبق بر روش‌های ارائه شده توسط کارهای قبلی مربوط به پخش بار احتمالی مد نظر قرار داده است از جمله اینکه پخش بار را به صورت خطی در نظر گرفته است. در این مقاله پخش بار با استفاده از روش ترکیبی کانولوشن و مونت کارلو انجام گرفته شده است. مشکلی که این روش دارد این است که روش کانولوشن بسیار زمان بر است و برای توابع احتمالی با درجه ی پیچیدگی بالا کاربردی نخواهد داشت. مرجع [۲۹] از روش تخمین نقطه ای در بدست آوردن نتایج پخش بار احتمالی استفاده می‌کند. با توجه به تعداد متغیرهای احتمالی موجود در شبکه (m)، با (m^2) بار اجرای پخش بار قطعی می‌توان اطلاعات مربوط به نتایج پخش بار را بدست آورد. مشکلی که در این روش وجود دارد این است که اگر داده‌های احتمالی ورودی به هم وابسته باشند.

۴. مبانی نظری پخش بار و تحلیل احتمالی

به منظور بررسی میزان توان تولیدی و مصرفی در شبکه قدرت، می‌توان در دو سطح مختلف پخش بار را انجام داد.

۴.۱. پخش بار در شبکه‌های قدرت

در پخش بار قطعی، معادلات پخش بار به صورت معادلات حالت در نظر گرفته می‌شود. تحلیل این معادلات بر مبنای حالت مانای سیستم قدرت می‌باشد. با استفاده از روش‌های تکرار و عددی می‌توان به جواب معادلات رسید. اما در پخش بار به صورت احتمالی متغیرها به صورت احتمالی تعریف می‌شود. روابط معادلات حالت برای پخش بار قطعی در پخش بار احتمالی نیز

۳. حرکت پیش رونده: با حرکت از گره اسلک به انتهای شبکه می‌توان ولتاژ تمامی گره‌ها را نسبت به تکرار قبل آپدیت کرد. بنابراین ولتاژ $V_{L2}(k)$ مربوط به گره i ما بلافاصله بعد از گره i ما به صورت زیر محاسبه می‌شود:

که در این رابطه $V_{L1}^{(k)}$ ولتاژ در گره $L_{L12}^{(k)}$ و Z_{L1} و L_1 به ترتیب امپدانس و جریان تزریقی شاخه i بین دو گره i و $i+1$ می‌باشد. این سه مرحله در هر تکرار محاسبه می‌شود و ولتاژ همه i گره‌ها در هر تکرار آپدیت می‌شوند. پخش بار به روش FBS زمانی همگرا می‌شود که معیار همگرایی که اختلاف بین توان تزریقی در گره i برای تکرار k به این صورت بدست می‌آید:

$$S_i^{(k)} = V_i^{(k)} \left(I_i^{(k)} \right) * - Y_i \left| V_i^{(k)} \right|^2 \quad (5)$$

بنابراین مقدار خطا برای توان اکتیو و راکتیو تزریقی در گره i را می‌توان به این صورت تعریف کرد:

$$\Delta P_i^{(k)} + j \Delta Q_i^{(k)} = \left| S_i^{(k)} - S_i \right| \quad (6)$$

با مشاهده i معیار همگرایی پخش بار پایان می‌یابد و مقادیر ولتاژ تمامی گره‌ها محاسبه می‌شود. و با توجه به روند استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و حضور روزافزون خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع و محلی، نیاز به پخش بار مجزا در شبکه‌های توزیع به منظور کنترل و بهبود قابلیت اطمینان این شبکه بسیار حس می‌شود [۹].

۵. بررسی احتمالی پخش بار در سیستم قدرت

بسیاری از پارامترهای کنترل و برنامه ریزی شبکه مانند قابلیت اطمینان، بازه i پایداری از طریق بررسی احتمالی شبکه قدرت محاسبه می‌شود. اگر معادلات پخش بار معمولی را مد نظر قرار دهیم، به منظور تحلیل پخش بار احتمالی می‌توان پارامترهای ورودی و خروجی معادلات پخش بار قطعی را به صورت احتمالی در نظر گرفت و روشهای مختلف حل معادلات پخش بار بر روی آنها پیاده سازی کرد. تحلیل احتمالی پخش بار شامل بررسی احتمالی پارامترهای زیر می‌باشد:

- پارامترهای بار سمت مصرف کننده (بارهای خانگی، صنعتی، و...)
- پارامترهای تولیدی سمت ژنراتورها و مولدها
- پارامترهای مربوط به سیستم‌های کنترل در سمت تولید و سمت مصرف کننده
- مربوط به کنترل ولتاژ، مصرف و تولید توان
- حضور و یا

قابل پیاده سازی در شبکه‌های توزیع نمی‌باشد. در بسیاری از موارد این روش‌ها واگرا می‌شوند و جواب مناسبی نمی‌دهند. به منظور محاسبه i پخش بار در شبکه توزیع، روش‌های متنوعی ارائه شده است [۵-۷]. این روش‌ها روش‌های ابتدایی محاسبات پخش بار در شبکه توزیع می‌باشند که با ساده سازی‌های زیاد و همچنین در نظر گرفتن حالت خاصی از شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. روشی که به منظور محاسبه i پخش بار در شبکه توزیع انجام می‌شود روش FBS می‌باشد [۸]. به خاطر محاسبات سریع و نسبتاً دقیق این روش از آن در محاسبات پخش بار شبکه‌های توزیع بهره می‌گیرند. از پخش بار جبرانسازی شده در شبکه‌هایی که منابع تولید پراکنده حضور دارند استفاده می‌شود. مزایای این روش نسبت به روش‌های قدیمی‌تر در امکان گسترش دادن شبکه و در نظر گرفتن بارهای مختلف از جمله خودروهای برقی، مولدهای پراکنده و ... می‌باشد.

پخش بار FBS بر مبنای قوانین KVL و KCL پایه گذاری شده است. در یک شبکه شعاعی توزیع، اگر N گره موجود باشد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که $(B=N-1)$ شاخه خواهیم داشت. ابتدای شبکه توزیع به یک شین (اسلک) که با یک منبع ولتاژ مدل می‌شود وصل است و از طریق شاخه‌ها به انتهای شبکه ختم می‌شود. بنابراین با داشتن مقدار ولتاژ در گره اسلک، و مقداردهی اولیه به سایر گره‌های شبکه توزیع در سه مرحله می‌توان ولتاژ تمام شینها را محاسبه کرد. این سه مرحله به ترتیب زیر می‌باشند: محاسبه i جریان تزریقی شین‌ها: با داشتن مقادیر بارها در هر گره i جریان تزریقی $I_i(k)$ در تکرار k ام را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$(4)$$

$$I_i^{(k)} = \left[\frac{P_i + jQ_i}{V_i^{(k-1)}} \right] = Y_i V_i^{(k-1)}$$

که در آن P_i و Q_i بار اکتیو و راکتیو در گره نمی‌باشند، $V_i(k-1)$ ولتاژ آپدیت شده در تکرار

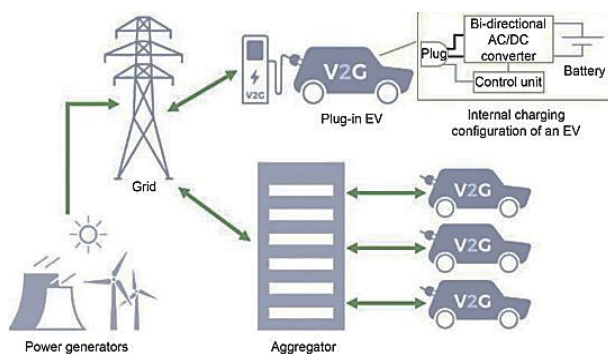
۱ - Y_i ادمیتانس شانت یا موازی در گره i می‌باشد.

۲. حرکت عقب رونده: برای هر تکرار از آخرین شاخه‌ها و گره‌ها تمام جریان‌های بارها جمع می‌شوند و جریان تزریقی گره اسلک بدست می‌آید.

P_{wf} توان تولیدی مزرعه ی بادی، P توان نامی آن، با سرعت نامی باد که مزرعه ی بادی می تواند توان تولید کند، V_{cutin} و V_{cutout} به ترتیب سرعت باد در لحظه ی قطع از پایین و بالا می باشد.

۵.۲. بررسی احتمالی حضور خودروهای برقی

در یک شبکه توزیع می تواند تعداد قابل توجهی خودروی برقی به صورت احتمالی از برق به منظور شارژ باتری خودرو استفاده نماید. توانی که خودروهای برقی در پارکینگ یا محل شارژ گیری از شبکه دریافت می کنند می تواند باعث کاهش شدید ولتاژ در برخی مناطق شود [۲۰]، به علاوه اینکه در شبکه های توزیع این خودروها شارژ می شوند.



شکل ۳: اتصال خودرو به شبکه قدرت بصورت V2G

اتصال خودرو به شبکه (Vehicle to grid) بیانگر سیستمی است که در آن خودروهای برقی قابل شارژ توانایی مخابره اطلاعات با شبکه برق را در راستای ارائه توان الکتریکی (دشارژ)، یا تنظیم میزان شارژ خودرو دارند. بنابراین شرایط برای جبران سازی میزان توان مصرفی دشوار می باشد. در مورد رفتار احتمالی خودروهای برقی مدل بسیار دقیقی در دسترس نیست [۱۰]. مدلهایی که از رفتار احتمالی خودروهای هیبرید در دست است شامل بررسی راندمان قسمت الکتریکی خودرو نسبت به کل سیستم قدرت خودرو می باشد.

عدم حضور خطوط حامل انرژی برق و تغییرات پارامترهای آنها بر اساس شرایط جوی و محلی پارامترهای مربوط به تلفیق انرژی های نو در شبکه توزیع و انتقال پارامترهای مربوط به حضور خودروهای برقی در ابعاد وسیع در شبکه حضور خودروهای برقی و تولید احتمالی توربین های بادی، به عنوان یکی از مهمترین منابع تولید پراکنده، در شبکه برق از جمله مواردی است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۰، ۱۱]. همچنین حضور خودروهای هیبرید و رفتار احتمالی شارژ آنها در ایستگاه های شارژ نیز جزو مواردی است که در تحقیقات اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

۵.۱. رفتار احتمالی توربین های بادی در شبکه قدرت

با توجه به رفتار احتمالی سرعت باد، توان تولیدی توربین های بادی به صورت تصادفی تغییر می کند. مدل های متنوعی از مدلسازی سرعت باد و توان تولیدی توربین های بادی پیشنهاد شده است [۱۲]. معمولا سرعت باد را با توزیع تصادفی weibull مدل می کنند. البته در بعضی موارد به منظور ساده سازی معادلات از توزیع نرمال بهره می گیرند [۱۳]. سرعت باد از تابع توزیع احتمال زیر به دست می آید:

(۷)

$$f_{V_{wf}}(v_{wf}) = \frac{\beta}{n} \left(\frac{f_{V_{wf}}}{n} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{f_{V_{wf}}}{\beta} \right)^{\beta}}$$

که در این رابطه $f_{V_{wf}}(V_{wf})$ احتمال این که باد با سرعت V_{wf} در منطقه باشد. B و n ضرایب مربوط به معادله ی weibull می باشند. بنابراین با محاسبه ی سرعت باد در محل مزرعه ی توربین های بادی می توان توان تولیدی آنها را محاسبه کرد. توان تولیدی توربین های بادی از رابطه ی زیر محاسبه می شود [۱۴].

(۸)

$$P_{wf} = \begin{cases} 0 & \\ p_r \left(\frac{v_{wf} - V_{cutin}}{v_r - V_{cutin}} \right) & \\ p_r & \end{cases}$$

$$V_{wf} \leq V_{cutin} \text{ or } V_{wf} \geq V_{cutin}$$

$$V_{cutin} < V_{wf} < V_{cutin}$$

$$V_r < V_{wf} < V_{cutin}$$

داده میشود که متناسب با تغییرات WEV می باشد. راندمان خودروی هیبرید میزان مصرف انرژی خودرو را برای واحد مسافت مایل (نشان می دهد و به صورت زیر تعریف می شود:

(۱۱)

$$n_{PHEV} = \alpha_E (W_{EV})^{\beta_E}$$

ضرایب α_E و β_E وابسته به مشخصه های خودروی هیبرید می باشد. یک خودروی هیبرید در طول مدت یک روز می تواند دفعات متعددی عمل شارژ را انجام دهد. با توجه به رفتار تصادفی خودروی هیبرید می توان مسافتی را که در طول یک روز طی می کند را به صورت توزیع لگاریتمی بیان کرد [۲۳]. اگر مسافت طی شده در طول روز توسط خودروی هیبرید M_d باید می توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

$$M_d = e^{(\mu_m + \sigma_m \cdot N)} \quad (12)$$

در این رابطه N متغیر تصادفی نرمال استاندارد می باشد. پارامترهای توزیع لگاریتم طبیعی را می توان با محاسبه ی میانگین و انحراف معیار متغیر M_d محاسبه نمود:

(۱۳)

$$\mu_m = \ln \left(\frac{\mu_{M_d}^2}{\sqrt{\mu_{M_d}^2 + \sigma_{M_d}^2}} \right)$$

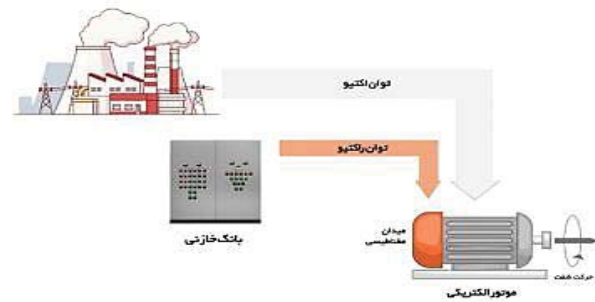
$$\sigma_m = \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\mu_{M_d}^2}{\sigma_{M_d}^2} \right)}$$

با داشتن راندمان مصرف انرژی خودروی هیبرید به ازای هر مایل (η_{PHEV}) و مسافت طی شده در طول روز، می توان میزان انرژی مورد نیاز برای شارژ دوباره ی خودروی هیبرید DE را محاسبه کرد:

(۱۴)

$$D_E = \begin{cases} C_B, & M_d \geq M_E \\ M_d, E_m & M_d < M_E \end{cases}$$

ME بیشترین مسافتی می باشد که یک خودروی هیبرید می تواند در حالت الکتریکی طی کند و به صورت زیر محاسبه می شود:



شکل ۴: تبادل انرژی در اتصال خودرو هی بری دی به شبکه

رفتار احتمالی شارژ خودروهای هیبرید شامل پارامترهای مختلفی می باشد که در این پروژه به تعدادی از آنها پرداخته می شود [۱۰] شرایط کار کرد را می توان برای خودروی هیبرید تعریف کرد که نشان دهنده ی میزان کل انرژی مصرف شده توسط باتری و کل انرژی ورودی به منظور حرکت خودرو می باشد. شرایط کار کرد WEV به صورت زیر تعریف می شود:

(۹)

$$W_{EV} = \left(1 + \frac{P_E}{P_B} \right)^{-1}$$

در این رابطه، PE و PB به ترتیب کل توان ورودی به سیستم حرکت (سیستم احتراق داخلی و سیستم الکتریکی و توان مورد نیاز به منظور تحریک قسمت الکتریکی می باشد. شایان ذکر است که این پارامتر برای خودرویی که در محل شارژگیری در حال شارژ است صفر و برای خودروی برقی با باتری این مقدار ۱ می باشد. و ظرفیت کل باتری خودروی هیبرید CB یکی از پارامترهای کلیدی می باشد که در عملکرد و مسافت رانندگی خودرو تأثیر به سزایی دارد. ظرفیت باتری می تواند با شرایط کارکرد باتری تقابل داشته باشند. بنابراین می توان این دو پارامتر را به صورت پارامترهای وابسته نشان داد. ماتریس کوواریانس C ضرایب کوواریانس و واریانس این دو پارامتر را نشان می دهد.

(۱۰)

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_{W_{EV}}^2 & M \\ M & \sigma_{C_B}^2 \end{bmatrix}$$

در این رابطه $\sigma_{W_{EV}}^2$ و $\sigma_{C_B}^2$ به ترتیب واریانس های دو متغیر WEV و CD می باشند. ضریب M ضریب کوواریانس بین این دو متغیر می باشد. راندمان یک خودروی هیبرید با η_{PHEV} نمایش

(۱۵)

محدودیت‌های سرویس دهی در ایستگاه شارژ و ظرفیت باتری بستگی دارد. بنابراین زمان T را به یک بازه $[T_{min}, T_{max}]$ محدود می‌کنند که به صورت زیر تعریف می‌شود:

(۱۹)

$$T = \begin{cases} T_{min}, & T \geq T_{min} \\ -T_{min} \cdot \ln(U) & T_{min} < T < T_{max} \\ T_{max}, & T \geq T_{max} \end{cases}$$

با توجه به اینکه تنها سه نوع شارژ باتری‌های PHEV موجود می‌باشد (آهسته، متوسط، سریع برای مشتری‌ها مطلوب این است که باتری‌های خود را در مدت زمان کوتاهی با شارژ بیشتری شارژ کنند (شارژ نوع ۳). البته محدودیت‌های بسیاری می‌تواند روی نوع شارژ خودروها تأثیر گذار باشد که از جمله‌ی آن محدودیت زمان مشتریان و ظرفیت شبکه توزیع می‌توان نام برد. در این پروژه از شارژرهای سطح ۱ و ۳ استفاده می‌کنند [۱۵]. سطح ولتاژ و جریان نامی این شارژرها مشخص می‌باشد. بنابراین با دانستن نوع شارژر می‌توان متوسط جریان شارژ خودروی هیبرید را توسط رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$I = \min \left\{ \frac{D_E}{V \cdot T}, I_{max} \right\} \quad (20)$$

در این رابطه V و I_{max} مشخصه‌های الکتریکی شارژر می‌باشند.

در نهایت برای تعداد کل n خودروی هیبرید که در ایستگاه شارژ خودروی برقی شارژ می‌شوند می‌توان کل شارژ شده توسط خودروها را از رابطه‌ی زیر بدست آوردن

$$P = \sum_{i=1}^n V \cdot I_i \quad (21)$$

در این رابطه P توان کل شارژی خودروهای هیبرید، I_i جریان شارژی توسط تامین خودروی برقی می‌باشد.

۶. پخش بار احتمالی و معادلات حاکم بر آن

اگر در معادلات پخش بار قطعی، ورودی و خروجی معادلات را به گونه‌ای چینش کرد که این معادلات به صورت نشان داده شده در رابطه‌ی زیر در آیند:

$$M_E = \frac{C_B}{n_{PHEV}} = \frac{C_B}{[a_E (W_{EV})^{\beta_E}]}$$

۵.۲.۱. مدل احتمالی شارژ چند خودروی هیبرید

با استفاده از تئوری ترتیب می‌توان خودروهای هیبرید که به ایستگاه شارژ وصل هستند را مدل کرد به این صورت که مشتری‌های محل شارژگیری به ترتیب به صورت $M / M / c$ سرویس دهی می‌شوند که در این ترتیب M اول زمانی می‌باشد که مشتری وارد محل شارژگیری می‌شود و آن را می‌توان با توزیع نمایی با میانگین T نمایش داد، M دوم سرویس دهی مشتری به مشتری می‌باشد که این پارامتر را نیز با توزیع نمایی با میانگین T_u محاسبه می‌شود و c ماکزیمم مشتری‌هایی هستند که در ایستگاه شارژگیری می‌توانند به طور همزمان سرویس دهی شوند. اگر n خودروی هیبرید به صورت همزمان بخواهند با ترتیب ذکر شده شارژ شوند، یک توزیع گسسته به فرم زیر را خواهند داشت [۱۶]:

(۱۶)

$$p_n = \begin{cases} \left(\sum_{i=0}^{c-1} \frac{(cp)^i}{i!} + \frac{(cp)^c}{c!} \cdot \frac{1}{1-\rho} \right)^{-1} & n = 0 \\ \frac{(cp)^n}{n!} \cdot p_0 & n = 1, 2, \dots, c. \end{cases}$$

که در این رابطه ρ نرخ شلوغی ایستگاه می‌باشد که با رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\rho = \frac{T_{\mu}}{cT_K} \quad (17)$$

می‌توان زمان سرویس دهی برای شارژ یک خودروی هیبرید را محاسبه کرد با در نظر گرفتن اینکه این مدت زمان از تابع توزیع نمایی با میانگین T_u تبعیت می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = -T_{\mu} \cdot \ln(U) \quad (18)$$

در این رابطه U یک تابع توزیع یکنواخت در بازه $(0, 1)$ می‌باشد. نکته‌ای که در اینجا باید به آن اشاره شود این است که یک خودروی هیبرید می‌تواند در یک زمان دلخواهی شارژ شود و این مدت زمان به عوامل مختلفی مانند رفتار مشتری،

۷.۱. روش پیشنهادی به زبان ریاضی

می توان روش پیشنهادی را به زبان ریاضی بیان کرد: احتمال آنکه n نمونه ی تصادفی در ناحیه ی ۳ قرار بگیرد برابر است با:

$$(۲۴)$$

$$P[X \in R] = \int_R f_X(t) dt$$

که در آن $f_X(x)$ تابع چگالی احتمال حضور n نقطه در ناحیه \mathcal{R} می باشد. انتگرال بیانگر متوسط مقدار تابع چگالی در ناحیه ی \mathcal{R} می باشد. در این جا فرض بر این است که $f_X(x)$ در ناحیه ی \mathcal{R} مقدار ثابتی داشته باشد به گونه ای که می توان گفت:

$$\frac{\kappa_j \in \mathcal{R}}{\kappa_n} \approx P[X \in \mathcal{R}] = \int_{\mathcal{R}} f(\tau) d\tau \approx f(x) \cdot V_{\mathcal{R}} \quad (۲۵)$$

که f تابع چگالی تخمین زده شده در نقطه ی X و $V_{\mathcal{R}}$ حجم مربوط به این ناحیه می باشد.

K_j و K_n به ترتیب ک نقاط نمونه و نقاطی هستند که در ناحیه ی \mathcal{R} می افتند. با توجه به رابطه ی قبل می توان صورت ساده تری از تابع چگالی احتمال $f(x)$ معرفی کرد

$$f(x) \approx \frac{\kappa_j \in \mathcal{R}}{\kappa_n} \cdot \frac{1}{V_{\mathcal{R}}} \quad (۲۶)$$

احتمال آن که بردار تصادفی X که از توزیع تصادفی $p(x)$ در ناحیه ی \mathcal{R} قرار بگیرد برابر است با:

$$\alpha = P[X \in \mathcal{R}] = \int_{\mathcal{R}} P(\tau') d\tau' \quad (۲۷)$$

حال اگر بخواهیم رفتار هر نمونه ی تصادفی را که در پنجره های پارزن می افتند بدست آوریم، احتمال حضور یا عدم حضور نقاط در پنجره ی پارزن را با توزیع دوجمله ای مدل می کنیم

$$P[K = v] = \binom{v}{\eta} \alpha^v (1 - \alpha)^{\eta - v} \quad (۲۸)$$

که در آن K احتمال دوجمله ای که تعداد v نقطه از η نقطه در پنجره ی پارزن قرار گیرد. برای اینکه بتوانیم تابع چگالی $P(x)$ را تخمین بزنیم دو شرط نیاز است که به آن توجه شود. بنابراین

$$\int_{\mathcal{R}} P(\tau') d\tau' \approx P(\tau) V_{\mathcal{R}} \quad (۲۹)$$

$$Y=h(x) \quad (۲۲)$$

که در این رابطه، بردار X شامل ورودی های پخش بار، اندازه ولتاژ باس های PV، توان های اکتیو و راکتیو بارها، پارامترهای خطوط و بردار Y شامل خروجی های پخش بار (زاویه ی ولتاژهای باس های PV، اندازه و ولتاژ باس های PQ میزان توان تولیدی باس اسلک) می باشد. اگر عضوهای بردار X به صورت احتمالی باشند Y نیز به تبع آن رفتاری احتمالی خواهد داشت. بنابراین روش های مختلفی ارائه شده است تا بتوانند این معادلات را تحلیل کنند.

$$Y=h(x) \quad (۲۳)$$

۷. الگوریتم پیشنهادی

روش ارائه شده در این پروژه مبتنی بر روش های غیر پارامتری می باشد که به منظور تخمین چگالی متغیرهای تصادفی استفاده می شود. از آنجایی که معادلات پخش بار احتمالی به صورت غیرخطی تعریف شده اند، به نظر می رسد که روش های غیر پارامتری با توجه به ویژگی های منحصر به فرد آنها بسیار مفید و کارآمد می باشند. از روش های غیر پارامتری زمانی استفاده می شود که اطلاعاتی از تابع توزیع احتمال متغیرهای تصادفی در اختیار نباشد. بنابراین با داشتن داده های آماری از قبل می توان مدلی از خروجی معادلات احتمالاتی تخمین زد که این مدل تخمینی به مدل واقعی و محقق بسیار نزدیک است. آقای امانوئل پارزن در سال ۱۹۶۱ میلادی ایده ای در زمینه ی تخمین چگالی احتمال متغیرهای تصادفی بر مبنای مدلی غیر پارامتری ارائه داد [۲۹]. بر اساس این روش احتمال نقاط مورد نظر به صورت میانگین احتمال رویت بردار نقاط نمونه ی تصادفی در فضای اطراف نقطه ی مورد نظر می باشد. این فضا برای متغیرهای تصادفی مستقل به صورت یک بعدی و برای متغیرهای چند متغیره، چند بعدی خواهد بود. و در این روش با در نظر گرفتن نمونه های تصادفی به دست آمده از داده های ضبط شده و با روش های محاسبات مهندسی، پنجره های پارزن حول نقاطی که چگالی آنها قرار است تخمین زده بشود در نظر گرفته می شود.

می توان ثابت کرد که مقدار تابع چگالی تخمین زده شده توسط رابطه ی (۳-۱۰) خود یک تابع توزیع احتمال می باشد:

$$(۳۴)$$

$$\forall x \exists p_{\phi}(x) \geq 0$$

$$(۳۵)$$

$$\int \hat{P}_{\phi}(u) du = \int \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^{\eta} \frac{1}{\lambda^D} \phi\left(\frac{\mu - u_i}{\lambda}\right) du = \frac{1}{\eta} \frac{1}{\lambda^D} \sum_{i=1}^{\eta} \lambda^D = 1$$

انتگرال بالا مجموع کل احتمالات نقاط موجود در پنجره های پارزن را با توجه به مقادیر تابع پنجره به ازای نقاط مختلف را بدست می آورد. از آنجایی که مجموع کل احتمالات نمونه های تصادفی برابر یک باید باشد، رابطه ی (۳-۱۲) به خوبی این مسأله را اثبات می کند. بنابراین با توجه به اثبات رابطه ی فوق می توان هر نوع از تابع پنجره ای برای نمونه های تصادفی در نظر گرفت تا بتوان تابع چگالی احتمال خروجی ها را بدست آورد.

۸. بررسی نتایج

۸.۱. محاسبه پخش بار احتمالی در سطح انتقال با استفاده

از روش پیشنهادی

به منظور محاسبه ی پخش بار احتمالی با استفاده از روش پیشنهادی به این صورت عمل می کنیم که با در نظر گرفتن تعدادی داده های تصادفی ورودی به عنوان نمونه به معادلات پخش بار و حل آنها با استفاده از روش AC، خروجی هایی بدست خواهند آمد. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ابتدا پنجره های پارزن متناسب با پراکندگی و انحراف معیار داده ها در نظر گرفته می شود. نقاطی که تابع چگالی احتمال در آن نقاط قرار است بدست آید در مرکز پنجره ها در نظر گرفته می شود و احتمال حضور نمونه های تصادفی در این پنجره ها محاسبه می شود. با محاسبه ی میانگین این نقاط می توان تابع چگالی احتمال را در نقاط مرکز پنجره ها محاسبه کرد.

به منظور ترسیم روند محاسبه ی توابع چگالی و گشتاور احتمال خروجی پخش بار احتمالی با استفاده از روش پیشنهادی فلوجارت مربوطه در شکل (۴) پیشنهاد شده است.

$P(x)$ را می توان به صورت زیر با توجه به جایگذاری رابطه ی ۳-۶ در ۳-۴ بدست آوردن

$$P(x) \approx \frac{v}{V_{\mathcal{R}}} \quad (۳۰)$$

از این رابطه این نتیجه بدست می آید که $p(x)$ به دو پارامتر محاسباتی وابسته است:

۱. η که تعداد نقاط نمونه گیری می باشد

۲. $V_{\mathcal{R}}$ که حجم پنجره ی پارزن است.

در این مطالعه، برای هر پنجره یک حجم ثابت در نظر گرفته شده است تا بتوان احتمال حضور نقاط در داخل پنجره را بدست آورد. به منظور تخمین تابع چگالی احتمال یک متغیر تصادفی در نقطه ی دلخواه، روش پیشنهادی به صورت مرحله ای در زیر معرفی شده است:

• مرحله ۱: فرض کنید ناحیه ی \mathcal{R} یک چند وجهی با D بعد و ضلع λ باشد، که $\lambda D = V_{\mathcal{R}} = D$ طول بردار تصادفی X می باشد.

• مرحله ۲: ناحیه ی \mathcal{R} به مرکز نقطه ی X در نظر گرفته می شود و v به عنوان تعداد نقاط نمونه ی تصادفی که در ناحیه ی \mathcal{R} می افتند با استفاده از رابطه ی (۳-۵) محاسبه می شود.

• مرحله ۳: یک تابع پنجره تعریف می شود که حضور هر کدام از نقاط نمونه را در این پنجره ارزیابی می کند. فرم عمومی این پنجره به صورت زیر تعریف می شود:

$$(۳۱)$$

$$\phi(u_j) = \begin{cases} 1 & |u_j - \mu| \leq \frac{1}{2} \quad j = 1, 2, \dots, D \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

خروجی این رابطه ۱ می باشد هنگامی که ما در این پنجره به مرکز μ قرار گیریم. با استفاده از این رابطه می توان به ازای تمام نقاط v ، این مقدار را محاسبه کرد:

$$v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda^D} \phi\left(\frac{\mu - u_j}{\lambda}\right) \quad (۳۲)$$

مرحله ۴: با استفاده از رابطه ی (۳-۹) می توان تابع چگالی احتمال $P \phi$ در نقطه X تخمین زد که رابطه ی آن به شکل زیر می باشد:

$$p_{\phi}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda^D} \phi\left(\frac{\mu - \mu_j}{\lambda}\right) \quad (۳۳)$$

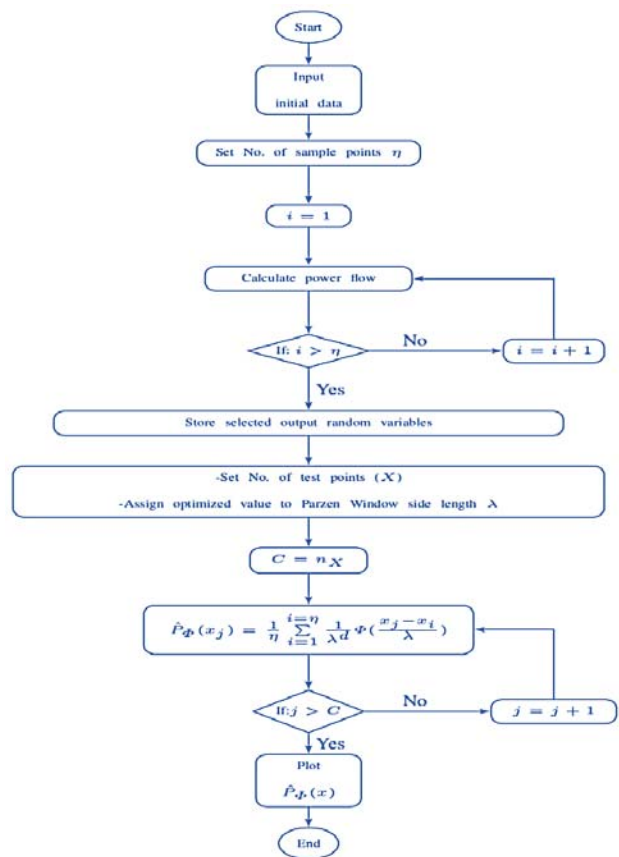
که قرار است چگالی احتمال در آن نقاط تخمین زده شود می‌باشند و با استفاده از روش هموارسازی نقاط نمونه ی محدود می‌توان چگالی احتمال را در نقاط مرکز پنجره‌ها تخمین زد.

۹. جمع‌بندی

با ورود تجهیزات مصرفی نظیر خودروهای هیبریدی، پخش بار احتمالی قیود بیشتری خواهد داشت. در این مقاله، یک الگوریتم پیشنهادی در پخش بار احتمالی به عنوان اساس مطالعات و برنامه ریزی در سیستم‌های قدرت به کار گرفته شده است جهت ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، پخش بار احتمالی در دو شبکه انتقال و توزیع با استفاده از تحلیل‌های متفاوت در شبکه‌های تست با ابعاد مختلف ارائه شد که در آن در سه مرحله پخش بار انجام می‌گیرد (محاسبه ی جریان تزریقی گره‌ها، حرکت پس رونده و حرکت پیش رونده). با انجام این عملیات بردار خروجی که شامل اندازه ی ولتاژها می‌باشد به دست می‌آید. نقاط مورد نظر را که در آن تابع چگالی احتمال قرار است محاسبه شود را در نظر می‌گیریم. با توجه به این نقاط می‌توان پارامترهای محاسباتی روش هموارسازی محدود را به دست آورده و طول پنجره ی پارزن را به مقدار بهینه برساند. بدر این روش می‌توان مقدار تابع چگالی احتمال را در نقاط مورد نظر بدست آورده و در نهایت آن را رسم کرد. بدیهی است که با داشتن تابع چگالی احتمال می‌توان گشتاورهای احتمال متغیر تصادفی مورد نظر نیز را بدست آورده و معایب روشهای پیشین تا حدی برطرف کرد.

۱۰. مراجع

- [1] M. Hollander, D. A. Wolfe, and E. Chicken, Nonparametric statistical methods: John Wiley & Sons, 2013.
- [2] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and M. A. Masoum, "Voltage profile and THD distortion of residential network with high penetration of Plug-in Electrical Vehicles," in Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES, 2010, pp. 1-6.
- [3] G. R. Cespedes, "New method for the analysis of distribution networks," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 5, pp. 391-396, 1990.



شکل ۵: فلوچارت محاسبه ی پخش بار احتمالی در شبکه انتقال

در این فلوچارت، مقادیر اولیه ی ورودی (پارامترهای خطوط انتقال، بارها، ..) و تعداد نقاط نمونه مورد نیاز برای روش پنجره ی پارزن در مرحله ی ۱ در نظر گرفته می‌شود. متعاقباً پارامترهای محاسباتی پنجره ی پارزن متناسب با نمونه‌های ورودی در مرحله ی ۲ محاسبه می‌شود. در مرحله ی ۳ عملیات تخمین تابع چگالی با استفاده از روش پیشنهادی زده می‌شود و در نهایت با در نظر گرفتن این الگوریتم برای تمام نقاطی که تخمین برای آنها زده می‌شود می‌توان تابع چگالی احتمال را محاسبه کرد.

۸.۲. محاسبه پخش بار احتمالی در سطح توزیع با استفاده

از روش پیشنهادی

منظور بررسی احتمالی پخش بار در شبکه توزیع، همانند شبکه انتقال تعدادی نقاط محدود به صورت ورودی به معادلات پخش بار در سطح توزیع می‌دهیم. با توجه به خروجی‌هایی که از معادلات پخش بار بر اساس روش FBS به دست می‌آید می‌توان پنجره‌های پارزن را تعریف کرد. این پنجره‌ها به مرکزیت نقاطی

- [16] B. Martin and J. Carlin, "Wind-Load Correlation and Estimates of the Capacity Credit of Wind Power: An Empirical Investigation," *Wind Engineering*, vol. 7, p. 79, 1983.
- [17] S. Zhao, L. Xie, and C. Singh, "Cross-correlation study of onshore/offshore wind generation and load in Texas," in 2013 North American Power Symposium (NAPS), 2013.
- [18] R. Al Abri, E. F. El-Saadany, and Y. M. Atwa, "Optimal placement and sizing method to improve the voltage stability margin in a distribution system using distributed generation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 326-334, 2013.
- [19] G. J. Anders, "Probability concepts in electric power systems," 1989.
- [20] D. Villanueva, J. L. Pazos, and A. Feijoo, "Probabilistic load flow including wind power generation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 1659-1667, 2011.
- [21] R. Allan and A. L. Da Silva, "Probabilistic load flow using multilinearizations," in *IEEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, 1981, pp. 280-287.
- [22] M. Fan, V. Vittal, G. T. Heydt, and R. Ayyanar, "Probabilistic power flow studies for transmission systems with photovoltaic generation using cumulants," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 2251-2261, 2012.
- [23] F. Ruiz-Rodriguez, J. Hernandez, and F. Jurado, "Probabilistic load flow for photovoltaic distributed generation using the Cornish-Fisher expansion," *Electric Power Systems Research*, vol. 89, pp. 129-138, 2012.
- [24] P. Zhang and S. T. Lee, "Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 676-682, 2004.
- [25] B. Borkowska, "Probabilistic load flow," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 93, pp. 752-759, 1974.
- [26] D. Silva, "Probabilistic load flow considering dependence between input nodal powers," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 1524-1530, 1984.
- [27] M. Madrigal, K. Ponnambalam, and V. Quintana, "Probabilistic optimal power flow," in *Electrical and Computer Engineering*, 1998.
- [4] D. Das, H. Nagi, and D. Kothari, "Novel method for solving radial distribution networks," *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, pp. 291-298, 1994.
- [5] W. Kersting and D. Mendive, "An application of ladder network theory to the solution of three-phase radial load-flow problems," in *IEEE Conference Paper presented at the IEEE Winter Power Meeting*, New York, 1976.
- [6] D. Shirmohammadi, H. Hong, A. Semlyen, and G. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 753-762, 1988.
- [7] H. L. Willis, *Distributed power generation: planning and evaluation*: CRC Press, 2000.
- [8] G. Li and X.-P. Zhang, "Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 492-499, 2012.
- [9] J. Slootweg and W. Kling, "The impact of large scale wind power generation on power system oscillations," *Electric Power Systems Research*, vol. 67, pp. 9-20, 2003.
- [10] T. Ackermann, *Wind power in power systems* vol. 140: Wiley Online Library, 2005.
- [11] R. Karki, P. Hu, and R. Billinton, "A simplified wind power generation model for reliability evaluation," *Energy conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 533-540, 2006.
- [12] M. Aien, M. Fotuhi-Firuzabad, and F. Aminifar, "Probabilistic load flow in correlated uncertain environment using unscented transformation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 2233-2241, 2012.
- [13] J. Morales, L. Baringo, A. Conejo, and R. Míguez, "Probabilistic power flow with correlated wind sources," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 4, pp. 641-651, 2010.
- [14] J. Usaola, "Probabilistic load flow with correlated wind power injections," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 528-536, 2010.
- [15] J. Carlin, "A theoretical model for estimating the capacity credit of wind power in the presence of correlation between wind speed and electricity demand," *Solar energy*, vol. 31, pp. 511-515, 1983.



IEEE Canadian Conference on, 1998, pp. 385-388.

[28] E. Rosenblueth, "Point estimates for probability moments," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 72, pp. 3812-3814, 1975.

[29] H. Hong, "An efficient point estimate method for probabilistic analysis," Reliability Engineering & System Safety, vol. 59, pp. 261-267, 1998.

۳۰- زندگی، آرمان، عباسی، یاسین، ۱۴۰۰، پخش بار احتمالی، پایان نامه کارشناسی مهندس برق.