

پخش بار بهینه احتمالاتی به منظور تعیین قیمت‌های حاشیه‌ای محلی در حضور تولید بادی

میلااد غلامی فرد^۱، نیما امجدی^۲، حسین شریف‌زاده^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۰۱	پخش بار بهینه یکی از ابزارهای کلیدی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است؛ باوجود این، به علت استفاده گسترده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریکی بخصوص انرژی باد و ماهیت تصادفی آن، این ابزار با چالش مواجه می‌شود. عدم قطعیت حاکم بر مقدار تولید بادی در دسترس به دلیل خطای پیش‌بینی، تغییر در روش مدل‌سازی و حل مسأله پخش بار بهینه را ضروری می‌نماید. در تحقیق فعلی، قیمت‌های حاشیه‌ای محلی به عنوان یک پارامتر مهم در سیستم‌های قدرت مبتنی بر بازار در قالب یک مسأله پخش بار بهینه مدل شده و تابع چگالی احتمال آن با استفاده از یک روش تخمین نقطه‌ای جدید محاسبه می‌گردد. روش تخمین نقطه‌ای پیشنهادی، مشخصات توزیع احتمالی مورد نظر را با استفاده از چند گشتاور آنها تخمین می‌زند. این روش، علاوه بر تضمین مجاز بودن نقاط تخمینی تولید شده، به عنوان یک مزیت قابل توجه، از نظر زمان اجرا و دقت تقریب نیز به روش‌های معمول تخمین نقطه‌ای برتری محسوس دارد. کاربردهای نتایج محاسبه شده از دیدگاه عملی نیز بحث شده است. کارایی روش پیشنهادی روی سه سیستم قدرت ۹ و ۲۴ شین IEEE همراه با سیستم عملی ۱۱۸ شین IEEE آزمایش شده و برتری آن از نظر دقت و همچنین سرعت تخمین نسبت به دیگر روش‌ها نشان داده می‌شود.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۱۸	
واژگان کلیدی: پخش بار بهینه احتمالاتی، عدم قطعیت، تولید بادی، روش تخمین نقطه‌ای، قیمت حاشیه‌ای محلی.	

۱- مقدمه

سمت بهره‌برداری در مرزهای امنیتی آن سوق می‌دهد. عدم قطعیت، پیچیدگی بهره‌برداری و برنامه‌ریزی را افزایش داده و گذشته از تهدید امنیت و پایایی سیستم قدرت، هزینه‌های زیادی نیز به شبکه تحمیل می‌نماید (به عنوان مثال به دلیل خرید رزرو). از این رو تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت امروزی و استفاده حداکثر و بهینه از کنترل‌های موجود برای اطمینان از امنیت و پایایی سیستم‌های قدرت بسیار مهم است. عدم قطعیت را می‌توان به دو گروه دسته‌بندی نمود: عدم

سیستم‌های قدرت امروزی با چالش‌های جدیدی از جمله محدودیت‌های شبکه، فشار اقتصادی بازار و عدم قطعیت بالا در نتیجه رفتار غیرقابل پیش‌بینی شرکت کنندگان بازار و استفاده وسیع از انرژی‌های تجدیدپذیر مواجه می‌شوند. فشار زیست‌محیطی باعث محدودیت در توسعه شبکه و در نتیجه بارگذاری بالاتر شبکه برق می‌شود. فشار اقتصادی بازار نیز سبب اهمیت یافتن بیش از پیش عوامل اقتصادی نسبت به امنیت می‌شود و در نتیجه سیستم قدرت را به

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.sharifzade@gmail.com

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

۲. استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

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

مورد نوسانات قیمت منابع انرژی متعارف، از قبیل ذغال‌سنگ یا نفت و یا در مورد بار سیستم نیز وجود داشته باشد. با این حال، دامنه تغییر و میزان اثرگذاری آن‌ها بسیار کمتر از توان باد بخصوص در آینده است [۶]. مطالعات وسیعی برای پیش‌بینی سرعت باد مانند روش‌های منطق فازی [۷]، شبکه‌های عصبی مصنوعی [۸] و سری‌های زمانی [۹] صورت گرفته است اما همچنان خطای بالای پیش‌بینی غیرقابل اغماض است.

در مقاله پیش‌رو، اثر این خطای پیش‌بینی بر پارامتر بسیار مهم قیمت حاشیه‌ای محلی (LMP^V) با استفاده از روش پیشنهادی تخمین نقطه‌ای مطالعه می‌گردد. گفتنی است که روش مدل‌سازی وحل ارائه شده مبتنی بر تخمین نقطه‌ای در زمینه‌های مختلف دیگری مانند محاسبه توزیع و مشخصات آماری تولید ژنراتورها، محدوده‌های ولتاژ و بارگذاری خطوط می‌تواند استفاده گردد و محدود به محاسبه LMP نمی‌گردد. برای محاسبه LMP از یکی از کلیدی‌ترین ابزارهای کنترل و بهره‌برداری سیستم قدرت یعنی پخش بار بهینه (OPF^A) استفاده می‌شود که با مدل‌سازی تولید بادی با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای در ساختار آن، مدل پدیدآمده پخش بار بهینه احتمالاتی نامیده می‌شود. هدف این ابزار در این مقاله، به دست آوردن نحوه تغییر مشخصات آماری و شکل توزیع متغیر LMP با تغییر تولید بادی است.

در ادامه، ابتدا ضمن معرفی انواع روش‌های تخمین نقطه‌ای و مشکلات آن‌ها، روش پیشنهادی تخمین نقطه‌ای معرفی می‌شود. در ادامه ابزار OPF در قالب یک مساله بهینه‌سازی همراه با مفهوم LMP شرح داده می‌شود. سپس تولید بادی و پارامترهای مهم آن بحث می‌شود. بخش بعد به بیان روش حل پیشنهادی می‌پردازد. سپس نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی روی سیستم‌های قدرت نمونه ارائه می‌گردد. بخش آخر به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

قطعیت تصادفی و غیر تصادفی. عدم قطعیت تصادفی، پراکندگی پارامترهای قابل تکرار و دارای توزیع معلوم است و بنابراین مشخصات آماری آنها را می‌توان با مشاهدات گذشته به دست آورد. عدم قطعیت بار و باد در این گروه قرار دارد. عدم قطعیت غیر تصادفی، تغییر پارامترهایی است که غیرقابل تکرار هستند. از این رو مشخصات آماری آنها با نگاه به گذشته قابل حصول نیست. عدم قطعیت توسعه تولید در این گروه قرار دارد. روش‌های مختلفی برای مدیریت عدم قطعیت وجود دارد. این روش‌ها به سه دسته‌ی روش مونت‌کارلو، روش‌های تحلیلی و روش‌های تقریبی تقسیم می‌شوند [۱].

در روش مونت‌کارلو [۲] به طور تصادفی مقادیری برای متغیر ورودی عدم قطعیت تولید می‌شود و از این مقادیر برای تبدیل مدل تصادفی به مدل قطعی و حل آن استفاده می‌شود. نقص اصلی روش مونت‌کارلو، نیاز به تعداد شبیه‌سازی زیاد برای همگرایی است. روش‌های تحلیلی، روش‌هایی محاسباتی و موثرتری هستند. اما این روش‌ها نیاز به فرض‌های ساده‌کننده دارند. تبدیل فوریه سریع^۳ [۳] و روش کامپولنت^۴ [۴] نمونه‌ای از این روش‌های تحلیلی هستند. روش‌های تقریبی یک توصیف تقریبی از ویژگی‌های آماری متغیرهای تصادفی خروجی را فراهم می‌کند. روش گشتاور دوم مرتبه اول $FOSM^5$ [۵] و روش تخمین نقطه‌ای (PEM^6) از جمله روش‌های تقریبی هستند.

استفاده روزافزون از انرژی‌های تجدیدپذیر بخصوص تولید بادی، عدم قطعیت حاکم بر ابزارهای مدیریت سیستم قدرت را به صورت چشمگیری افزایش داده است و لزوم ارائه روش‌های موثر برای مهار این عدم قطعیت احساس می‌گردد. با وجود مزایای انرژی باد مانند نبود هزینه تولید و سازگاری با محیط زیست، طبیعت نوسانی و غیرقابل پیش‌بینی آن مشکلاتی ایجاد می‌نماید. این عدم قطعیت ممکن است در

⁷ Locational Marginal Price (LMP)

⁸ Optimal Power Flow

³ Fast Fourier Transform

⁴ Cumulant Method

⁵ First-Order Second-Moment Method

⁶ Point Estimation Methods (PEM)

۲- روش تخمین نقطه‌ای

یکی از روش‌های موثر تحلیل عدم قطعیت، روش تخمین نقطه‌ای است. این روش همانند روش مونت کارلو از الگوی حل مشابه جهت حل مسائل احتمالی استفاده می‌کند با این تفاوت که در روش تخمین نقطه‌ای، بار محاسباتی بسیار کمتر است. همچنین، روش‌های تخمین نقطه‌ای بر مشکلات مربوط به نداشتن دانش کامل دربارهٔ توابع توزیع احتمال فائق آمده و این توابع را با استفاده از تنها چند گشتاور نخست آماری (یعنی میانگین، واریانس، چولگی^۹ و کشیدگی^{۱۰}) تخمین می‌زنند. به طور کلی، هدف هر یک از روش‌های تخمین نقطه‌ای محاسبه گشتاورهای متغیرهای تصادفی است.

در کاربردهای مهندسی مفهوم روش تخمین نقطه‌ای اولین بار توسط Rosenblueth برای تحلیل عدم قطعیت کمیت‌های شامل متغیر تصادفی متقارن پیشنهاد شد. بعدها این روش برای کمیت‌هایی شامل متغیر تصادفی نامتقارن نیز توسعه یافت. جدول ۱ مهم‌ترین روش‌های تخمین نقطه‌ای را از نظر تعداد دفعات مورد نیاز شبیه‌سازی، بازدهی در مسائل با مقیاس بزرگ، قابلیت اجرا از نظر تقارن و همبستگی متغیرهای تصادفی مقایسه می‌کند [۱۰]. در این جدول m تعداد متغیرهای عدم قطعیت و K پارامتری مرتبط با روش Hong است.

مسائل مربوط به سیستم قدرت در اندازه واقعی، دارای تعداد زیاد متغیرهای تصادفی مانند در دسترس بودن یا نبودن نیروگاه، شاخه شامل خط و ترانسفورماتور، مقدار بار هر شین، تولیدات بادی و خورشیدی و غیره هستند که در ابعاد عملی سیستم قدرت بسیار زیاد می‌گردند. از این رو روش اصلی Rosenblueth و روش‌های تخمین نقطه‌ای متکی به روش Rosenblueth به دلیل نیاز به تعداد شبیه‌سازی بالا (که حتی ممکن است بزرگتر از تعداد شبیه‌سازی مورد نیاز در روش مونت کارلو شود) برای سیستم قدرت با ابعاد واقعی مناسب نیستند. همچنین با توجه به جدول مشاهده می‌شود

که تعداد شبیه‌سازی اجرا شده با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای Harr [۱۱] و Hong [۱۲] به صورت خطی با تعداد متغیرهای تصادفی ورودی افزایش می‌یابد که در مقایسه با روش‌های Rosenblueth و Li یک مزیت برجسته است. روش تخمین نقطه‌ای Harr برای متغیرهای همبسته مناسب است. با این حال، این روش تنها به متغیرهای متقارن (که چولگی برابر صفر است) محدود می‌شود.

جدول ۱- مقایسه روش‌های تخمین نقطه‌ای [۱۰]

قابلیت اجرا		بازدهی در مسائل با مقیاس بزرگ	تعداد شبیه‌سازی	نوع روش تخمین نقطه‌ای
متغیرهای همبسته	متغیرهای نامتقارن			
بله	بله	خیلی پایین	2^m	Rosenblueth
بله	بله	پایین	m^3	Li
بله	خیر	بالا	$2m$	Harr
خیر	بله	بالا	Km or $Km + 1$	Hong

۲-۱- روش تخمین نقطه‌ای Hong

از آنجاکه در میان روش‌های فعلی، روش Hong از بالاترین قابلیت از لحاظ دقت و زمان برخوردار است، این روش به طور کامل معرفی می‌شود و سپس ضعف‌های آن و روش پیشنهادی برای غلبه بر این ضعف‌ها بیان می‌گردد. هدف نهایی در روش‌های تخمین نقطه‌ای محاسبه گشتاورهای متغیرهای تصادفی است که با استفاده از نقاط محدودی از تابع توزیع متغیر تصادفی همراه با وزن آن‌ها صورت می‌گیرد. در ادامه نحوه محاسبه این نقاط، همراه با وزن متناظر آن‌ها و نهایتاً گشتاورهای متغیر تصادفی متغیر خروجی مورد نظر (که هدف نهایی است) در روش Hong شرح داده می‌شود (با فرض مقدار معمول ۲ برای پارامتر k طبق جدول ۱). بنابراین، در ادامه مقاله از این دو نوع روش

^۹ Skewness

^{۱۰} Kurtosis

$$\begin{cases} x_0 = \mu_x; P_0 = 1 - \frac{1}{\lambda_{X,4} - \lambda_{X,3}^2} \\ x_1 = \mu_x - \frac{\sigma_X}{2}(\theta - \lambda_{X,3}); P_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{\lambda_{X,3}}{\theta}}{\lambda_{X,4} - \lambda_{X,3}^2} \right) \\ x_2 = \mu_x + \frac{\sigma_X}{2}(\theta + \lambda_{X,3}); P_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{\lambda_{X,3}}{\theta}}{\lambda_{X,4} - \lambda_{X,3}^2} \right) \\ \theta = \sqrt{4\lambda_{X,4} - 3\lambda_{X,3}^2} \end{cases} \quad (۴)$$

با تقریب مناسب، در این روش گشتاورهای کمیت تصادفی Z توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E(Z^j) = \sum_{i=0}^2 P_i (h(x_i))^j \quad (۵)$$

(پ) روش 2m در حالت n متغیر تصادفی: اگر Z یک کمیت تصادفی، تابعی از n متغیر تصادفی باشد. با فرض عدم همبستگی بین متغیرها، با استفاده از روش 2m موقعیت نقاط تخمینی و وزن‌های متناظر آن برابر است با.

$$\begin{aligned} x_{k,i} &= \mu_k + \xi_{k,i} \sigma_k, i = 1, 2, k = 1, 2, \dots, n \\ \xi_{k,i} &= \frac{\lambda_{k,3}}{2} + (-1)^{3-i} \sqrt{n + \left(\frac{\lambda_{k,3}}{2}\right)^2} \\ P_{k,i} &= \frac{\frac{1}{n}(-1)^i \xi_{k,3-i}}{\xi_k}, \xi_k = 2 \sqrt{n + \left(\frac{\lambda_{k,3}}{2}\right)^2} \end{aligned} \quad (۶)$$

(ت) روش 2m+1 در حالت n متغیر تصادفی: در روش 2m+1 موقعیت نقاط تخمینی و وزن‌های متناظر آن برابر است با.

$$\begin{cases} x_{k,i} = \mu_k + \xi_{k,i} \sigma_k, i = 1, 2, 3, k = 1, 2, \dots, n \\ \xi_{k,i} = \frac{\lambda_{k,3}}{2} + (-1)^{3-i} \sqrt{\lambda_{k,4} + 3 \left(\frac{\lambda_{k,3}}{2}\right)^2}, i = 1, 2 \\ \xi_{k,3} = 0 \\ P_{k,i} = \frac{(-1)^{3-i}}{\xi_{k,i}(\xi_{k,1} - \xi_{k,2})} \quad i = 1, 2 \\ P_{k,3} = \frac{1}{n} - P_{k,1} - P_{k,2} = \frac{1}{n} - \frac{1}{\lambda_{k,4} - \lambda_{k,3}^2} \end{cases} \quad (۷)$$

با تقریب مناسب، در این روش گشتاورهای کمیت تصادفی Z توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E(Z^j) \cong P_0 (h(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n))^j + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^2 P_{k,i} (h(\mu_1, \mu_2, \dots, x_{k,i}, \dots, \mu_n))^j \quad (۸)$$

که در آن

Hong به روش‌های 2m و 2m+1 (Hong به ازاء k=2) یاد می‌شود. در ادامه، روش‌های 2m و 2m+1 در حالت وجود یک متغیر تصادفی و همچنین n متغیر تصادفی شرح داده می‌شود.

(الف) روش 2m در حالت یک متغیر تصادفی: اگر کمیت تصادفی Z که تابعی از متغیر تصادفی X است، به صورت $Z = h(X)$ تعریف شود، موقعیت نقاط تخمینی تابع چگالی احتمال X با استفاده از روش $x_i = \mu_X + 2m$ $\xi_i \sigma_X$ در نظر گرفته می‌شود. x_i بیانگر موقعیت تمرکز i و ξ_i ها مقادیر ثابتی هستند که در اینجا چون تعداد نقاط ۲ است، $i = 1, 2$ فرض می‌شود. پارامترهای مورد نیاز به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} \xi_j &= \frac{\lambda_{X,3}}{2} + (-1)^{3-j} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_{X,3}}{2}\right)^2}; j = 1, 2 \\ M'_j(X) &= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)^j f_X(x) dx \\ \lambda_{X,j} &= \frac{M'_j(X)}{\sigma_X^j}, j = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (۱)$$

μ_X ، σ_X و θ_X به ترتیب بیانگر میانگین، انحراف معیار و ضریبی از پراکندگی متغیر تصادفی است. علاوه بر این $M'_j(X)$ گشتاور مرکزی مرتبه j متغیر تصادفی X را مشخص می‌کند. وزن متناظر در این تمرکزها به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$P_j = \frac{(-1)^j \xi_{3-j}}{\xi}, \xi = \xi_1 - \xi_2 = 2 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_{X,3}}{2}\right)^2} \quad (۲)$$

با تقریب مناسب، گشتاورهای کمیت تصادفی Z توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E(Z^j) = \sum_{i=1}^2 P_i (h(x_i))^j \quad (۳)$$

(ب) روش 2m+1 در حالت یک متغیر تصادفی: در روش 2m+1 از سه تمرکز جهت تقریب تابع چگالی احتمال X استفاده می‌شود که یکی از تمرکزها در مقدار میانگین قرار دارد. موقعیت نقاط تخمینی و وزن‌های متناظر را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود.

از روش تخمین نقطه‌ای بسیار موثرتر خواهد شد. هدف از این قسمت، اصلاح روش Hong و پیشنهاد روش نقطه‌ای جدید فاقد دو ضعف بالا برای تخمین گشتاورهای احتمالی است.

طبق تعریف، امید ریاضی و گشتاور مرکزی تابع شامل متغیر تصادفی برابر است با:

$$\begin{cases} \mu_g = \int G(X) pdf(X) dX \\ M_{kg} = \int (G(X) - \mu_g)^k pdf(X) dX, k \geq 2 \end{cases} \quad (9)$$

هر مجموعه از متغیر تصادفی را می‌توان به راحتی با استفاده از تبدیل T به مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی نمایی استاندارد تبدیل نمود. این تبدیل برای متغیر تصادفی X برابر با $U=T(X)$ است که با استفاده از تبدیل معکوس T معادلات (۹) به صورت زیر بازنویسی خواهد شد:

$$\begin{cases} \mu_g = \int G[T^{-1}(U)]\varphi(U) dU \\ M_{kg} = \int (G[T^{-1}(U)] - \mu_g)^k \varphi(U) dU, k \geq 2 \end{cases} \quad (10)$$

که در معادلات فوق φ تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی نمایی استاندارد است.

نکته کلیدی این تبدیل این است که نقاط تخمینی متغیر تصادفی نمایی استاندارد و وزن‌های متناظر با آن می‌تواند مستقیماً با استفاده از انتگرال‌گیری لژاندر مورد محاسبه قرار گیرد و حل $2m-1$ معادله در روش Hong غیرضروری است. به علاوه هنگام محاسبه نقاط تخمینی در فضای نمایی استاندارد به هیچ گشتاور مرکزی متغیر تصادفی اصلی نیاز نمی‌شود (به رابطه (۱۴) مراجعه کنید). برای انتگرال‌گیری به روش عددی می‌توان از روش گاوس-لژاندر برای محاسبه برخی انتگرال‌ها استفاده نمود. از این روش برای محاسبه انتگرال زیر استفاده می‌شود.

$$I = \int_0^{+\infty} g(u) \exp(-u) du \quad (11)$$

در این انتگرال $g(u)$ تابع دلخواهی از u و $\exp(-u)$ تابع وزنی انتگرال است. تقریب انتگرال فوق برابر است با

$$P_0 = \sum_{k=1}^n P_{k,3} = 1 - \sum_{k=1}^n \frac{1}{\lambda_{k,4} - \lambda_{k,3}^2}$$

۲-۲- روش تخمین نقطه‌ای عددی

در حالت کلی، دقت روش‌های تخمین نقطه‌ای نسبتاً پایین است بخصوص در مواردی که تعداد پارامترهای عدم قطعیت بالا بوده و یا زمانی که باتوجه به افزایش تعداد نقاط تخمینی، این روش‌ها به محاسبه گشتاورهای بالاتر نیاز دارند. همانطور که در معادلات (۲) و (۷) نشان داده شده است در روش دو نقطه‌ای ($2m$) تا گشتاور سوم نیاز $\lambda_{k,3}$ متناظر با محاسبه $(M'_3(X))$ و در روش سه نقطه‌ای ($2m+1$) تا گشتاور چهارم نیاز است. برای افزایش دقت تخمین، نیاز به افزایش نقاط تخمینی است و بنابراین به گشتاورهای بالاتر متغیر تصادفی نیاز می‌شود. برای مثال برای استفاده از ۵ نقطه به گشتاورهای ۱ الی ۸ از متغیر تصادفی $2(m-)$ (۱) نیاز است که محاسبه این گشتاورها سخت و زمان‌بر هستند. به طور کلی برای m نقطه‌ی تخمین زده شده، با فرض اینکه یکی از نقاط تخمین شده در $x_0 = \mu_x$ قرار گرفته است، به $2(m-1)$ گشتاور نخست متغیر تصادفی x و حل $2m-1$ معادله نیاز خواهد شد (روابط روش Hong در روابط (۱) تا (۸) را ببینید) که بار محاسباتی بالایی دارد. گذشته از نیاز به حجم محاسبات زیاد، زمان‌بر بودن و احتیاج به سخت‌افزار پیشرفته و گران، ممکن است مساله به جواب غیرمجاز منجر شود. به‌عنوان مثال برای برخی از متغیرهای تصادفی (مانند متغیرهایی دارای توزیع نمایی یا لگاریتمی) اگر ضریب انحراف استاندارد نسبتاً بزرگ باشد، X محاسبه شده در رابطه (۴) به سمت خارج از ناحیه تعریف شده متغیر تصادفی حرکت می‌کند، به‌عبارت دیگر در رابطه (۴) تضمینی نیست که نقاط تخمینی در بازه موردنظر متغیر تصادفی باشند و در نتیجه پاسخ به‌دست‌آمده غیرمجاز خواهد شد.

باوجود مزایای برجسته روش تخمین نقطه‌ای مانند سادگی و عدم نیاز به انجام مشتق‌گیری، اگر دو ضعف توصیف‌شده در بالا را بتوان برطرف کرد تحلیل عدم قطعیت با استفاده

$$\begin{aligned} \min f(x, u) \\ \text{s.t } g(x, u) = 0 \\ h^{\min} \leq h(x, u) \leq h^{\max} \end{aligned} \quad (15)$$

$x \in \mathcal{R}^{n_1}$ مجموعه‌ای از متغیرهای حالت (متغیرهای خروجی) و $u \in \mathcal{R}^{n_2}$ مجموعه‌ای از متغیرهای کنترل سیستم قدرت است. متغیرهای کنترل معمولاً شامل اندازه ولتاژ شین‌های ژنراتوری، تنظیمات تپ ترانسفورماتور، تنظیمات تجهیزات شنت و متغیرهای حالت معمولاً شامل اندازه و زاویه فازور ولتاژ همه‌ی شین‌های بار سیستم و زاویه فازور ولتاژ و توان راکتیو خروجی شین‌های ژنراتوری (به جز شین اسلک) است.

$f: \mathcal{R}^{n_1} \times \mathcal{R}^{n_2} \rightarrow \mathcal{R}$ تابع هدف سیستم است. در مسأله OPF تابع هدف معمولاً به صورت هزینه سوخت، مجموع تلفات توان حقیقی، شدت ناامنی شبکه، آلودگی سوختی و غیره بیان می‌شود. در مقاله فعلی، حداقل نمودن هزینه سوخت به عنوان تابع هدف برگزیده شده است. با توجه به اینکه بار سیستم قدرت ثابت فرض شده است، تابع هدف مذکور می‌تواند معادل حداکثر نمودن رفاه اجتماعی در نظر گرفته شود.

$g: \mathcal{R}^{n_1} \times \mathcal{R}^{n_2} \rightarrow \mathcal{R}^m$ قید مساوی غیرخطی همان معادلات پخش بار سیستم به صورت زیر است:

$$\begin{cases} P_i - P_{gi} + P_{di} = 0 \\ Q_i - Q_{gi} + Q_{di} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

P_i و Q_i توان حقیقی و توان راکتیو تزریقی شین i ، P_{gi} و Q_{gi} توان حقیقی و راکتیو تولیدی شین ژنراتوری، P_{di} و Q_{di} توان حقیقی و راکتیو بار است.

در کلیه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته از مدل کامل معادلات تزریق پخش بار متناوب استفاده شده است.

توان حقیقی و راکتیو تزریقی P_i و Q_i به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} P_i = G_i(e_i e + f_i f) + B_i(f_i e - e_i f) \\ Q_i = G_i(f_i e - e_i f) - B_i(e_i e + f_i f) \end{cases} \quad (17)$$

G_i و B_i به ترتیب سطر i ماتریس رسانایی G و ماتریس سوسپتانس خطوط شبکه، e_i و f_i مؤلفه حقیقی و موهومی ولتاژ شین i ام، e و f به ترتیب بردار مؤلفه ولتاژ e_i و f_i

$$I \approx \sum_{i=1}^n w_i g(u_i) \quad (12)$$

n تعداد نقاط مورد استفاده جهت تقریب انتگرال، u_i و w_i به ترتیب برابر طول و وزن انتگرال لژاندر است. u_i ریشه‌ی i ام چند جمله‌ای لژاندر $L_n(x)$ و w_i طبق معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$w_i = \frac{x_i}{(n+1)^2 [L_{n+1}(x_i)]^2} \quad (13)$$

u_i و w_i به ازاء مقادیر $n \leq 7$ در جدول ضمیمه-۱ نشان داده شده است.

با توجه به رابطه (۱۱) از جمله توابع شامل $\exp(-u)$ در طول محور حقیقی از ۰ تا $+\infty$ تعریف می‌شود، می‌توان به توزیع احتمالی ویبول اشاره نمود.

با توجه به مطالب فوق رابطه (۹) را می‌توان به صورت رابطه زیر بازنویسی نمود.

$$\begin{cases} \mu_g = \int G(x) pdf(x) dx = \sum_{i=1}^n G(x_i) P_i \\ M_{kg} = \int (G(x) - \mu_g)^k pdf(x) dx = \sum_{i=1}^n (G(x_i) - \mu_g)^k P_i, k \geq 2 \\ x_i = cu_i^{\frac{1}{k}}; P_i = w_i \end{cases} \quad (14)$$

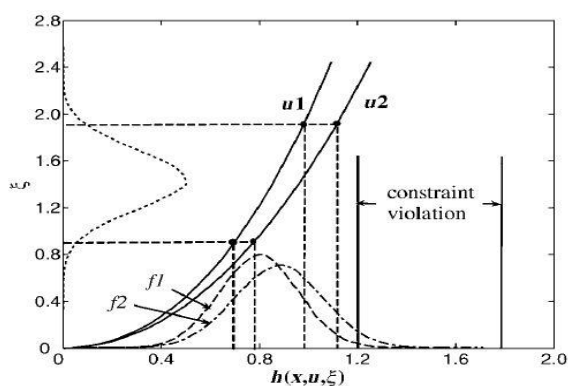
u_i و w_i به ترتیب برابر طول و وزن انتگرال لژاندر با تابع وزنی $\exp(-x)$ و x_i ، P_i به ترتیب برابر مختصات نقاط تخمینی و وزن‌های متناظر آن است. مقادیر u_i و w_i را می‌توان از جدول ضمیمه-۱ استخراج نمود. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد برخلاف روش Hong نیاز به حل معادلاتی مانند (۱) تا (۸) نیست و با توجه به اینکه توزیع نرمال استاندارد، همه فضا را پوشش می‌دهد هر جوابی که از رابطه (۱۴) برای نقاط تخمینی به دست آید مجاز است.

۳- تعریف مسأله OPF

۳-۱- مسأله قطعی OPF

مسأله OPF در قالب یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳].

کنترل u_1 ، توزیع خروجی f_1 حاصل می‌شود. قسمت راست توزیع خروجی f_1 که از حد بالای خروجی (در شکل ۱ برابر ۱/۲ است) خود بیشتر است سبب نقض محدوده خواهد شد. توزیع خروجی f_2 که به سبب انتخاب متغیر کنترل u_2 حاصل می‌شود دارای احتمال نقض محدوده بالاتری است. با تغییر متغیرهای کنترل u توزیع‌های خروجی نیز تغییر می‌کند. بهتر است که با مقایسه مقادیر مختلف متغیر کنترل u ، کوچکترین احتمال نقض (قابلیت اطمینان بالاتر) با مقدار تابع هدف بهینه‌ای، حاصل شود [۱۳].



شکل ۱ نتایج عملکرد مختلف تحت عدم قطعیت [۱۳]

۳-۲- هزینه حاشیه‌ای محلی

قیمت حاشیه‌ای محلی (LMP) هزینه حاشیه‌ای تأمین افزایش یک واحد انرژی الکتریکی در یک شین خاص، با توجه به هزینه حاشیه‌ای تولید و محدوده‌های فیزیکی سیستم انتقال است. هزینه حاشیه‌ای، بیان‌کننده هزینه تأمین افزایش یک واحد بار در سیستمی است که سطح تولید واحدها از لحاظ اقتصادی در مقداری بهینه توزیع شده است. مقدار LMP به صورت مجموع هزینه تلفات حاشیه‌ای، هزینه تراکم و هزینه حاشیه‌ای تولید تعریف می‌شود [۱۴]. عموماً، LMP به صورت هزینه اضافی جهت تأمین یک مگاوات بیشتر در یک شین مشخص تعریف می‌شود [۱۵].

هستند. $h: \mathcal{R}^{n_1} \times \mathcal{R}^{n_2} \rightarrow \mathcal{R}^p$ بیانگر قید نامساوی با حد پایین h^{\min} و حد بالای h^{\max} است. این قیود نشان‌دهنده محدوده‌های فیزیکی بهره‌برداری از تجهیزات شبکه یا قیود امنیتی سیستم قدرت است. کران این قیود باتوجه به ظرفیت تجهیزات و یا توسط ابزارهای تحلیل امنیت^{۱۱} و آرایش واحدها^{۱۲} بدست می‌آیند. برای مثال برخی قیود نامساوی از جمله ظرفیت تولیدی ژنراتور، توان حقیقی عبوری از خطوط، جریان عبوری از خطوط و اندازه ولتاژ شین‌های بار می‌تواند به صورت قید در مساله اعمال گردد.

$$\begin{cases} P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \\ Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \\ P_{mn} \leq P_{mn}^{\max} \\ I_{mn}^2 \leq (I_{mn}^2)^{\max} \\ V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

P_{mn} و I_{mn} به ترتیب توان حقیقی و جریان خط انتقال بین دو شین m و n و V_j اندازه‌ی ولتاژ شین j ام است. در تحقیق فعلی، فرض شده است که سیستم قدرت در حالت متعادل و متقارن بهره‌برداری می‌شود.

با توجه به اینکه عوامل عدم قطعیت بسیاری در سیستم قدرت وجود دارد، چشم پوشی از این عوامل در مساله OPF ممکن است منجر به پاسخ اشتباه و یا غیرممکن شود. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت، فرض نماییم $\xi \in \mathcal{R}^q$ بردار چندبُعدی متغیرهای تصادفی (نشان‌دهنده پارامترهای عدم قطعیت سیستم قدرت) شامل تابع چگالی احتمال $\rho(\xi)$ است. با افزودن ξ در (۱۵) مساله OPF به صورت یک مساله بهینه‌سازی تصادفی خواهد شد که خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} & \min f(x, u, \xi) \\ & s. t \quad g(x, u, \xi) = 0 \\ & h^{\min} \leq h(x, u, \xi) \leq h^{\max} \\ & x \in X, u \in U, \xi \in \Xi \end{aligned} \quad (19)$$

شکل ۱ مفهوم مساله OPF تحت عدم قطعیت را بیان می‌کند. به سبب تصادفی بودن متغیر ورودی ξ ، خروجی مساله $h(x, u, \xi)$ متغیر خواهد شد. با در نظر گرفتن متغیر

¹¹ Security Analysis

¹² Unit Commitment

تراکم حداقل گردد. به عبارت دیگر پروفایل قیمت باید مسطح شود. پروفایل قیمت زمانی مسطح می‌شود که اختلاف بین LMP شین‌ها کاهش یابد. در نتیجه، خریداران، انرژی را با تبعیض قیمت کم‌تری خریداری نموده که منجر به بهبود سطح رقابت می‌شود. بنابراین همواری پروفایل قیمت معیاری مناسب جهت تعیین سطح رقابت بازار برق است. به دلایل ذکر شده و موارد فراوان دیگری که در این مقاله نمی‌گنجد، مدل پخش بار احتمالی پیشنهادی برای محاسبه LMP استفاده شده است.

۴- تولید بادی

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^{۱۴} 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. این توزیع عمومی‌تر از توزیع رایلی تک پارامتری است و نسبت به توزیع نرمال دو متغیره (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 ارتفاعات نیز وجود دارد. طبق تعریف، تابع توزیع ویبول برابر است با:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (20)$$

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

$$F_V(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (21)$$

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

$$\bar{v} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (22)$$

اگر مسأله بهینه‌سازی شامل محدودیت عبوری خطوط نباشد، مقادیر LMP برای تمام شین‌ها یکسان خواهد بود. این مقدار LMP، برابر با هزینه حاشیه‌ای گران‌ترین واحد تولید توزیع‌شده (واحد حاشیه‌ای) است که در این مورد هزینه تراکم اعمال نمی‌شود. با این حال اگر محدودیت خطوط در نظر گرفته شود مقادیر LMP در شین‌های سیستم متفاوت خواهد بود و ممکن است سبب هزینه تراکم شود [۱۶].

با حل مسأله OPF می‌توان قیمت حاشیه‌ای محلی را محاسبه نمود. از دیدگاه ریاضی، مقادیر LMP همان ضرایب لاگرانژ مربوط به قید تساوی تعادل توان حقیقی در شین مورد نظر است [۱۷]. با مشخص شدن توان حقیقی واحد حرارتی مرجع می‌توان هزینه شین مرجع را محاسبه نمود. از آنجایی که قیمت حاشیه‌ای محلی در شین مرجع فاقد مؤلفه‌ی تراکم و تلفات است بنابراین در این شین LMP به راحتی محاسبه می‌شود.

از کاربردهای LMP می‌توان به ظرفیت توسعه تولید و ظرفیت توسعه انتقال در شبکه اشاره نمود. مقدار LMP قیمت پیشنهادی هر واحد را تحت تأثیر قرار خواهد داد. از آنجا که در بازار برق هر واحد، قیمت پیشنهادی خود را به همراه مقدار توانی که تمایل به فروش آن دارد به بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO^{۱۳}) ارائه می‌دهد، قیمت پیشنهادی هر واحد نمی‌تواند از سقف بازار بیشتر و از قیمت حاشیه‌ای محلی آن واحد کمتر باشد.

برای دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی توسعه انتقال ضروری است که معیارهایی جهت محاسبه سطح رقابت بازار برق و اینکه چه مقدار برنامه توسعه مشخص باعث بهبود سطح رقابت شده، تعریف شود. در یک بازار رقابتی مناسب، تولیدکننده‌ها تولیدهای خود را با قیمت مشابه پیشنهاد می‌دهند و خریداران هیچ محدودیتی در خرید از تولیدکننده مطلوب خود ندارند. بنابراین برای داشتن بازار رقابتی، LMP می‌بایست در همه شین‌ها یکسان و هزینه

¹³ Independent System Operator (ISO)

¹⁴ Weibull Distribution

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 و میانگین سرعت باد در هر 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 که روش گرافیکی و روش حداکثر احتمال از جمله این روش‌ها هستند.

توان موجود در باد 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 اجرا است. ماکزیمم مقدار ضریب اجرا که به نام ضریب بتز ۱۵ شناخته شده است، برابر ۵۹٫۳ درصد است [۱۸].

۵- روش حل

با اضافه کردن پارامتر عدم قطعیت در مسأله OPF این مسأله به صورت یک مسأله بهینه‌سازی تصادفی خواهد شد. یکی از روش‌های رایج جهت حل این چنین مسائل استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی است. برنامه‌ریزی تصادفی چارچوبی جهت مدل‌سازی مسائل بهینه‌سازی تحت عدم قطعیت است. مسائل برنامه‌ریزی تصادفی عموماً به سه دسته مسأله قیود شانس^{۱۶}، مسأله اصلاح^{۱۷} و مسأله توزیع^{۱۸} تقسیم می‌شود. دسته‌بندی مسائل برنامه‌ریزی تصادفی در شکل ۲ نشان داده شده است.

در روش قیود شانس، برآورده شدن قیود تحت احتمالی مشخصی مدل می‌شود. در مدل اصلاح، برای حالت قبل و بعد از وقوع اطلاعات متغیر نامطمئن، دو دسته تصمیمات مشخص می‌شود که در مجموع باید تابع هدف مسأله را به‌ازای وقوع سناریوهای مختلف بهینه کنند. هدف از روش توزیع، به‌دست آوردن تصویر و توزیع خروجی‌های مورد نظر به‌ازای تغییرات متغیرهای تصادفی است.

شکل ۳ از دیدگاه مدل اطلاعات فرض شده برای متغیرهای نامطمئن، روش‌ها را مقایسه می‌کند. در این شکل، هر یک

توان موجود در باد 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 اجرا است. ماکزیمم مقدار ضریب اجرا که به نام ضریب بتز ۱۵ شناخته شده است، برابر ۵۹٫۳ درصد است [۱۸].

توان موجود در باد 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 اجرا است. ماکزیمم مقدار ضریب اجرا که به نام ضریب بتز ۱۵ شناخته شده است، برابر ۵۹٫۳ درصد است [۱۸].

توان موجود در باد 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 اجرا است. ماکزیمم مقدار ضریب اجرا که به نام ضریب بتز ۱۵ شناخته شده است، برابر ۵۹٫۳ درصد است [۱۸].

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 تولید کننده یا داده‌های تجربی فراهم می‌شود) به‌دست آورد.

توان تولیدی واحد بادی به صورت زیر مدل می‌شود [۱۹].

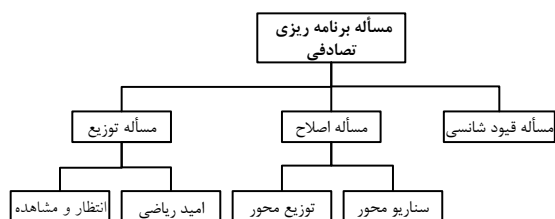
$$P_W = \begin{cases} 0 & v < v_i \\ \frac{v - v_i}{v_r - v_i} P_W^{rated} & v_i \leq v < v_r \\ P_W^{rated} & v_r \leq v < v_o \\ 0 & v_o \leq v \end{cases} \quad (23)$$

¹⁵ Betz Coefficient

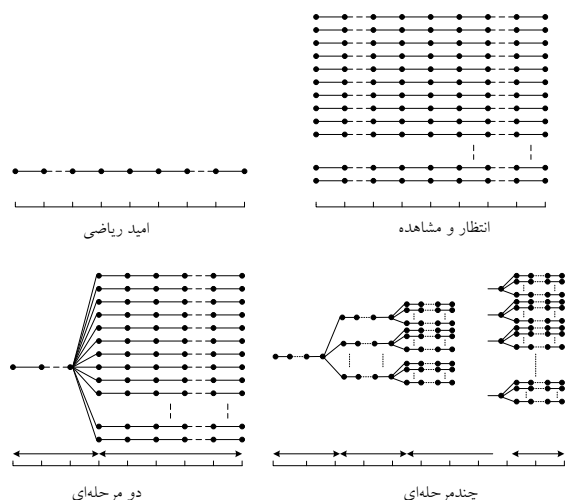
¹⁶ Chance constraint problem

¹⁷ Recourse problem

¹⁸ Distribution problem



شکل ۲- طبقه‌بندی مسائل برنامه‌ریزی تصادفی



شکل ۳- مقایسه بین روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی

در مقاله حاضر، هدف به دست آوردن توزیع متغیر LMP است و بنابراین روش WS استفاده می‌گردد؛ با این تفاوت که به جای تولید تعداد زیادی سناریو (مشابه روش مونت کارلو)، تعداد محدودی نقطه را هوشمندانه انتخاب نموده و با توجه به این نقاط، شکل توزیع را «تخمین» می‌زند و به همین دلیل روش تخمین نقطه‌ای نامیده می‌شود.

این توضیح به گونه‌ای دیگر در شکل ۴ نشان داده شده است. چون مدل مورد نظر در این مقاله برای یک ساعت LMP را محاسبه می‌کند تعداد مراحل به یک نقطه محدود می‌شود. نقاط قرمز رنگ نشان‌دهنده تحقق‌های انتخاب شده برای شبیه‌سازی هستند که مجدداً نیاز به تعداد نقاط کمتر نسبت به روش مونت کارلو را برای همگرایی نشان می‌دهد. در شکل ۴ این نقاط تخمینی به رنگ قرمز است. به دلیل قطعی و مشخص بودن این نقاط، مسئله OPF به صورت قطعی اجرا می‌شود.

از نقاط تحقق یک حالت متغیر نامطمئن را در طول مراحل نشان می‌دهد. هر یک از مسیرهای این گره‌ها از گره ابتدایی تا انتهای، یک سناریوی مجزا را نشان می‌دهند.

روش امید ریاضی همان روش مدل قطعی است که براساس محتمل‌ترین سناریو، تصمیم‌گیری می‌شود. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد یک سناریو بیشتر وجود ندارد. در روش «انتظار و مشاهده» (WS^{19}) که زیرشاخه روش‌های توزیع است، به‌ازای هر حالت (سناریو) ممکن، یک جواب بهینه به دست می‌آید و با توجه به احتمال وقوع هر یک از سناریوها، توزیع احتمالی پاسخ (خروجی مورد نظر) رسم می‌شود. در این روش نیز مانند روش امید ریاضی فرض می‌شود که اطلاع تحقق متغیر نامطمئن از قبل دانسته می‌شود و در واقع مسئله امید ریاضی (مسئله قطعی) چندین بار به‌ازای سناریوهای مختلف، مستقل از هم حل می‌شوند.

روش‌های چند مرحله‌ای و دو مرحله‌ای زیرشاخه روش اصلاح هستند که با توجه به تعداد مراحل در نظر گرفته شده برای مشخص شدن اطلاعات، نام می‌گیرند. در این روش، تصمیمات گرفته شده باید به‌ازای همه سناریوها و در مجموع بهینه شود. به عبارت دیگر، تصمیمات گرفته شده برای سناریوها برخلاف روش WS بر یکدیگر اثر می‌گذارند و هیچگونه اطلاعاتی از قبل در مورد تحقق سناریوها در دسترس نیست (این خاصیت، اصطلاحاً قید پیش‌بینی ناپذیری نامیده می‌شود). نقاط انشعب در این روش‌ها، انواع تحقق‌های ممکن یک متغیر تصادفی را نشان می‌دهند که حالت سیستم را به یک حالت متمایز دیگر می‌برد.

محور زیرین هر شکل دوره‌های زمانی را نشان می‌دهد که لزوماً برابر با تعداد مراحل نیستند. بحث بیشتر در این خصوص در چارچوب این مقاله نیست و خوانندگان علاقمند می‌توانند به منابع مربوط مراجعه نمایند.

¹⁹ Wait and See

۷-۲- نتایج شبیه‌سازی

برای سیستم ۹ شین، جدول ۴ و ۵ به ترتیب خطای تقریب میانگین و انحراف استاندارد LMP را در روش‌های مختلف تخمین نقطه‌ای در مقایسه با روش مونت کارلو به‌عنوان روش مبنا و برتر از نظر دقت تخمین نشان می‌دهد. روش‌های پنج و هفت نقطه‌ای نشان داده شده در جدول نشان‌دهنده روش تخمین پیشنهادی به ترتیب با ۵ و ۷ نقطه هستند. همانگونه که قبلاً ذکر شد، روش‌های $2m+1$ و $2m$ به دو رویکرد مختلف روش Hong مربوط می‌شوند. ملاحظه می‌گردد که برای کلیه سیستم‌ها همه روش‌ها به نتایج مطلوبی همگرا می‌شوند. اگرچه از نظر دقت بعضی مواقع برتری با روش Hong و در بعضی دیگر از سناریوها برتری با روش پیشنهادی است، مقدار اختلاف دقت تخمین ناچیز است.

نکته جالب توجه این است که در مواردی که تابع توزیع با دقت مناسب تخمین زده شده است، همه روش‌ها مطلوب عمل کرده‌اند در حالی که وقتی خطای تقریب بالا رفته است، روش Hong مرتکب خطای بالایی در تقریب شده است. به عبارت دیگر، روش Hong از پایداری مناسب برخوردار نیست. به‌عنوان مثال، درحالی‌که خطای روش $2m+1$ در تقریب مقدار میانگین و انحراف استاندارد در سیستم ۹ شین حدود صفر است، در سناریوی دوم سیستم ۲۴ شین این دو خطا به ترتیب به ۰.۷٪ و ۱.۲٪ می‌رسند. این درحالی است که روش هفت نقطه‌ای (روش پیشنهادی) در هر دو مورد خطای اندکی را نشان می‌دهد. گذشته از این، با توجه به آنکه زمان مورد نیاز برای تخمین در روش‌های مختلف طبق جدول ۶ تفاوت قابل توجهی دارند می‌توان با بالا بردن نقاط، دقت روش تخمین پیشنهادی را همچنان بالا برد بدون اینکه نگرانی چندانی درخصوص بالا رفتن زمان محاسبه نقاط تخمینی داشت، این در حالی است که زمان روش Hong حدوداً بین ۲ تا ۱۰ برابر روش پیشنهادی است و با افزایش نقاط تخمین، زمان مورد نیاز محاسبات برای تخمین تقاطق به‌صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. برای مقایسه روش‌های تخمین نقطه‌ای از نظر پایداری دقت

نمونه با اعمال روش تخمین نقطه‌ای در تقریب توزیع توان خروجی واحد بادی سیستم قدرت ۹ شین، پارامترهای شکل و مقیاس توزیع ویبول توان خروجی به ترتیب برابر $k = 1.62567$ و $c = 37.49566$ خواهد شد.

مسئله OPF سیستم‌های قدرت فوق در محیط نرم افزار GAMS و MATPOWER با استفاده از سیستمی با پردازنده Intel Core i5 2.4GHz و 4 GB RAM مدل‌سازی و اجرا شده است. تحلیل مونت کارلو با استفاده از ۱۰۰۰۰ نمونه اجرا می‌شود.

مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تحلیل مونت کارلو دقت و کارایی روش‌های تخمین نقطه‌ای را نشان می‌دهد. خطای روش‌های تخمین نقطه‌ای با رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود:

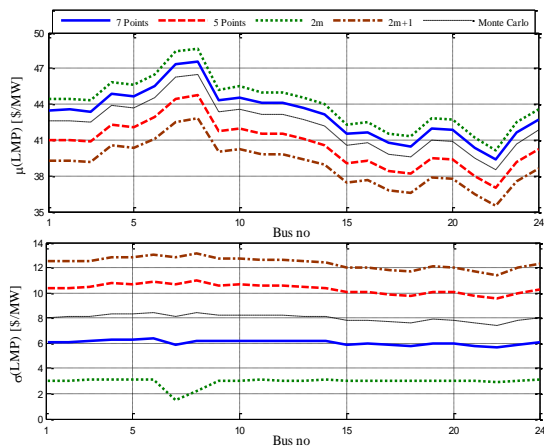
$$\begin{aligned} \varepsilon_{\mu} &= \frac{\mu_{PEM} - \mu_{MCS}}{\mu_{MCS}} \times 100 [\%] \\ \varepsilon_{\sigma} &= \frac{\sigma_{PEM} - \sigma_{MCS}}{\sigma_{MCS}} \times 100 [\%] \end{aligned} \quad (24)$$

در معادله فوق μ_{MCS} ، σ_{MCS} ، μ_{PEM} و σ_{PEM} به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد تحلیل مونت کارلو و میانگین و انحراف استاندارد روش تخمین نقطه‌ای است.

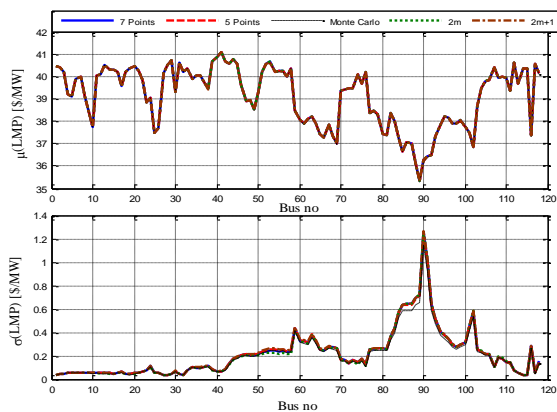


شکل ۵- روندنمای پیشنهادی الگوریتم حل مسأله OPF تحت عدم قطعیت

متغیرها به صورت مفصل تر و از دیدگاه نتایج کاربردی و تفسیرات مهندسی و اقتصادی شرح داده می شود. برای نمونه، میانگین و انحراف استاندارد قیمت حاشیه‌ای محلی شین‌های مختلف در سناریو دوم سیستم‌های قدرت ۲۴ شین و ۱۱۸ شین در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.



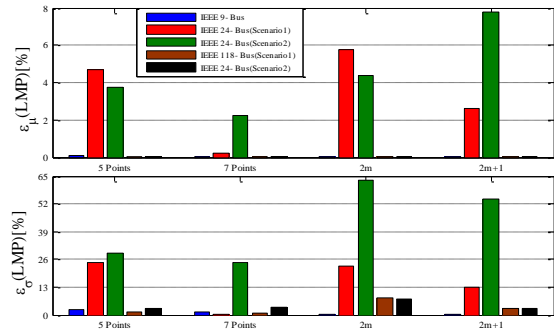
شکل ۸- میانگین و انحراف استاندارد قیمت حاشیه‌ای محلی سیستم قدرت ۲۴ شین IEEE (سناریو دوم)



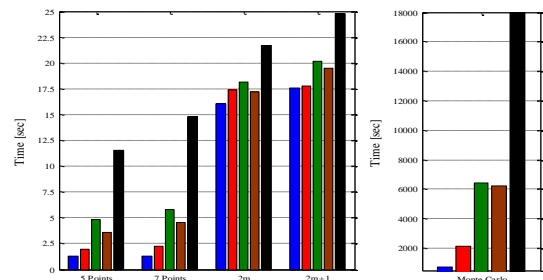
شکل ۹- میانگین و انحراف استاندارد قیمت حاشیه‌ای محلی سیستم قدرت ۱۱۸ شین IEEE (سناریو دوم)

با توجه به شکل ۸ مشاهده می شود که در سیستم ۲۴ شین در روش تخمین هفت نقطه‌ای، شین هشتم و شین بیست و دوم به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار LMP هستند. با توجه به مفهوم LMP، شین‌های اطراف شین هشتم نظیر شین ششم، هفتم و هشتم کمتر از سایر شین‌ها به منبع تولید ارزان تر دسترسی دارند و هزینه تراکم در این

و زمان مورد نیاز می توان به شکل های ۶ و ۷ مراجعه نمود که به صورت گویاتری (نمودار میله‌ای) تفاوت نوسانات روش‌ها در سیستم‌های مختلف و زمان‌های مورد نیاز را برای تخمین نشان می دهند. نوسانات روش‌های Hong و عملکرد نسبتاً پایدار روش پیشنهادی بخصوص در روش هفت نقطه‌ای قابل توجه است.



شکل ۶- خطای تخمین متغیرهای خروجی برای روش‌های مختلف تخمین نقطه‌ای

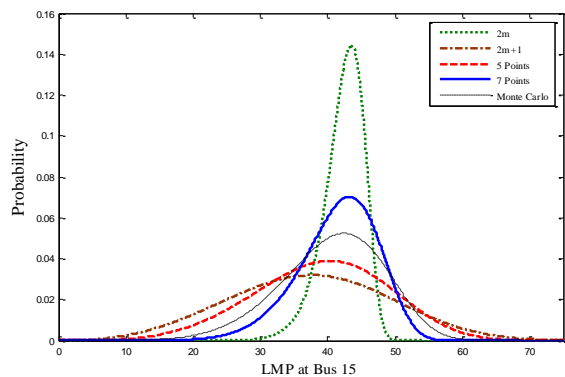


شکل ۷- زمان حل مسأله OPF برای روش‌های تخمین نقطه‌ای در سیستم‌های قدرت مختلف

از آنجا که زمان مورد نیاز در روش مونت کارلو بسیار زیاد است، نمودار میله‌ای آن جداگانه ترسیم شده است تا اختلاف مقیاس‌ها سبب ابهام در شکل نشوند. اگرچه دقت روش مونت کارلو به دلیل تعداد زیادی نقاط بهتر است اما همانگونه که ملاحظه می شود به دلیل زمان مورد نیاز بسیار بیشتر (بیش از ۱۰۰۰ برابر نسبت به روش پیشنهادی) استفاده آن در سیستم‌های قدرت با شمار زیادی متغیر نامطمئن غیرعملی به نظر می رسد.

صرفنظر از مقایسات کلی که شرح آن آمد، در ادامه، ضمن مقایسه نتایج روش‌های مختلف، نتایج به دست آمده روی

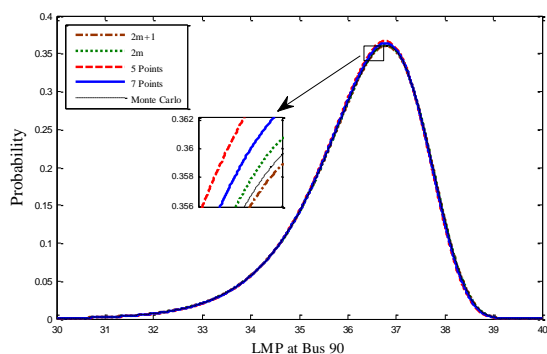
برای نمونه، تخمین نقطه‌ای توزیع احتمالی LMP شین چهاردهم در سیستم ۲۴ شین در شکل ۱۰ در روش‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۰- توزیع احتمالی LMP شین پانزدهم سیستم قدرت ۲۴ شین (سناریو دوم)

همچنین شکل ۱۱ توزیع احتمالی LMP شین نودم در سیستم ۱۱۸ شین را در روش‌های مختلف تخمین نقطه‌ای نشان می‌دهد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که دقت تخمین نقطه‌ای در شین‌های مختلف متفاوت است و رفتار یکسانی در دقت تخمین توزیع متغیر تصادفی دیده نمی‌شود.



شکل ۱۱- توزیع احتمالی LMP شین نودم سیستم قدرت ۱۱۸ شین (سناریو دوم)

جدول ۸ کران بالا و پایین توزیع‌های احتمالی LMP را در برخی از شین‌ها نشان می‌دهد. گذشته از تایید دقت روش پیشنهادی در این جدول در تخمین (در مقایسه با روش مونت کارلو)، این کران‌ها اطلاعات ارزشمندی را در خصوص

ناحیه بالا است. همچنین شین‌های اطراف شین بیست و دوم (نظیر پانزدهم، شانزدهم، هفدهم، هجدهم، بیست و یکم و بیست و دوم) کمتر از سایر شین‌ها به منبع تولید ارزان‌تر دسترسی داشته و هزینه تراکم در این ناحیه پایین است.

جدول ۷، میانگین، انحراف استاندارد، حداکثر و حداقل قیمت حاشیه‌ای محلی میانگین LMP را بیان می‌کند. به منظور کاهش انحراف استاندارد پروفایل LMP و افزایش سطح رقابت در این بازار یکی از نامزدهای احداث خط در برنامه توسعه خطوط، احداث خط بین دو شین هشتم و شین بیست و دوم است. بیشترین و کمترین پراکندگی LMP به ترتیب در شین ششم و بیست و دوم رخ می‌دهد. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که در سیستم ۱۱۸ شین در روش تخمین هفت نقطه‌ای، شین چهارم و یکم و شین هشتم و نهم به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار میانگین LMP هستند. بدین معنی که شین‌های اطراف شین هشتم و نهم (نظیر شین هشتم و پنجم، هشتم و هشتم، نودم، نود و یکم، نود و دوم و صد و دوم) بیشتر از سایر شین‌ها به منبع تولید ارزان‌تر دسترسی دارند و هزینه تراکم در این ناحیه پایین است. همچنین شین‌های اطراف شین چهارم و یکم (نظیر سی و نهم، چهارم و دوم، چهارم و سوم، چهارم و چهارم و پنجم) کمتر از سایر شین‌ها به منبع تولید ارزان‌تر دسترسی داشته و هزینه تراکم در این ناحیه بالا است. از این رو به منظور کاهش انحراف استاندارد پروفایل LMP و افزایش سطح رقابت در این بازار یکی از نامزدهای احداث خط در برنامه توسعه خطوط، احداث خط بین دو شین چهارم و یکم و شین هشتم و نهم است.

از دیدگاهی دیگر، جدول ۷ مشخصات آماری توزیع میانگین مجموعه LMP را در شین‌های مختلف به‌عنوان معیاری از LMP در کل سیستم قدرت مورد نظر نشان می‌دهد. نتایج نزدیک روش پیشنهادی و روش مونت کارلو دقت روش پیشنهادی را از اثبات می‌کند.

میزان نوسانات LMP در شرایط مختلف و در شین‌های مختلف در اختیار انواع بازیگران بازار برق قرار می‌دهد و می‌تواند برای تصمیم‌گیری دربارهٔ مسائلی مانند پیشنهاد قیمت مناسب (برای واحد تولیدی) و یا طرح‌های توسعهٔ شبکه شوند. به عنوان یک تفسیر مختصر از کاربرد این داده‌ها، رفتار تأمین‌کننده‌های انرژی در این بازار بدین صورت است که هر واحد تولیدی قیمت پیشنهادی فروش خود را به همراه مقدار توان به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه می‌دهد. قیمت پیشنهادی هر واحد (bg) نمی‌تواند از قیمت سقف بازار (PC) بیشتر و از قیمت حاشیه‌ای محلی آن واحد کمتر باشد ($LMP \leq bg \leq PC$). در سیستم ۲۴ شین، واحد تولیدی متصل به شین پانزدهم توان قابل فروش خود را با قیمت bg به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه می‌دهد. با

استفاده از شکل ۱۰ و جدول ۸ مشاهده می‌شود که حداقل هزینهٔ پیشنهادی این واحد (با استفاده از نتیجهٔ به‌دست آمده در روش تخمین هفت نقطه‌ای) می‌تواند از ۱۵/۷۱۶ تا ۵۷/۶۱۴ دلار متغیر باشد. همچنین در سیستم ۱۱۸ شین، واحد تولیدی متصل به شین نودم توان مورد فروش خود را با قیمت bg به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه می‌دهد. با استفاده از شکل ۱۱ و جدول ۸ مشاهده می‌شود که حداقل هزینهٔ پیشنهادی این واحد (با استفاده از نتیجهٔ به‌دست آمده در روش تخمین هفت نقطه‌ای) می‌تواند از ۲۸/۳۸۷ تا ۳۹/۳۷۵ دلار متغیر باشد. بدیهی است که ارائهٔ دقیق پیشنهاد قیمت نیازمند تحلیل‌ها و ابزارهای دیگری است و این اطلاعات می‌تواند به‌عنوان داده‌های ورودی در این ابزارها استفاده گردد.

جدول ۴- خطای تخمین میانگین LMP به ازاء روش‌های مختلف تخمین نقطه‌ای

روش 2m+1	روش 2m	روش هفت نقطه‌ای	روش پنج نقطه‌ای	سیستم قدرت
0.000010	0.000013	0.045447	0.078780	سیستم ۹ شین
2.596168	5.773385	0.214302	4.721991	سیستم ۲۴ شین
7.748872	4.363077	2.248051	3.728570	
0.023215	0.013037	0.005456	0.016307	سیستم ۱۱۸ شین
0.001700	0.005928	0.002919	0.004244	

جدول ۵- خطای تخمین انحراف استاندارد LMP برای روش‌های مختلف تخمین نقطه‌ای

روش 2m+1	روش 2m	روش هفت نقطه‌ای	روش پنج نقطه‌ای	سیستم قدرت
0.044252	0.045516	1.263170	2.223119	سیستم ۹ شین
12.699195	23.009559	0.532335	24.517363	سیستم ۲۴ شین
54.075567	63.244506	24.664030	28.666850	
3.145830	8.244304	0.851778	1.199908	سیستم ۱۱۸ شین
3.198064	7.330279	3.462280	3.281580	

جدول ۶- زمان حل مسأله OPF برای روش‌های تخمین نقطه‌ای

روش مونته کارلو	روش 2m+1	روش 2m	روش هفت نقطه‌ای	روش پنج نقطه‌ای	زمان اجرا	
747.3072	17.5657	16.0681	1.3104	1.27921	سیستم ۹ شین	
2152.4758	17.7841	17.4253	2.2464	1.95001	سناریوی اول	سیستم ۲۴ شین
6427.3192	20.1241	18.1429	5.7564	4.86723	سناریوی دوم	
6200.4313	19.5001	17.2381	4.5396	3.57242	سناریوی اول	سیستم ۱۱۸ شین
17985.3396	24.7417	21.6529	14.7577	11.57527	سناریوی دوم	

جدول ۷- میانگین، انحراف استاندارد، حداقل و حداکثر پروفایل میانگین LMP

روش مونته کارلو	روش 2m+1	روش 2m	روش هفت نقطه‌ای	روش پنج نقطه‌ای	خروجی پروفایل	سیستم قدرت
42.24	38.96	44.08	43.19	40.66	μ	سناریو دوم سیستم ۲۴ شین
2.03	1.835	2.16	2.098	1.947	σ	
38.5355	35.5226	40.1304	39.3280	37.0477	min	
46.5743	42.7731	48.6682	47.6178	44.7399	max	
39.1051	39.1161	39.1186	39.1171	39.1153	μ	سناریو دوم سیستم ۱۱۸ شین
1.335	1.327	1.327	1.328	1.329	σ	
35.2961	35.3286	35.3302	35.3259	35.3226	min	
41.1047	41.1088	41.1100	41.1098	41.1092	max	

جدول ۸- کران بالا و پایین توزیع‌های احتمالی LMP

روش مونته کارلو	روش 2m+1	روش 2m	روش هفت نقطه‌ای	روش پنج نقطه‌ای	زمان اجرا	
13.348	13.351	13.351	13.419	13.474	min	سیستم ۹ شین
25.495	25.493	25.493	25.434	25.389	max	
10.704	2.702	26.13	15.716	5.628	min	سناریو دوم سیستم ۲۴ شین
62.661	76.632	50.091	57.614	69.775	max	
10.827	2.741	26.554	15.897	5.698	min	
62.694	76.669	50.015	57.637	69.825	max	
35.197	35.19	35.31	35.27	35.252	min	سناریو دوم سیستم ۱۱۸ شین
39.592	39.59	39.4	39.565	39.566	max	
28.342	28.32	28.36	28.387	28.425	min	
39.405	39.41	39.4	39.375	39.348	max	

۸- نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی حل مسأله OPF تحت عدم قطعیت با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای در سیستم‌های قدرت با هدف به دست آوردن تصویر (توزیع) LMP در سناریوهای مختلف بررسی شد. با وجود قابلیت بالای روش مونت کارلو، زمان اجرای بالای این روش، کاربرد عملی آن را با چالش جدی روبرو می‌سازد. همچنین دیگر روش‌ها مانند روش Hong اگرچه به زمان کمتری نسبت به روش مونت کارلو نیاز دارند، با مشکلاتی مانند نیاز به حجم بالای محاسبات و احتمال غیرمجاز شدن نقطه تخمینی روبرو می‌شوند.

جهت پوشش این مشکلات، روش تخمین نقطه‌ای با تکیه بر حل عددی انتگرال‌ها پیشنهاد شد که با تبدیلات مناسب می‌توان به سادگی آن را حل نمود. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی ضمن برخورداری از کیفیت تخمین مطلوب، پایداری و سرعت مناسبی نیز دارد. از لحاظ زمان و حجم محاسبات نیز روش پیشنهادی برتری قابل توجهی نسبت به دیگر روش‌های مشابه نشان می‌دهد. برای نشان دادن یکی از کاربردهای روش پیشنهادی در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، توزیع LMP در شین‌های مختلف، ویژگی‌های آماری آن و بخصوص کران‌های آن به‌زای سناریوهای مختلف محاسبه و بحث گردید.

جدول ضمیمه-۱ مختصات و وزن‌های مربع سازی گاوس لژاندر

مرتب n	مربع سازی گاوس لژاندر				
	طول‌های u_i	وزن‌های w_i	n	طول‌های u_i	وزن‌های w_i
2	0.585786437626905	0.853553390593274	6	15.9828739806017	0.000000898547906
	3.41421356237309	0.146446609406726		2.99273632605931	0.113373382074045
	6.28994508293747	0.010389256501586		1.18893210167262	0.417000830772114
3	0.415774556783479	0.711093009929173	6	5.77514356910451	0.010399197453148
	2.29428036027904	0.27851773356924		9.83746741838258	0.000261017202815
	9.39507091230113	0.000539294705561		0.222846604179261	0.458964673949955
4	4.53662029692112	0.038887908515006	7	19.3957278622625	0.000000031703155
	1.74576110115834	0.357418692437802		2.56787674495074	0.147126348657514
	0.322547689619392	0.60315410434164		1.02666489533919	0.421831277861717
5	12.6408008442757	0.000023369972386	7	8.18215344456286	0.001074010143282
	7.08581000585883	0.003611758679922		4.90035308452648	0.020633514468711
	3.59642577104072	0.075942449681707		12.7341802917978	0.000015865464349
	1.41340305910651	0.398666811083173		0.193043676560362	0.409318951701286
	0.263560319718141	0.521755610582808			

۹- مراجع

- [1] Y. K. Tung, B. C. Yen and C. S. Melching, *HydroSystems Engineering Reliability Assessment and Risk Analysis*, New York: McGraw-Hill, 2005.
- [2] R. Y. Rubinstein, *Simulation and the Monte Carlo Method*, New York: Wiley, 1981.
- [3] R. N. Allan, A. M. Leite da Silva and R. C. Burchett, "Evaluations methods and accuracy in probabilistic load flow solutions," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vols. PAS-100, p. 2539-2546, May 1981.
- [4] R. N. Allan and M. R. G. Al-Shakarchi, "Probabilistic techniques in a.c. load flow analysis," *Proc. IEEE*, vol. 124, pp. 154-160, Feb. 1977.
- [5] M. Madrigal and K. Ponnambalam, "Probabilistic optimal power flow," *Proc. 1998 IEEE Can. Conf. Electrical and Computer Engineering*, p. 385-388, 1998.
- [6] J. Hetzer, D. C. Yu and K. Bhattarai, "An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, June 2008.

- [7] I. G. Damousis, M. C. Alexiadis, J. B. Theocharis and P. S. Dokopoulos, "A fuzzy model for wind speed prediction and power generation in wind parks using spatial correlation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, pp. 3352-3361, Jun. 2004.
- [8] S. Li, D. C. Wunsch, E. A. O'Hair and M. G. Giesselmann, "Using neural networks to estimate wind turbine power generation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, pp. 276-282, Sep. 2001.
- [9] B. G. Brown, R. W. Katz and A. H. Murphy, "Time series models to simulate and forecast wind speed and wind power," *J. Clim. Appl. Meterol.*, vol. 23, pp. 1184-1195, 1984.
- [10] J. M. Morales and J. Pérez-Ruiz, "Point Estimate Schemes to Solve the Probabilistic Power Flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 1594-1601, November 2007.
- [11] M. E. Harr, "Probabilistic estimates for multivariate analysis," *Appl. Math. Model.*, vol. 13, p. 313-318, 1989.
- [12] H. P. Hong, "An efficient point estimate method for probabilistic analysis," *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 261-267, 1998.
- [13] H. Zhang and P. Li, "Probabilistic analysis for optimal power flow under uncertainty," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, no. 5, p. 553-561, 2010.
- [14] M. Shahidehpour, H. Yamin and Z. Li, "Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management," John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [15] R. Coutu, "Locational Marginal Pricing," *ISO New England's Wholesale Energy Market (Intermediate) - WEM 201*, Nov. 2006.
- [16] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, New York: Wiley, 1984.
- [17] A. J. Conejo, E. Castillo, R. Minguez and F. Milano, "Locational marginal price sensitivities," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, pp. 2026-2033, Nov. 2005.
- [18] H. Cheng, Y. Hou and F. Wu, "Probabilistic wind power generation model: Derivation and applications," *International Journal of Energy*, vol. 5, no. 2, 2011.
- [19] R. Billiton and L. Gan, "Wind Power Modeling And Application In Generating Adequacy Assessment," *IEEE Communications, Computers and Power in the Modern Environment Conf.*, pp. 100-106, 1993.