

ارزیابی امنیت استاتیک سیستم قدرت در حضور عدم قطعیت با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای

حسین شریف‌زاده^۱، نیما امجدی^{۲*}، میلاد غلامی‌فرد^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۱۴	نوسانات و افزایش مداوم قیمت سوخت و آلودگی‌های زیست‌محیطی سبب روآوری به منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. با این حال، طبیعت تغییرپذیر و نامطمئن این تولیدات در کنار فشار اقتصادی ناشی از محیط بازار برق، امنیت شبکه را به مخاطره می‌اندازد. از این رو، اطلاع از وضعیت شاخص‌های امنیتی در شرایط مختلف بهره‌برداری و در نظر گرفتن اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه ضروری است. استفاده از مقدار امید ریاضی متغیرهای عدم قطعیت هنگام تحلیل امنیت سیستم قدرت، منجر به نتایجی غیرواقعی و به خطر افتادن پایایی سیستم قدرت می‌شود. روش‌های سنتی مبتنی بر تحلیل شمار زیادی سناریو، مانند روش مونت کارلو به دلیل حجم و زمان محاسبات زیاد، فاقد کارایی لازم در سیستم‌های قدرت با اندازه واقعی هستند. در این مقاله، به منظور تحلیل امنیتی سیستم قدرت، از روش تخمین نقطه‌ای استفاده می‌شود که ضمن امکان در نظر گرفتن عدم قطعیت، زمان و حجم محاسبات مطلوبی دارد. روش پیشنهادی، روی چندین سیستم قدرت نمونه و عملی آزمایش شده، توانایی آن در مدل‌سازی مناسب عدم قطعیت در زمان مطلوب نشان داده می‌شود.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۱۵	
واژگان کلیدی: ارزیابی امنیت استاتیک، انرژی‌های تجدیدپذیر، تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی، روش مونت کارلو، روش تخمین نقطه‌ای.	

۱- مقدمه

نیاز روزافزون به انرژی، روآوری به منابع جدید تولید انرژی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. گذشته از طبیعت پایان‌پذیر سوخت‌های سنتی فسیلی و روند مداوم افزایش قیمت آن‌ها، آلودگی زیست‌محیطی ناشی از این‌گونه سوخت‌ها، میزان مصرف آن را محدود می‌کند. از این رو، انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی مؤثر برای غلبه بر چالش‌های فوق به‌ویژه در بخش تولید انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. انرژی باد به دلایلی همچون پاک، ارزانی و در دسترس بودن در بسیاری از نقاط جهان به عنوان گزینه اصلی جایگزین انرژی‌های فسیلی مطرح شده است. [۱] با این حال، نوسانات همیشگی و غیرقابل پیش‌بینی بودن مقدار دقیق توان تولیدی، بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بهینه و امن از سیستم‌های قدرت را با مشکل مواجه می‌کند. [۲] برای در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید بادی در ابزارهای سنتی مدیریت سیستم‌های قدرت، بسته به نوع ابزار، از

روش‌های مختلفی مانند روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی [۳]، بهینه‌سازی استوار [۴] و روش‌های آماری استفاده می‌شود [۵].

یکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید بادی، تهدید امنیت سیستم از دیدگاه وضعیت ولتاژ و اضافه بار خطوط است که در محیط بازار برق، مورد دوم که عمدتاً به عنوان تراکم شناخته می‌شود، از اهمیت بسیار بیشتری برخوردار است. [۶] معمولاً در عمل برای پیش‌بینی وضعیت امنیت سیستم قدرت از مطالعات ناهنگام به منظور آزمایش شرایط متنوع بهره‌برداری و عکس‌العمل سیستم قدرت استفاده می‌شود. [۷] یکی از مشهورترین و پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در مهندسی، روش مونت کارلو است. در این روش، با استفاده از تعداد زیادی نمونه از متغیرهای تصادفی، تغییرات پارامترهای مورد نظر در اثر تغییرات متغیر نامطمئن بررسی و مشخصات آماری آن‌ها تحلیل می‌شود. حجم و زمان محاسبات بسیار زیاد روش مونت کارلو،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amjady@semnan.ac.ir

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

۲. استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

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

محاسبه مقادیر تابع، اعمال وزن مناسب و محاسبه گشتاورها با استفاده از این نقاط، تابع چگالی احتمال به دست می‌آید. به عبارت دیگر، به عنوان یک مزیت، روش تخمین نقطه‌ای به اطلاعات کامل در خصوص تابع چگالی احتمال نیاز ندارد و این توابع را با استفاده از چند گشتاور نخست آماری میانگین، واریانس، چولگی^۱ و کشیدگی^۲ تخمین می‌زنند. Rosenblueth مفهوم روش تخمین نقطه‌ای را اولین بار برای تحلیل عدم قطعیت متغیر تصادفی متقارن ارائه کرد و بعدها این روش برای متغیر تصادفی نامتقارن نیز توسعه یافت. با وجود این، در این روش حجم محاسبات به صورت نمایی با تعداد متغیرهای تصادفی رشد می‌کند. روش Li از نظر حجم محاسبات مورد نیاز مناسب تر است ولی در این روش، حجم محاسبات با مکعب تعداد متغیرهای تصادفی تناسب دارد که برای سیستم‌های قدرت ابعاد واقعی مناسب نیست. [۱۱] در روش Har اگرچه مقدار محاسبات به صورت خطی با تعداد متغیرهای تصادفی رشد می‌کند، برای متغیرهای تصادفی نامتقارن (از نظر آماری چولگی مخالف صفر است) قابل استفاده نیست. از آنجاکه، توان تولید بادی در بیشتر مطالعات، با چگالی احتمال ویبول (که نامتقارن است) تقریب زده می‌شود [۱۲]، این روش نیز برای تحقیق فعلی فاقد کارایی است. به دلایل ذکر شده، از روش هونگ که حجم محاسبات در آن به صورت خطی رشد می‌کند و برای متغیرهای غیرمتقارن نیز قابل اعمال است، استفاده می‌شود [۱۰].

هدف نهایی در روش‌های تخمین نقطه‌ای محاسبه گشتاورهای متغیرهای تصادفی است که با استفاده از نقاط محدودی از تابع چگالی احتمال همراه با وزن آن‌ها صورت می‌گیرد. در ادامه، نحوه محاسبه این نقاط همراه با وزن متناظر آن‌ها و نهایتاً گشتاورهای متغیر تصادفی (که هدف نهایی است) در روش هونگ شرح داده می‌شود. روش هونگ از km یا $km+1$ نقطه برای تخمین ویژگی‌های آماری متغیرهای تصادفی استفاده می‌کند که m تعداد متغیرهای تصادفی و k پارامتری است که کاربر می‌تواند آن را تنظیم کند. روش هونگ را می‌توان به ازای $k=2$ به روش $2m$ و $2m+1$ در حالت وجود یک متغیر تصادفی و همچنین n متغیر تصادفی شرح داد. با این حال، برای اختصار، فقط حالت n متغیره شرح داده می‌شود.

استفاده از آن را در سیستم‌های قدرت با ابعاد بزرگ، با مشکل جدی روبه‌رو می‌کند.

روش‌هایی مانند کامیولنت [۵] و گسسته‌سازی [۸] از جمله روش‌هایی هستند که در زمان کوتاه‌تری مشخصات آماری مورد نظر را به دست می‌آورند. با این حال، این روش‌ها نیز زمان محاسبات زیادی دارند یا به فرض‌های ساده‌کننده مسئله مانند وجود مشتق یا گوسی بودن تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی نیاز پیدا می‌کنند که کاربری آن‌ها را محدود می‌کند. برای غلبه بر این چالش‌ها، Rosenblueth روش تخمین نقطه‌ای را که نیازی به اطلاعات مشتق ندارد معرفی کرد [۹] که اگرچه حجم محاسبات بسیار کمتری نسبت به روش مونت کارلو دارد، حجم محاسبات زیاد آن با بالا رفتن تعداد متغیرهای تصادفی، استفاده از آن را در سیستم‌های قدرت محدود می‌کند.

در این تحقیق، برای غلبه بر چالش‌های فوق، روش تخمین نقطه‌ای موسوم به روش هونگ (Hong) [۱۰] استفاده می‌شود که نسبت به روش Rosenblueth مزیت‌های قابل توجهی دارد که در ادامه از نظر تئوری و همچنین با استفاده از نتایج تجربی روی سیستم‌های قدرت آزمایشی اثبات می‌شود.

ادامه مقاله به صورت زیر است:

در بخش دوم، مفهوم روش تخمین نقطه‌ای با تمرکز بر روش هونگ و در بخش سوم، چگونگی کاربرد روش تخمین نقطه‌ای در تحلیل شاخص‌های امنیتی شبکه شرح داده می‌شود. در بخش چهارم، ویژگی‌های تولید بادی به عنوان متغیر نامطمئن معرفی شده، در بخش پنجم، روش حل پیشنهادی، برای محاسبه ویژگی‌های آماری پارامترهای مهم امنیتی در اثر تغییر سطح تولید در دسترس بیان می‌شود. در بخش ششم، نتایج تجربی استفاده از روش پیشنهادی روی سیستم‌های قدرت آزمایشی ارائه شده، در بخش هفتم به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

۲- روش تخمین نقطه‌ای هونگ

هدف هریک از روش‌های تخمین نقطه‌ای محاسبه گشتاورهای متغیر تصادفی است که خود تابعی از چند متغیر تصادفی است. ایده کلیدی روش تخمین نقطه‌ای، انتخاب نقاط مناسب برای متغیرهای تصادفی و سپس محاسبه مقدار تابع مورد نظر در آن نقاط است. پس از

² Kurtosis

¹ Skewness

همان گونه که رابطه (۸) نشان می‌دهد، یکی از نقاط همواره در میانگین (μ_k) قرار دارد؛ چراکه برای این نقطه $\xi_{k,3} = 0$ دیگر $(P_{k,3})$ طبق (۷) محاسبه می‌شود.

برای متغیر k و نقطه تخمینی $x_{k,i}$ (محاسبه شده طبق رابطه (۱) یا (۴)) مقدار تابع به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{k,i} = h(\mu_1, \mu_2, \dots, x_{k,i}, \dots, \mu_n) \quad (9)$$

همان گونه که رابطه (۹) نشان می‌دهد، با استفاده از نقاط تخمینی به دست آمده، تابع مورد نظر در هریک از نقاط تخمینی مربوط به هر متغیر تصادفی (با استفاده از تابع h در تعریف $Z = h(X)$) در حالی که دیگر متغیرها در مقدار میانگین خود (امید ریاضی) ثابت نگه داشته شده‌اند، محاسبه می‌شوند. اکنون $2m$ نقطه (یا $2m+1$ نقطه) از مقدار تابع مورد نظر در دسترس است، بنابراین می‌توان گشتاورهای مختلف آن را محاسبه کرد. به عنوان مثال، می‌توان مقدار امید ریاضی متغیر تصادفی Z را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\mu_Z = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^3 P_{k,i} Z_{k,i} \quad (10)$$

که $Z_{k,i}$ از رابطه (۸) و $P_{k,i}$ وزن‌های محاسبه شده در روش هونگ هستند. دیگر گشتاورها را نیز می‌توان به راحتی محاسبه کرد که برای اختصار از بیان آن‌ها خودداری می‌شود. گشتاورهای محاسبه شده را می‌توان با گشتاورهای چگالی احتمال استاندارد مقایسه و تابع چگالی احتمال نهایی را تعیین کرد.

۳- تعریف مسئله

در این مقاله، روش تخمین نقطه‌ای ارائه شده برای ارزیابی وضعیت امنیت شبکه از دو دیدگاه ولتاژ و تراکم خطوط استفاده می‌شود. از این رو، طبق روند بهره‌برداری معمول سیستم‌های قدرت، فرض می‌شود بهره‌بردار شبکه با هدف بهینه‌کردن عملکرد سیستم قدرت با در نظر گرفتن قیود امنیتی شبکه، ابزار پخش بار بهینه (OPF^۱) را اجرا می‌کند. مسئله OPF در حالت کلی به شکل یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$\min f(x, u)$$

ابتدا روش $2m$ معرفی می‌شود. اگر کمیت تصادفی Z تابعی از متغیر تصادفی X است، به صورت $Z = h(X)$ تعریف شود، موقعیت نقاط تخمینی تابع چگالی احتمال X با استفاده از روش $2m$ به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$x_{k,i} = \mu_k + \xi_{k,i} \sigma_k, \quad i=1,2, \quad k=1,2,\dots,n \quad (1)$$

$$\xi_{k,i} = \frac{\lambda_{k,3}}{2} + (-1)^{3-i} \sqrt{n + \left(\frac{\lambda_{k,3}}{2}\right)^2} \quad (2)$$

$$P_{k,i} = \frac{1}{n} \frac{(-1)^i \xi_{k,3-i}}{\xi_k}, \quad \xi_k = 2\sqrt{n + \left(\frac{\lambda_{k,3}}{2}\right)^2} \quad (3)$$

x_i بیانگر موقعیت تمرکز i و ξ_i ها مقادیر ثابتی هستند که در روش $2m$ تعداد نقاط ۲ فرض شده است، بنابراین $i=1,2$ فرض می‌شود. پارامتر n نشان دهنده تعداد متغیرهای نامطمئن است (در اینجا معادل m است). همچنین $P_{k,i}$ نشان دهنده وزن نقاط تخمینی است که مستقیماً در محاسبه گشتاورهای تابع مورد نظر استفاده می‌شود. مقدار $\lambda_{k,t}$ نشان دهنده گشتاور مرکزی مرتبه t متغیرهای ورودی است (در اینجا توان تولیدی واحد بادی) که به ازای $t=3$ طبق رابطه (۲) مقدار کشیدگی (در روش $2m$ نیاز می‌شود) و با مقدار $t=4$ مقدار چولگی (در روش $2m+1$ نیاز می‌شود) متغیرهای تصادفی ورودی قرار داده می‌شود.

در روش $2m+1$ از سه تمرکز جهت تقریب تابع چگالی احتمال X استفاده می‌شود که یکی از تمرکزها در مقدار میانگین قرار دارد. در این روش، موقعیت نقاط تخمینی و وزن‌های متناظر با آن برابر است با:

$$x_{k,i} = \mu_k + \xi_{k,i} \sigma_k, \quad i=1,2,3, \quad k=1,2,\dots,n \quad (4)$$

$$\xi_{k,i} = \frac{\lambda_{k,3}}{2} + (-1)^{3-i} \sqrt{\lambda_{k,4} + 3\left(\frac{\lambda_{k,3}}{2}\right)^2}, \quad i=1,2 \quad (5)$$

$$P_{k,i} = \frac{1}{n} \frac{(-1)^i \xi_{k,3-i}}{\xi_k}, \quad \xi_k = 2\sqrt{n + \left(\frac{\lambda_{k,3}}{2}\right)^2} \quad (6)$$

$$P_{k,3} = \frac{1}{n} - P_{k,1} - P_{k,2} = \frac{1}{n} - \frac{1}{\lambda_{k,4} - \lambda_{k,3}^2} \quad (7)$$

$$\xi_{k,3} = 0 \quad (8)$$

^۱ Optimal Power Flow (OPF)

$$x \in X, u \in U, \xi \in \Xi$$

با مدل سازی فوق، امکان به دست آوردن تابع چگالی احتمال متغیرهای مختلف با تغییرات پارامترهای نامطمئن ورودی (در اینجا توان تولیدی واحدهای بادی) میسر می شود.

۳-۱- امنیت سیستم قدرت از دیدگاه پروفیل ولتاژ

توانایی سیستم های قدرت برای تحمل تغییرات و پیشامدها امنیت نامیده می شود. [۱۴] سیستم های قدرت معمولاً با در نظر گرفتن حاشیه امنیت مناسب برای اطمینان از توانایی تحمل پیشامدها طراحی و بهره برداری می شوند. پایش ولتاژ شین ها به عنوان جزئی از ارزیابی امنیت سیستم قدرت برای تعیین حالات خطرناک ضروری است. از آنجاکه توان واحدهای بادی در سیستم های قدرت ماهیت تصادفی دارد، تعیین دقیق اثر آن ها در وضعیت امنیت شبکه نیازمند روش های احتمالی است.

در این ارزیابی، حاشیه امنیت محدوده دامنه ولتاژ شین ها $V_m - V_{\min}$ و $V_{\max} - V_m$ مشخص می شود. در این تحلیل V_{\min} و V_{\max} به ترتیب حد بالا و حد پایین مجاز دامنه ولتاژ را مشخص می کند. همچنین V_m دامنه ولتاژ محاسبه شده با حل مسئله OPF است. با مقایسه حاشیه امنیت حد بالا و حد پایین دامنه ولتاژ می توان دریافت هرچه اختلاف این دو مقدار کم باشد، شین دارای حاشیه امنیت دامنه ولتاژ بالاتری خواهد داشت. تغییر پذیری پروفیل ولتاژ VPN ^۳ به صورت زیر تعریف می شود [۱۵]:

$$VPN(\%) = \sum_{i=1}^{N_B} (1 - V_i)^2 \times \frac{1}{N_B} \times 100 \quad (13)$$

N_B و V_i به ترتیب تعداد شین های سیستم و دامنه ولتاژ شین i است. مقدار VPN فاصله دامنه ولتاژ شین ها از پروفیل مسطح ($1 p.u.$) را اندازه گیری می کند. با توجه به معادله (۱۴) هرچه VPN به مقدار صفر نزدیک تر باشد، پروفیل ولتاژ شین ها مسطح تر است؛ چراکه صفر بودن این مقدار، به مفهوم نزدیک بودن ولتاژ شین های سیستم قدرت به مقدار مطلوب ۱ پیرونیست است.

۳-۲- وضعیت بارگذاری خطوط

خطوط انتقال انرژی به علت حد حرارتی هادی، حد آفت

$$s.t \quad g(x, u) = 0 \quad (11)$$

$$h^{\min} \leq h(x, u) \leq h^{\max}$$

$x \in R^{n_1}$ مجموعه ای از متغیرهای حالت (متغیرهای خروجی) و $u \in R^{n_2}$ مجموعه ای از متغیرهای کنترل سیستم قدرت است. متغیرهای کنترل معمولاً شامل اندازه ولتاژ شین های ژنراتوری، تنظیمات تپ ترانسفورماتور، تنظیمات تجهیزات بانک های خازنی/راکتوری و متغیرهای حالت معمولاً شامل اندازه و زاویه فازور ولتاژ شین های بار شبکه و زاویه فازور ولتاژ و توان راکتیو خروجی شین های ژنراتوری (به جز شین اسلک) است.

$f: R^{n_1} \times R^{n_2} \rightarrow R$ تابع هدف سیستم است. در مسئله OPF تابع هدف، معمولاً به صورت هزینه سوخت، مجموع تلفات توان حقیقی، شدت ناامنی شبکه، آلودگی سوختی و غیره بیان می شود. $g: R^{n_1} \times R^{n_2} \rightarrow R^m$ قید مساوی غیرخطی معادلات پخش بار است.

$h: R^{n_1} \times R^{n_2} \rightarrow R^p$ بیانگر قید نامساوی با حد پایین h^{\min} و حد بالای h^{\max} است. این قیود نشان دهنده محدوده های فیزیکی بهره برداری از تجهیزات شبکه یا قیود امنیتی سیستم قدرت است. کران این قیود با توجه به ظرفیت تجهیزات یا توسط ابزارهای تحلیل امنیت^۱ و آرایش واحدها^۲ به دست می آیند. برای مثال، برخی قیود نامساوی از جمله ظرفیت تولیدی ژنراتور، توان حقیقی عبوری از خطوط، جریان عبوری از خطوط و اندازه ولتاژ شین های باری می تواند به صورت قید در مسئله اعمال شود. با توجه به اینکه عوامل عدم قطعیت بسیاری در سیستم قدرت وجود دارد، چشم پوشی از این عوامل در مسئله OPF ممکن است منجر به پاسخ اشتباه یا غیرممکن شود. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت، فرض کنید $\xi \in R^q$ بردار چندبُعدی متغیرهای تصادفی (نشان دهنده پارامترهای عدم قطعیت سیستم قدرت) شامل تابع چگالی احتمال $\rho(\xi)$ است. با افزودن ξ در (۱۲) مسئله OPF به صورت یک مسئله بهینه سازی تصادفی می شود که خواهیم داشت:

$$\min f(x, u, \xi)$$

$$s.t \quad g(x, u, \xi) = 0 \quad (12)$$

$$h^{\min} \leq h(x, u, \xi) \leq h^{\max}$$

³ Voltage Profile Variability

¹ Security Analysis

² Unit Commitment

با:

$$f_V(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (17)$$

دو پارامتر توزیع ویبول و میانگین سرعت باد طبق معادله زیر به یکدیگر وابسته هستند:

$$\bar{v} = c, \quad \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (18)$$

در معادله فوق \bar{v} برابر با میانگین سرعت باد و Γ تابع گاما است.

داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت باد معمولاً در قالب سری‌های زمانی هستند که هر یک از نقاط داده شده، یک نمونه لحظه‌ای از سرعت باد یا میانگین سرعت باد را در یک دوره زمانی نمایش می‌دهد. در برخی موارد، داده‌های سرعت باد ممکن است در قالب توزیع فراوانی باشد. در این قالب فراوانی، سرعت باد در محدوده‌های مختلف داده شده است.

برای تعیین پارامترهای توزیع ویبول سرعت باد، روش‌های مختلفی وجود دارد از جمله روش گرافیکی و روش حداکثر احتمال. توان تولیدی توربین بادی با مکعب سرعت باد و مربع قطر پره توربین متناسب است. در ضمن هزینه سرمایه‌گذاری توربین بادی (به جز هزینه زمین) تقریباً متناسب با قطر پره است. توان استخراج شده از واحد بادی قطعاً کمتر از توان باد است. در واقع توان واحد بادی برابر با توان باد در ضریبی به نام ضریب اجراست. بیشینه مقدار ضریب اجرا که به نام ضریب بتز^۴ شناخته شده، برابر ۵۹.۳ درصد است. [۱۷] ضریب اجرا به نسبت سرعت نوک و زاویه شیب پره بستگی دارد. از این رو توان توربین بادی به صورت غیرخطی با سرعت باد تغییر می‌کند. رابطه بین سرعت باد و توان خروجی توربین بادی را می‌توان از منحنی سرعت-توان (که توسط تولیدکننده یا داده‌های تجربی فراهم می‌شود) به دست آورد. توان تولیدی واحد بادی عموماً به صورت زیر مدل می‌شود [۱۸]:

$$P_W = \begin{cases} 0 & v < v_i \\ \frac{v - v_i}{v_r - v_i} P_W^{rated} & v_i \leq v < v_r \\ P_W^{rated} & v_r \leq v < v_0 \\ 0 & v_0 \leq v \end{cases} \quad (19)$$

ولتاژ و حد پایداری از نظر توانایی انتقال توان دارای محدودیت هستند. با توجه به ظرفیت خطوط می‌توان حاشیه پایداری (SM^1) را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\text{حاشیه پایداری} = \frac{S_{max} - S_m}{S_{max}} \times 100 \quad (14)$$

در رابطه فوق S_m و S_{max} به ترتیب توان عبوری محاسبه شده از خطوط و ظرفیت خطوط است.

حاشیه قابل استفاده سیستم انتقال $TSAM^2$ طبق (۱۶) تعریف می‌شود [۱۵]:

$$TSAM(\%) = \sum_{i=1}^{N_L} \frac{S_k^{max} - S_k}{S_k^{max}} \times \frac{1}{N_L} \times 100 \quad (15)$$

در معادلات فوق N_L ، S_k و S_k^{max} به ترتیب تعداد خطوط انتقال، توان عبوری و ظرفیت خط انتقال شماره k است. مقدار $TSAM$ فضای موجود در سیستم انتقال را برای افزایش توان اضافه مشخص می‌کند.

۴- توان واحد بادی

از آنجا که مقدار توان واحدهای بادی تابع جهت و سرعت وزش باد است، توان تولیدی واحدهای بادی متغیر می‌باشد. توان خروجی واحد بادی به مدل سرعت باد و مدل توربین وابسته است. بنابراین برای مدل‌سازی توان واحد بادی باید ابتدا به مدل‌سازی سرعت باد پرداخت. توزیع ویبول^۳ یک تابع دو پارامتری است که عموماً برای تطبیق توزیع فراوانی سرعت باد استفاده می‌شود. این توزیع، نمایش مناسبی از اطلاعات سرعت باد را به منظور محاسبه انرژی آن فراهم می‌کند. [۱۶] این توزیع، عمومی‌تر از توزیع رایلی تک پارامتری است و نسبت به توزیع نرمال دومتغیره (پنج پارامتری) پیچیدگی کمتری دارد. همچنین اگر دو پارامتر توزیع ویبول را در یک ارتفاع داشته باشیم، روش‌هایی برای محاسبه این دو پارامتر در سایر ارتفاع‌ها نیز وجود دارد. تابع توزیع ویبول به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (16)$$

پارامتر c مقیاس ویبول (که واحد آن برابر با واحد سرعت باد است)، k پارامتر شکل ویبول (که فاقد واحد است) و v سرعت باد است. تابع توزیع تجمعی این توزیع برابر است

³ Weibull Distribution

⁴ Betz Coefficient

¹ Stability Margin

² Transmission System Available Margin

پیشنهادی روی سیستم ۱۱۸ شینه به عنوان یک سیستم عملی نیز آزمایش می شود.

در سیستم ۹ شینه واحد بادی با ظرفیت ۶۰ مگاوات متصل به شین هفتم است. در سیستم ۲۴ شینه، دو سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، سیستم دارای یک واحد بادی با ظرفیت ۲۰۰ مگاوات متصل به شین چهارده است. در سناریو دوم، سیستم دارای دو واحد بادی است که ظرفیت هر کدام ۱۰۰ مگاوات بوده، به ترتیب به شین های چهاردهم و هفدهم متصل هستند.

سیستم نمونه سوم، سیستم ۱۱۸ شینه IEEE بیانگر یک سیستم قدرت بزرگ است. این سیستم شامل ۱۱۸ شین، ۱۸۶ خط انتقال، ۵۴ واحد حرارتی و ۹۹ بار ثابت است. برای این سیستم نمونه نیز دو سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریو اول، سیستم دارای یک واحد بادی با ظرفیت ۵۲۵ مگاوات متصل به شین پنجاه و نهم است. در سناریو دوم، سیستم دارای سه واحد بادی است که ظرفیت هر کدام ۱۷۵ مگاوات بوده، به شین های پنجاه و نه، نود و صد و شانزده متصل است. پارامترهای توزیع ویبول سرعت باد در سیستم های قدرت فوق در جدول ۱ نشان داده است. مشخصات توربین استفاده شده در این سیستم های قدرت در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۱: اطلاعات توزیع سرعت باد

سیستم نمونه	۹ شینه	۲۴ شینه	۱۱۸ شینه
پارامتر شکل k	۲	۲	۲۰۰۲۵
پارامتر مقیاس c	۱۰	۱۰	۹

جدول ۲: مشخصات توربین های بادی

$V_0 (m/s)$	$V_r (m/s)$	$V_i (m/s)$
۲۵	۱۲	۳

مسئله پخش بار بهینه (OPF) در الگوریتم ارائه شده با استفاده از نرم افزار GAMS و سیستمی با مشخصات سخت افزاری Intel Core i5 2.4GHz, 4 GB RAM مدل سازی و اجرا شده است. روش مونت کارلو به عنوان روش مبنا از نظر دقت با استفاده از ۱۰۰۰۰ نمونه اجرا می شود. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تحلیل مونت کارلو دقت و کارایی روش های تخمین نقطه ای را نشان می دهد. خطای روش های تخمین نقطه ای به صورت زیر محاسبه می شود:

P_W توان خروجی توربین بادی، P_W^{rated} توان نامی توربین بادی، v سرعت باد، v_i سرعت قطع پایین باد، v_r سرعت نامی باد و v_0 سرعت قطع بالای باد است. از آنجا که سرعت باد یک توزیع معلوم (مثلاً ویبول) فرض می شود، تبدیل این توزیع به توزیع توان باد ضروری است. تابع چگالی احتمال توان خروجی واحد بادی را می توان با استفاده از روش تخمین نقطه ای به دست آورد. برای محاسبه تابع چگالی احتمال توان خروجی، ابتدا با استفاده از روش تخمین نقطه ای توزیع سرعت باد مدل سازی شده و با استفاده از این نقاط و وزن های متناظر آن، توزیع احتمالی توان باد به دست می آید.

۵- الگوریتم حل مسئله

برای محاسبه تابع چگالی احتمال شاخص های امنیتی معرفی شده نیاز به اجرای پخش بار بهینه به ازای نقاط تخمینی مشخصی است. مراحل محاسبه این توابع به شرح زیر است:

۱) تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی تولید بادی با استفاده از داده های تجربی یا با فرض معمول تابع ویبول و تعیین پارامترهای آن تعیین می شود.
۲) نقاط تخمینی و وزن های متناظر با هریک از متغیرهای تصادفی با استفاده از روش تخمین نقطه ای محاسبه می شود.

۳) نقاط تخمینی (مقدار تولید بادی در دسترس) در مرحله ۲ به عنوان ورودی مسئله OPF استفاده می شوند. برنامه OPF به ازای هریک از این نقاط تخمینی اجرا شده، پارامترهای مورد علاقه (VPN و $TSAM$ در این مقاله) محاسبه می شوند.

۴) گشتاورهای پارامترهای خروجی با استفاده از مقادیر به دست آمده در مرحله ۳ و وزن های نقاط تخمینی (محاسبه شده در مرحله ۲) محاسبه می شوند.

۵) تابع چگالی احتمال خروجی با استفاده از گشتاورهای به دست آمده در مرحله ۴ و مقایسه با شکل کلی پارامترهای توابع چگالی احتمال استخراج می شود.

۶- نتایج عددی

۶-۱- شرایط شبیه سازی

برای آزمایش روش پیشنهادی از دو سیستم نمونه ۹ و ۲۴ شینه، استفاده می شود. علاوه بر این دو سیستم قدرت، روش

محاسبه تابع چگالی احتمال معیارهای امنیتی VPN و $TSAM$ در روش‌های مختلف تخمین نقطه‌ای در جدول ۵ گزارش شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، زمان روش‌های تخمین نقطه‌ای به‌صورت چشمگیری از روش مونت کارلو برتر است؛ بنابراین قابلیت استفاده در سیستم‌های قدرت بزرگ و عملی را داراست. با بزرگ‌تر شدن ابعاد سیستم قدرت نمونه، برتری روش تخمین نقطه‌ای بیشتر آشکار می‌شود تا حدی که در سناریوی دوم سیستم واقعی ۱۱۸ شینه، زمان روش مونت کارلو بیش از ۸۰۰ برابر روش تخمین نقطه‌ای است.

نکته دیگر اینکه، با افزایش تعداد واحدهای تولید بادی، مزیت روش تخمین نقطه‌ای از نظر زمان و حجم محاسبات بیشتر آشکار می‌شود. بنابراین با افزایش تعداد واحدهای تولیدی، روش تخمین نقطه‌ای، روشی مقرون‌به‌صرفه برای سیستم‌های عملی به نظر می‌رسد. برای بررسی بیشتر قابلیت روش تخمین نقطه‌ای در نمایش وضعیت امنیت سیستم قدرت، نتایج به‌دست‌آمده از خروجی برنامه پخش بار بهینه، با جزئیات بیشتر منعکس می‌شود.

پروفیل میانگین و انحراف استاندارد دامنه ولتاژ شین‌ها در سناریوی دوم سیستم‌های قدرت ۲۴ شینه و ۱۱۸ شینه به‌ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. نتایج برای هر سه روش، شامل دو روش تخمین نقطه‌ای و روش مونت کارلو گزارش و ترسیم شده است.

$$\varepsilon_{\mu} = \frac{\mu_{PEM} - \mu_{MCS}}{\mu_{MCS}} \times 100 \quad [\%]$$

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{\sigma_{PEM} - \sigma_{MCS}}{\sigma_{MCS}} \times 100 \quad [\%]$$

در این رابطه، μ_{MCS} ، σ_{MCS} ، μ_{PEM} و σ_{PEM} به‌ترتیب میانگین و انحراف استاندارد تحلیل مونت کارلو و میانگین و انحراف استاندارد روش تخمین نقطه‌ای هونگ است.

۲-۶- نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در محاسبه تابع چگالی احتمال معیارهای امنیتی VPN و $TSAM$ ، میانگین (امید ریاضی) و انحراف استاندارد به‌دست‌آمده از روش هونگ و روش مونت کارلو مقایسه می‌شود. جدول‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب خطای تقریب میانگین و انحراف استاندارد متغیرهای خروجی را در روش‌های مختلف تخمین نقطه‌ای نشان می‌دهد.

همان‌گونه که جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند، هر دو روش تخمین نقطه‌ای، با دقتی مطلوب، پارامترهای خروجی موردنظر را تخمین زده‌اند. روش $2m+1$ اندکی برتری نسبت به روش $2m$ نشان می‌دهد. دقت تخمین انحراف استاندارد نسبت به تخمین میانگین نسبتاً کمتر است و این مسئله به‌دلیل محدودبودن تعداد نقاط استفاده‌شده نسبت به روش مونت کارلو در روش‌های تخمین نقطه‌ای مسئله‌ای رایج است. با این حال، این خطای قابل اغماض، با مزیت بسیار مهم زمان کم محاسبات آن جبران می‌شود. زمان لازم برای

جدول ۳- خطای تخمین میانگین برای روش‌های مختلف تخمین نقطه‌ای

در سیستم‌های قدرت نمونه

روش $2m+1$	روش $2m$	متغیر خروجی	سیستم قدرت نمونه	
0.000092	0.000064	V	سیستم ۹ شینه	
0.028576	0.099206	S_{Line}		
0.021374	0.028801	V	سناریوی اول	سیستم ۲۴ شینه
0.886182	0.823587	S_{Line}		
0.008954	0.021710	V	سناریوی دوم	
0.270700	0.928542	S_{Line}		
0.007031	0.006170	V	سناریوی اول	سیستم ۱۱۸ شینه
0.961753	1.492163	S_{Line}		
0.001669	0.002819	V	سناریوی دوم	
0.223086	0.347538	S_{Line}		

جدول ۴: خطای تخمین انحراف استاندارد برای روش‌های مختلف تخمین نقطه‌ای

روی سیستم‌های قدرت مختلف

روش $2m + 1$	روش $2m$	متغیر خروجی	سیستم قدرت نمونه		
0.307987	2.556708	V	سیستم ۹ شینه		
0.347185	1.162068	S_{Line}			
18.16890	40.10271	V	سناریوی اول	سیستم ۲۴ شینه	
8.116220	11.85057	S_{Line}			
19.35567	37.94261	V	سناریوی دوم		
14.82526	17.59960	S_{Line}			
7.404367	13.11301	V	سناریوی اول		سیستم ۱۱۸ شینه
9.408455	16.2482	S_{Line}			
6.346129	12.28645	V	سناریوی دوم		
3.422785	7.706107	S_{Line}			

جدول ۵: زمان حل مسئله OPF در روش‌های تخمین نقطه‌ای در سیستم‌های قدرت نمونه

روش مونت کارلو	روش $2m + 1$	روش $2m$	سیستم قدرت نمونه	
747.3072	17.5657	16.0681	سیستم ۹ شینه	
2152.4758	17.7841	17.4253	سناریوی اول	سیستم ۲۴ شینه
6427.3192	20.1241	18.1429	سناریوی دوم	
6200.4313	19.5001	17.2381	سناریوی اول	سیستم ۱۱۸ شینه
17985.3396	24.7417	21.6529	سناریوی دوم	

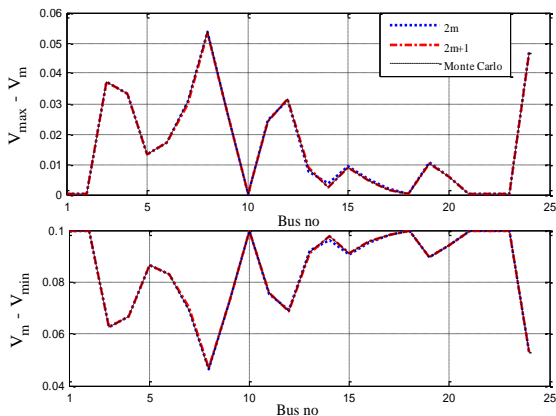
جدول ۶: احتمال خروج دامنۀ ولتاژ شین‌ها از حد بالای مجاز ولتاژ در سیستم ۱۱۸ شینه

رتبه	شماره شین	مونت کارلو	$2m + 1$	$2m$
۱	شین ۶۶	57.03142	57.03156	57.03135
۲	شین ۸۹	57.03022	57.03026	57.03010
۳	شین ۲۵	57.02906	57.02918	57.02899
۴	شین ۶۹	57.02797	57.02822	57.02781
۵	شین ۹	57.02411	57.02433	57.02401
۶	شین ۸۰	57.00997	57.01171	57.00930
۷	شین ۳۷	56.96608	56.97033	56.96319
۸	شین ۴	56.92117	56.92511	56.91938
۹	شین ۱۷	56.86541	56.86895	56.87270
۱۰	شین ۸۷	22.00119	31.20028	0.54063
۱۱	شین ۱۰۰	1.60975	0.02888	0.85147
۱۲	شین ۹۰	1.36985	0.11716	0.57906
۱۳	شین ۹۱	0.19625	0.00719	0.10935

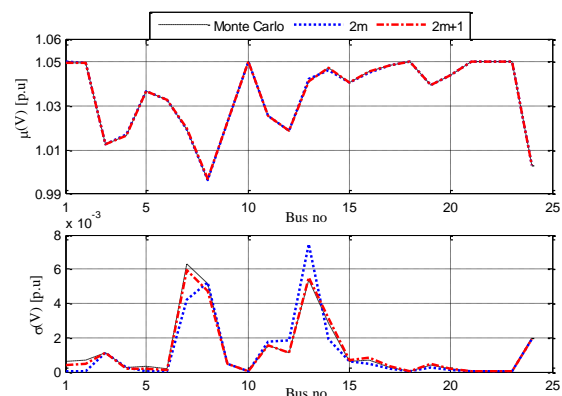
جدول ۷: شاخص VPN و $TSAM$ برای سیستم‌های قدرت مختلف

روش مونت کارلو	روش $2m + 1$	روش $2m$	متغیر خروجی	سیستم قدرت نمونه	
0.839316	0.839329	0.839306	VPN	سیستم ۹ شینه	
71.87103	71.87582	71.88784	$TSAM$		
0.149347	0.150258	0.149350	VPN	سناریوی اول	سیستم ۲۴ شینه
66.87138	67.40135	67.34082	$TSAM$		
0.149362	0.149374	0.148996	VPN	سناریوی دوم	
66.87292	66.83247	66.68722	$TSAM$		
0.177621	0.178049	0.177365	VPN	سناریوی اول	سیستم ۱۱۸ شینه
85.99095	85.98143	85.95679	$TSAM$		
0.177516	0.177637	0.177559	VPN	سناریوی دوم	
85.59880	85.59415	85.60406	$TSAM$		

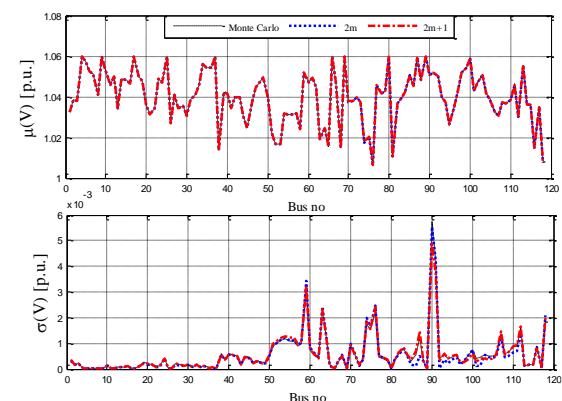
بیشترین پراکندگی دامنه ولتاژ هستند. این امر نشان‌دهنده آن است که در مجموع، به‌ازای مقادیر مختلف تحقق تولید توان بادی، شین‌های هشتم و بیست‌ویکم به‌ترتیب دارای کمترین و بیشترین دامنه ولتاژ هستند. همچنین باتوجه‌به نوسانات ولتاژ شین سیزدهم، ممکن بود به ابزار کنترل ولتاژ در این شین نیاز شود که باتوجه به اینکه از نظر میانگین ولتاژ در وضعیت مناسبی قرار دارد، این ابزار ضروری نیست. در سیستم ۱۱۸ شینه، با توجه به شکل (۲) شین هفتادوششم و شین شصت‌وششم، به‌ترتیب دارای کمترین و بیشترین دامنه ولتاژ و شین هفدهم و نودم دارای کمترین و بیشترین پراکندگی دامنه ولتاژ هستند. به طریق مشابه می‌توان در مورد وضعیت امنیت شبکه از دیدگاه ولتاژ برای این سیستم قدرت نمونه نیز بحث کرد.



شکل ۳: حاشیه امنیت حد بالا و پایین دامنه ولتاژ شین‌ها در سیستم قدرت ۲۴ شینه (سناریوی دوم)



شکل ۱: پروفیل میانگین و انحراف استاندارد دامنه ولتاژ سیستم قدرت ۲۴ شینه (سناریوی دوم)



شکل ۲: پروفیل میانگین و انحراف استاندارد دامنه ولتاژ سیستم قدرت ۱۱۸ شینه (سناریوی دوم)

باتوجه‌به شکل (۱)، شین هشتم و شین بیست‌ویکم، به‌ترتیب دارای کمترین و بیشترین دامنه ولتاژ (از نظر میانگین) و شین بیست‌وسوم و سیزدهم دارای کمترین و

حساب شود. در جدول ۶ احتمال افزایش ولتاژ از مقدار ۱.۰۶ پریونیت محاسبه شده است. از داده‌های این جدول می‌توان در ارزیابی ریسک دامنه ولتاژ استفاده کرد. در این جدول به ترتیب خطرناک‌ترین شین‌ها از دید امنیت دامنه ولتاژ مشخص شده است (رتبه در جدول ۶). همچنین جدول ۶ به صورت ضمنی دقت روش تخمین نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

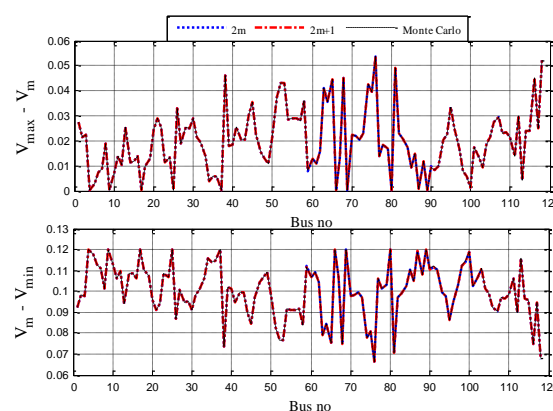
پروفیل میانگین و انحراف استاندارد توان عبوری از خطوط در سناریوی دوم سیستم‌های قدرت ۲۴ شینه و ۱۱۸ شینه در روش‌های مختلف به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. مجدداً انطباق نمودارها دقت روش تخمین نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۵) در سیستم ۲۴ شینه (سناریو دوم) خطوط بیست و سوم (خط انتقال بین دو شینه چهاردهم و شانزدهم) و نهم (خط انتقال بین دو شینه پنجم و دهم) به ترتیب دارای بارگذاری بیشتر و کمتری هستند. همچنین بیشترین و کمترین پراکندگی توان عبوری از خطوط به ترتیب در خطوط نوزدهم (خط انتقال بین دو شینه یازدهم و چهاردهم) و دهم (خط انتقال بین دو شینه ششم و دهم) رخ می‌دهد که نشان می‌دهد مقدار بارگذاری این خطوط حساسیت بالایی نسبت به مقدار تولید بادی دارند. به طریق مشابه، با توجه به شکل (۶) در سیستم ۱۱۸ شینه (سناریوی دوم)، خطوط هفتم (خط انتقال بین دو شینه هشت و نه) و نوزدهم (خط انتقال بین دو شینه چهاردهم و پانزدهم) دارای بارگذاری بیشتر و کمتری هستند. همچنین بیشترین و کمترین پراکندگی توان عبوری از خطوط به ترتیب در خطوط صد و هشتاد و سوم (خط انتقال بین دو شینه شصت و هشت و صد و شانزدهم) و صد و هشتاد و چهارم (خط انتقال بین دو شینه دوازدهم و صد و هفدهم) رخ می‌دهد.

تابع چگالی احتمال خط انتقال بین شینه ۸۹ و ۹۰ و خط انتقال بین شینه ۱۱۶ و ۶۸ در شکل (۷) نشان داده شده است. اطلاع از تابع چگالی احتمال توان عبوری خطوط، این امکان را به طراح شبکه برق می‌دهد که احتمال اضافه بار خطوط را با توجه به ظرفیت خطوط تخمین بزند.

با توجه به ظرفیت تولید بادی موجود در سیستم قدرت و همچنین ظرفیت خطوط انتقال در سیستم‌های قدرت فوق امکان اضافه بار خطوط در حالت معمول وجود ندارد. بنابراین در این پژوهش، برای بررسی وضعیت بارگذاری

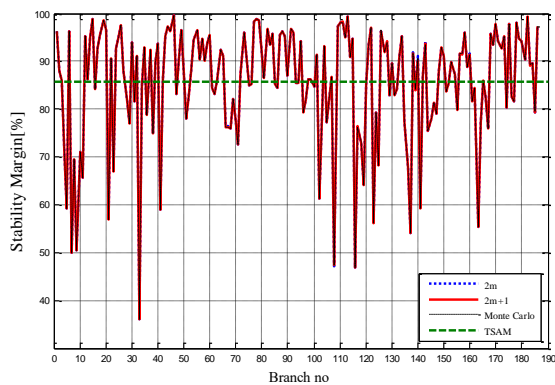
به منظور نمایش حاشیه امنیت سیستم‌های قدرت مذکور از دیدگاه ولتاژ، فاصله میانگین ولتاژ شین‌ها (به‌ازای تحقق‌های مختلف تولید بادی) از کران بالا و پایین ولتاژ در شکل‌های (۳) و (۴) نمایش داده شده است (برای سناریوی دوم در هر دو سیستم قدرت نمونه). این دو شکل نشان می‌دهند که در هر دو سیستم قدرت نمونه، سطوح ولتاژ فاصله مناسبی از حد پایین ولتاژ دارند در حالی که فاصله دامنه ولتاژ از حد بالای سطح ولتاژ مجاز در بسیاری از موارد به مقدار صفر کاهش یافته است که نشان از خطر اضافه ولتاژ در شرایط واقعی بهره‌برداری سیستم قدرت با در نظر گرفتن دیگر عوامل پیش‌بینی نشده دارد.



شکل ۴: حاشیه امنیت حد بالا و پایین دامنه ولتاژ شین‌ها در سیستم قدرت ۱۱۸ شینه (سناریوی دوم)

با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که در سیستم قدرت ۲۴ شینه (سناریوی دوم)، شین هشتم از امنیت دامنه ولتاژ بالاتر و شین بیست و یکم از امنیت دامنه ولتاژ کمتری نسبت به دیگر شین‌ها برخوردار است. باید توجه داشت در شین‌های با امنیت دامنه ولتاژ کمتر، احتمال خروج دامنه ولتاژ از حد بالای خود وجود دارد. همچنین در شکل (۴) مشاهده می‌شود که در سیستم قدرت ۱۱۸ شینه (سناریوی دوم)، شین هفتاد و ششم از امنیت دامنه ولتاژ بالاتر و شین شصت و ششم از امنیت دامنه ولتاژ کمتری نسبت به دیگر شین‌ها برخوردار است. همچنین در برخی شین‌ها (شین‌های با امنیت دامنه ولتاژ کمتر) احتمال خروج دامنه ولتاژ از حد بالای خود وجود دارد. این شین‌ها و احتمال خروج آن‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. نحوه محاسبه این احتمالات به این صورت است که پس از محاسبه گشتاورهای خروجی ولتاژ شین‌ها، تابع چگالی احتمال آن‌ها به دست می‌آید. سپس با استفاده از این تابع، احتمال قرار گرفتن ولتاژ در هر محدوده دلخواه می‌تواند

مشاهده کرد. در سیستم ۱۱۸ شینه (سناریوی دوم) خط انتقال بین شینه بیست و پنج و بیست و هفت (شاخه سی و سه) دارای کمترین حاشیه پایداری و خطوط انتقال بین دو شینه سی و پنج و سی و شش (شاخه چهل و شش) دارای بیشترین حاشیه پایداری است. با استفاده از شاخص *TSAM* مشاهده می شود که تنها از حدود ۱۴.۴۱ درصد از کل ظرفیت سیستم انتقال استفاده شده است. شاخص *VPN* و *TSAM* برای سیستم های قدرت مختلف در جدول ۷ نشان داده شده است.



شکل ۸: حاشیه پایداری خطوط انتقال سیستم ۱۱۸ شینه (سناریوی دوم)

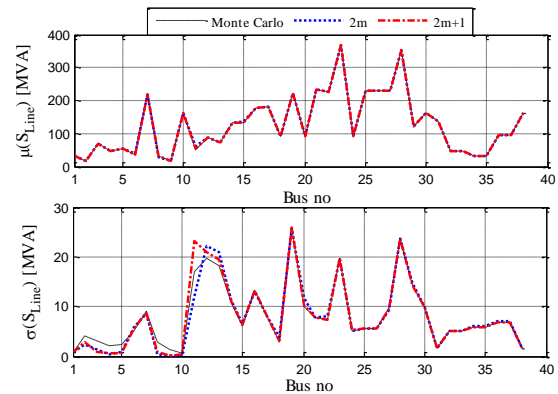
باتوجه به شکل (۸) می توان خطوط با بارگذاری بالا را مشاهده کرد. در سیستم ۱۱۸ شینه (سناریوی دوم) خط انتقال بین شینه بیست و پنج و بیست و هفت (شاخه سی و سه) دارای کمترین حاشیه پایداری و خطوط انتقال بین دو شینه سی و پنج و سی و شش (شاخه چهل و شش) دارای بیشترین حاشیه پایداری است. با استفاده از شاخص *TSAM* مشاهده می شود که تنها از حدود ۱۴.۴۱ درصد از کل ظرفیت سیستم انتقال استفاده شده است. شاخص *VPN* و *TSAM* برای سیستم های قدرت مختلف در جدول ۷ نشان داده شده است.

با استفاده از جدول ۸ می توان وضعیت امنیت شبکه را با وضعیت مطلوب بهره برداری مقایسه کرد و در صورت نیاز، اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی در نظر گرفت. همچنین نزدیکی مقادیر روش تخمین نقطه ای به مقادیر روش مونت کارلو، مجدداً دقت روش پیشنهادی را در ارزیابی امنیت سیستم نشان می دهد.

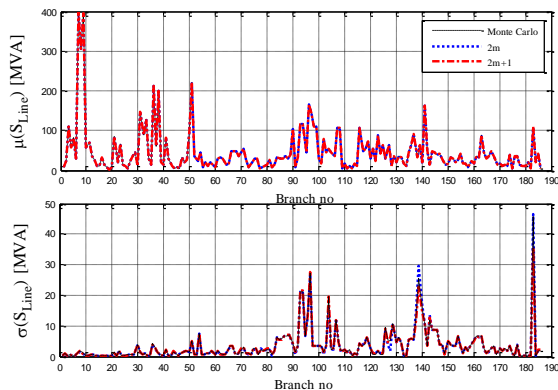
۷- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور تعیین وضعیت امنیت شبکه در حضور

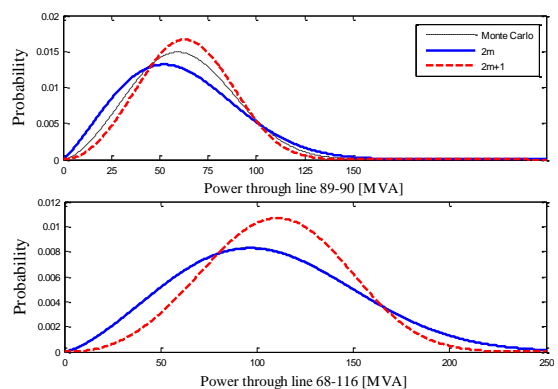
خطوط انتقال از شاخص دیگری به نام حاشیه پایداری خطوط انتقال طبق رابطه (۱۵) استفاده می شود. حاشیه پایداری خطوط انتقال سناریوی دوم سیستم ۱۱۸ شینه فوق در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این شکل حاشیه قابل استفاده سیستم انتقال (*TSAM*) توسط خط چین نشان داده شده است.



شکل ۵: پروفیل میانگین و انحراف استاندارد توان عبوری خطوط سیستم قدرت ۲۴ شینه (سناریوی دوم)



شکل ۶: پروفیل میانگین و انحراف استاندارد توان عبوری خطوط سیستم قدرت ۱۱۸ شینه (سناریوی دوم)



شکل ۷: تابع چگالی احتمال توان عبوری خطوط سیستم قدرت ۱۱۸ شینه (سناریوی دوم)

باتوجه به شکل (۸) می توان خطوط با بارگذاری بالا را

تخمین نقطه‌ای نسبت به روش مونت کارلو داشت. در گام بعدی، قابلیت روش تخمین نقطه‌ای در ارائه شاخص‌های امنیتی مناسب بحث شد. حاشیه سطوح ولتاژ از نظر فاصله از کرانه‌ها، احتمال اضافه ولتاژ، شاخص‌های *TSAM* و *VPN* همگی با استفاده از روش پیشنهادی محاسبه شده، کاربرد آن‌ها از دیدگاه بهره‌بردار سیستم قدرت شرح داده شد.

عدم قطعیت، روش تخمین نقطه‌ای پیشنهاد و قابلیت آن از دو جنبه مختلف بررسی شد. در گام نخست، با مبنا قراردادن روش مونت کارلو از نظر دقت، قابلیت تقریب مناسب روش تخمین نقطه‌ای تحلیل شد. نتایج مختلف در قالب جدول و نمودار نشان داد که روش تخمین نقطه‌ای ارائه شده با دقت مطلوبی قادر به محاسبه پارامترهای مورد علاقه است. علاوه بر دقت مناسب، مقایسه زمان مورد نیاز برای روش‌های مختلف، نشان از برتری مطلق روش

۸- مراجع

- [1] International Energy Outlook, U.S. Energy Information Administration (EIA), 2014.
- [2] European wind energy association, wind energy- the facts, earth scan, 2009.
- [3] Hamon, C., Perninge, M., & Soder, L. "A Stochastic Optimal Power Flow Problem with Stability Constraints", Part I and II, IEEE Transactions on, 28(2), 2013, PP.1839-1848.
- [4] Jiang, R., Wang, J., & Guan, Y. "Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro, Power Systems", IEEE Transactions on, 27(2), 2012, PP. 800-810.
- [5] Schellenberg, A., Rosehart, W. and Aguado, J. "Cumulant-Based Probabilistic Optimal Power Flow (P-OPF) with Gaussian and Gamma Distributions", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, 2005, pp. 773-781.
- [6] Canizares, C. A., & Kotsi, S. K. "Power system security in market clearing and dispatch mechanisms", Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2006.
- [7] Milano, F., Cañizares, C. A., & Invernizzi, M. " Multiobjective optimization for pricing system security in electricity markets", Power Systems, IEEE Transactions on, 18(2), 2003, PP. 596-604.
- [8] Kaplan, S. "On the method of discrete probability distributions in risk and reliability calculations-application to seismic risk assessment", Risk Analysis, 1(3), 1981, PP. 189-196.
- [9] Rosenblueth, E. "Point estimates for probability moments", Proceedings of the National Academy of Sciences, 72(10), 1975, PP. 3812-3814.
- [10] Hong, H. P. "An efficient point estimate method for probabilistic analysis", Reliability Engineering & System Safety, 59(3), 1998, PP. 261-267.
- [11] Morales, J. M., & Perez-Ruiz, J. "Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow", Power Systems, IEEE Transactions on, 22(4), 2007, PP. 1594-1601.
- [12] Harr, M. E. "Probabilistic estimates for multivariate analyses". Applied Mathematical Modelling, 13(5), 1989, PP. 313-318.
- [13] Amjady, N., & Sharifzadeh, H. "Security constrained optimal power flow considering detailed generator model by a new robust differential evolution algorithm", Electric Power Systems Research, 81(2), 2011, PP. 740-749.
- [14] Shahidehpour, M., Yamin, H., & Li, Z., Market Operations in Electric Power Systems, New York, NY: IEEE, 2002.
- [15] Morales, J. M., Baringo, L., Conejo, A. J., & Mínguez, R. "Probabilistic power flow with correlated wind sources", IET generation, transmission & distribution, 4(5), 2010, PP. 641-651.
- [16] Jabr, R. A., & Pal, B. C. "intermittent wind generation in optimal power flow dispatching", Generation, Transmission & Distribution, IET, 3(1), 2009, PP.66-74.
- [17] Cheng, H., Hou, Y., & Wu, F. "Probabilistic wind power generation model: Derivation and applications", International Journal of Energy, (2), 2011, PP. 17-26.
- [18] Billinton, R., & Gan, L. (1993). "Wind power modeling and application in generating adequacy assessment", In WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings., IEEE, 1993, pp. 100-106.