پخش بار بهینه مقاوم در شبکه های قدرت با در نظر گرفتن عدم قطعیت نیروگاه های تجدید پذیر و بارها

سامان هوشمند- دکتر علی اصغر قدیمی

کارشناس ارشد مهندسی برق، samanhoshmand95@gmail.com ، دکتر علی اصغر قدیمی aa.ghadimi@gmail.com

چکیده

بررسی وارد کردن عدم قطعیت در محاسبه پخش باربهینه مقاوم به طورفزاینده ای مهم است زیرا بیشتر تولیدکننده های تجدید پذیر که در سیستم های قدرت جدید متصل اند دارای خروجی متغییر و متناوب اند، همچنین پیش بینی تغییر بار و خروجی تولید کننده های تجدید پذیر، به طور دقیق اغلب مشکل است. این مقاله الگوریتم پخش بار بهینه ای پیشنهاد می کند تا نتایج بهینه ای به دست آورد که نه تنها بیشترین احتمال را برای کمترین هزینه ی تولید داشته باشد بلکه حالت های مقاوم عدم قطعیت را نیز در نظر گیرد. در این مقاله هدف پخش بار بهینه ای است که هزینه تولید را برای سناریوهایی که بیشترین احتمال را دارد، مینیمم می کند. تاثیرات روش پخش بار پیشنهاد شده در این مقاله، بر روی سیستم هایی نشان داده شده است. سه شبیه سازی بر روی سیستم های ۱۴ باس، ۱۱۸ باس و ۲۷۳۶ باس با حضور نیروگاه های بادی و خورشیدی انجام شده است که حل مسئله پخش بار بهینه بر مبنای حداقل کردن تابع هدف می باشد. نتایج بهینه ای به دست می آیدکه بیشترین احتمال را برای کمترین هزینه ی تولید دارد و همچنین حالت های مقاوم عدم قطعیت را نیز در نظر می گیرد.

واژه های کلیدی :

پخش بار بهینه،پخش بار احتمالی،نیروگاه تجدیدپذیر،آرایه متعامدتاگوچی، عدم قطعیت

۱.مقدمه

پخش بار بهینه به عنوان ابزاری کارآمد، نقش بسزایی در بهره برداری هر چه اقتصادی تر از سیستم قدرت ایفا می نماید. به طورکلی، پخش بار اقتصادی[1]وسیله ای برای کنترل توزیع توان حقیقی مورد تقاضای مشترکین، بین واحد های تولید کننده ی موجود در سیستم قدرت است و از آن در مسایل تبادل اقتصادی بین چند ناحیه سیستم و به مدار آوردن نیروگاه ها[2]استفاده می شود. علاوه بر این به عنوان ابزاری در طراحی سیستم های قدرت نیز مورد استفاده می گیرد. مسئله بهره برداری اقتصادی از سیستم قدرت از زمانی مطرح شد که دو یا چند واحد تولید انرژی الکتریکی با یکدیگر در تامین بار یک سیستم الکتریکی مشارکت داشته و ظرفیت کل آن ها در مجموع بیش ازمیزان مصرف بوده و لذا آرایش های متفاوتی از میزان تولید واحد ها را به دنبال داشته است.

پخش بار اقتصادی عمدتا یک مسئله بهینه سازی غیر خطی است که معمولا هدف آن حداقل نمودن هزینه تولید است.گاهی اهداف دیگری مانند بهبود امنیت سیستم وکاهش صدمات زیست محیطی ناشی از احتراق سوخت های فسیلی در نیروگاه های حرارتی، نیز، هم زمان مورد نظر است.این بهینه سازی تحت یک دسته قیود معادله ای و نامعادله ای انجام می پذیرد. قیود معادله ای سیستم بر اساس نوع مدل انتخابی برای شبیه سازی شبکه و قیودنامعادله ای با توجه به محدودیت های فیزیکی و عملیاتی موجود در سیستم تعیین می شوند.

1Economic Dispatch

2Unit Commitment

بنابراین مسئله پخش بار بهینه در سیستم قدرت را می توان توسط یک مدل بهینه سازی غیر خطی با محدودیت که دارای چندین تابع هدف است، نشان داد.

چنانچه ذکر شد، مسئله پخش بار بهینه را می توان توسط یک مسئله بهینه سازی غیر خطی با چند تابع هدف نشان داد، در بخش بزرگی از کارهای تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است یکی از سه هدف کاهش هزینه ها، بهبود امنیت سیستم و یا کاهش تاثیرات نامساعد زیست محیطی به تنهایی به عنوان تابع هدف مورد توجه قرار گرفته و برای حل آن ها از الگوریتم های برنامه ریزی غیر خطی متعددی که هر یک دارای محاسن و کاستی هایی است، استفاده شده است.

در صورتی که بهبود عملکرد سیستم در یک بازه ی زمانی مورد نظر باشد، فرآیند بهینه سازی وارد مرحله بسیار پیچیده ای می گردد و در این راستا مسائل گوناگون و عوامل موثری بر رفتار سیستم مطرح می شوند که در زیر به اختصار وبه طوراجمالی به چند مورد اشاره می کنیم:

۱-برنامه ریزی ساعتی در مدار قرار دادن نیروگاه ها، به این معنی که دریک ساعت معین، چه واحدهایی وارد مدار گردیده و یا ازآن خارج شوند. این مسئله به در مدار قرار دادن نیروگاه ها موسوم است.

۲-برنامه ریزی ساعتی تولید نیروگاه های آبی بر اساس محاسبات مربوط به سطح آب پشت مخازن و سد ها جهت بهبود عملکرد سیستم، این موضوع به هماهنگی نیروگاه های آبی وحرارتی[3]معروف است.

۳-برنامه ریزی ساعتی تولید واحد های چند منظوره[4] پراکنده مثل نیروگاه های فتوولتائیک خورشید ی یا نیروگاه های بادی، این موضوع به مسئله تولید واحد های پراکنده[5]موسوم است.

۴-تعیین میزان و ترتیب تعمیرات دوره ای واحد ها بدون نقضظرفیت رزرو کافی و مناسب مورد نیاز سیستم و در عین حال کمینه نمودن هزینه تولید، این موضوع به برنامه ریزی تعمیرات[6]موسوم است.

۲.فرمولاسیون پخش بار بهینه

۱,۲. تابع هدف OPF برای حداقل سازی هزینه سوخت

مسأله OPF می تواند به عنوان یک مساله بهینه سازی فرمول بندی شود که به شکل زیراست:

تابع کلی هزینه تولید به شکل زیر بیان می شود:[۱۷]

$$F(P_G) = \sum_{i=1}^{N_G}\left(\alpha_i + \beta_i P_{G_i} + \gamma_i P_{G_i}^2\right) \qquad (۱)$$

تابع هدف برابراست با:

$$Min\ F(P_G) = 0 \qquad (۲)$$

نسبت به ارضای قیود برابری غیرخطی زیر:

$$g(x,u) = 0 \qquad (۳)$$

و قیود نابرابری غیرخطی زیر:

$$h(x,u) \le 0 \qquad (۳)$$

$$u^{min} \le u \le u^{max} \qquad (۴)$$

$$x^{min} \le x \le x^{max} \qquad (۵)$$

$F(P_G)$ تابع هزینه کلی، $f(x,u)$ تابع عددی، $g(x,u)$قیود برابری غیرخطی راارائه می‌دهد (معادلات پخش بار) و $h(x,u)$ قید نابرابری غیرخطی بردارهای x وu.

بردار x شامل متغیرهای وابسته است که عبارتنداز :

دامنه ولتاژ باس ها و زاویه های فاز، خروجی MVARژنراتورهای طراحی شده برای کنترل ولتاژ باس، پارامترهای ثابت مثل زاویه باس مرجع، خروجی هایMWوMVAR ژنراتورکنترل نشده، بارهای MW و MVARکنترل نشده، ولتاژباس های ثابت،

3HydroThermal Coordination

4Co-Generation Plants

5Dispersed Generation Problem

6Maintenance Scheduling

پارامترهای خطی بردار u شامل متغیرهای کنترل است که عبارتنداز:

تولید توان اکتیو و راکتیو، زاویه فاز شیفترها[7] مبدل شبکه[8] جریان های DC خط انتقال، تنظیمات ولتاژ کنترل، تنظیمات تپ ترانسفورماتور LTC

قیود برابری و نابرابری عبارتند از:

محدودیت های روی تمام متغیرهای کنترل، معادلات پخش بار، توازن تولید/بار ،محدودیت های جریان شاخه ها (MW,MVAR,MVA)، محدودیت ولتاژ باس ها، محدودیت MVAR ژنراتورها

۲.۲.روش سناریوسازی تاگوچی

هدف ارائه روشی است که انعطاف پذیری زیادی در برابر تغییرات نیروگاه های تجدید پذیرداشته باشد. با توجه به عدم قطعیت نیروگاه های تجدید پذیر و خروجی غیرقابل پیش بینی آن ها استفاده از روش هایی که بیشترین احتمال ممکن را برای پیش بینی پذیری داشته باشداهمیت بسیاری دارد. الگوریتم پیشنهادی روش طراحی ارائه شده به کمک سناریو سازی است. الگوریتم پخش بار بهینه ای ارائه خواهد شدتا نتایج بهینه ای به دست آوریم که بیشترین احتمال را برای حالت های مقاوم عدم قطعیت را در نظر گیرد. به عبارت دیگر نتایج پخش بار را با دیگر سناریوهای ممکن که محدودیت های پخش بار در آن اصلاح شده است تطبیق دهیم. هدف مهندسی کیفیت عبارتست از طراحی کیفیت در هر محصول و همچنین فرآیندهایی که این محصولات را تولید می کنند. یکی از عناصر مهم این گونه فعالیت‌ها ارائه آزمایش‌هایی است که به روش آماری طراحی گردیده اند. متأسفانه اصول طراحی آزمایش‌ها و روش‌های آماری به طور کلی آن طور که در ژاپن استفاده شده اند در کشورهای غربی مورد استفاده قرار نگرفته اند. مهندسان ژاپنی با این روش‌ها آشنایی بیشتری پیدا کرده اند و در نتیجه روش‌های طراحی آزمایش ها نیز برای آنها به عنوان یک ابزار مهندسی تلقی می گردد. در اوایل دهه ۱۹۸۰ پروفسور گنیچی تاگوچی روش خود را جهت استفاده از طراحی آزمایش‌ها برای موارد زیر ارائه نمود[۲۳]:

- طراحی محصولات یا فرآیندها به طوری که آن‌ها نسبت به شرایط محیطی مقاوم باشند.
- طراحی و توسعه محصولات به طوری که آن‌ها نسبت به تغییرات مولفه های خود مقاوم باشند.
- حداقل نمودن تغییرات در اطراف مقدار هدف.

منظور از واژه "مقاوم" در جملات فوق این است که محصول یا فرآیند به طور یکنواخت با تمرکز یافتن بر روی نقطه هدف به فعالیت خود ادامه دهد و نسبت به عامل هایی که کنترل آن‌ها مشکل است نسبتاً بی تفاوت می ماند. تاگوچی سه فعالیت توصیف شده فوق را طراحی پارامتر می نامد.

پروفسور تاگوچی سه مرحله را در توسعه محصول (یا فرآیند) در نظر می گیرد: طراحی سیستم، طراحی پارامتر و طراحی تلورانس, بطور خلاصه فلسفه تاگوچی شامل سه نظریه اصلی زیر می باشد:

- محصولات و فرآیندها باید به گونه ای طراحی گردند تا نسبت به منابع خارجی تغییرپذیر مقاوم باشند.
- روش های طراحی آزمایش ها، یکی از ابزار مهندسی جهت دست یافتن به چنین هدفی است.
- تولید در نقطه هدف در مقایسه با انطباق با مشخصات فنی از اهمیت بیشتری برخوردار است.

روش تاگوچی برای بهبود کیفیت محصولات و فرآیندهایی طراحی می شود که در آن عملکرد سیستم بیشتر به فاکتورها بستگی داشته باشد. در طرح ریزی آزمایشات و استراتژی توسعه، برای ایجاد کلیه ترکیبات ممکن از فاکتورها به همراه محدوده های قابل قبول در هرکدام از فاکتورهای مربوطه معمولاً منطق ساده ای به کار گرفته می شود. اما در پروژه های مهندسی که دارای تعداد زیادی از فاکتورهای موثر است، تعداد ترکیبات ممکن خیلی زیاد می باشد. به علاوه، در پروژه های خاص ممکن است نیاز داشته باشیم تا تداخلات بین فاکتورهای تاثیرگذار را هم بررسی کنیم. روش مرسوم در کاهش تعداد ترکیبات آزمایش، استفاده از آزمایشات فاکتوریلی جزئی است. تاگوچی مجموعه ویژه‌ای از طرح‌های کلی برای آزمایشات فاکتوریلی ایجاد کرده است که اغلب کاربردها را پوشش می دهد. آرایه های ارتوگونال، جزئی از این مجموعه طراحی ها می باشد. استفاده از این آرایه ها ما را در تعیین کمترین تعداد آزمایشات مورد نیاز برای مجموعه ای از فاکتورها یاری می کند. آرایه های ارتوگونال برای آزمایشات فاکتوریلی جزئی، دستورالعملی فراهم می کند که شامل تعدادی از ترکیبات آزمایشات است. هنگامی که برای کلیه فاکتورها مخلوطی از سطوح مورد بحث بوده و تداخل فاکتورها بی اهمیت باشند، آرایه های ارتوگونال استاندارد اکثر نیازهای طراحی آزمایشات را بر طرف خواهند کرد. در صورت وجود مخلوطی از سطوح و تداخلات، اصلاح آرایه های ارتوگونال اجتناب ناپذیر است.

7Phase-shifter angel

8 Net interchange

۳.۲.اهداف آزمایش

تعیین متغییرهایی که بیشتری ناثیر را بر روی پاسخ x دارند.
تعیین مقادیر متغیرهای y تاثیرگذار بر پاسخ به گونه ای که x تقریبا به مقدار اسمی خود نزدیک باشد.
تعیین مقادیر متغیرهای y تاثیرگذار بر پاسخ به گونه ای که تغییر پذیری x کم باشد.
تعیین مقادیر متغیرهای y تاثیرگذار بر پاسخ به گونه ای که اثرات ناشی از متغییرهای غیر قابل کنترل z حداقل شود.
روش تعریف و بررسی تمامی شرایط ممکن در یک آزمایش شامل چند فاکتور" طراحی آزمایشات نامیده می شود.
این روش در بعضی نشریات طراحی فاکتوریلی نامیده می شود.
درطراحی فاکتوریلی تعداد کامل آزمایشات ممکن N عبارتستاز : $N=L^m$ که در آن L تعداد سطوح اتخاب شده است و m تعداد فاکتورهای تحت بررسی است.
در این گونه آزمایشات دقت آزمایش با استفاده از تحلیل آماری (ANOVA) تعیین می شود.
اگر فرض کنیم در یک آزمایش دارای 15 جزء مختلف(فاکتور) هر کدام تنها در 2 سطح قابل تغییر باشند دراین حالت $2^{15}=32768$آزمایش می بایست انجام گیرد تا بهترین کیفیت را به دست آورد. ازدیدگاه هزینه و زمان، برنامه تحقیق و بهینه سازی با این حجم گزاف بوده و صرفه اقتصادی ندارد. در این گونه موارد از آزمایشات فاکتوریلی جزئی استفاده میشودکه منجر به کاهش تعداد آزمایشات می گردند.
این قبیل آزمایشات مستلزم محاسبات ریاضی زیاد در مراحل طراحی آزمایشات و تحلیل نتایج است. تاگوچی این نوع طراحی را ساده واستاندارد کرد به طوری که دو مهندس به یک نتیجه برسند.
تاگوچی برای ارائه آزمایشاتش گروه های ویژه ای از آرایه های ارتوگونال (OA) را ترکیب و ایجاد نمود. آرایه های آرتوگونال فرایند طراحی آزمایشات را سهولت می بخشد. آرایه های ارتوگونال در سطح های ۲و۳و۴و...تعریف می شود.به عنوان مثال آزمایشات تاگوچی در دوسطحی و چند متغیره در ادامه آورده شده است.

آرایه ارتوگونال

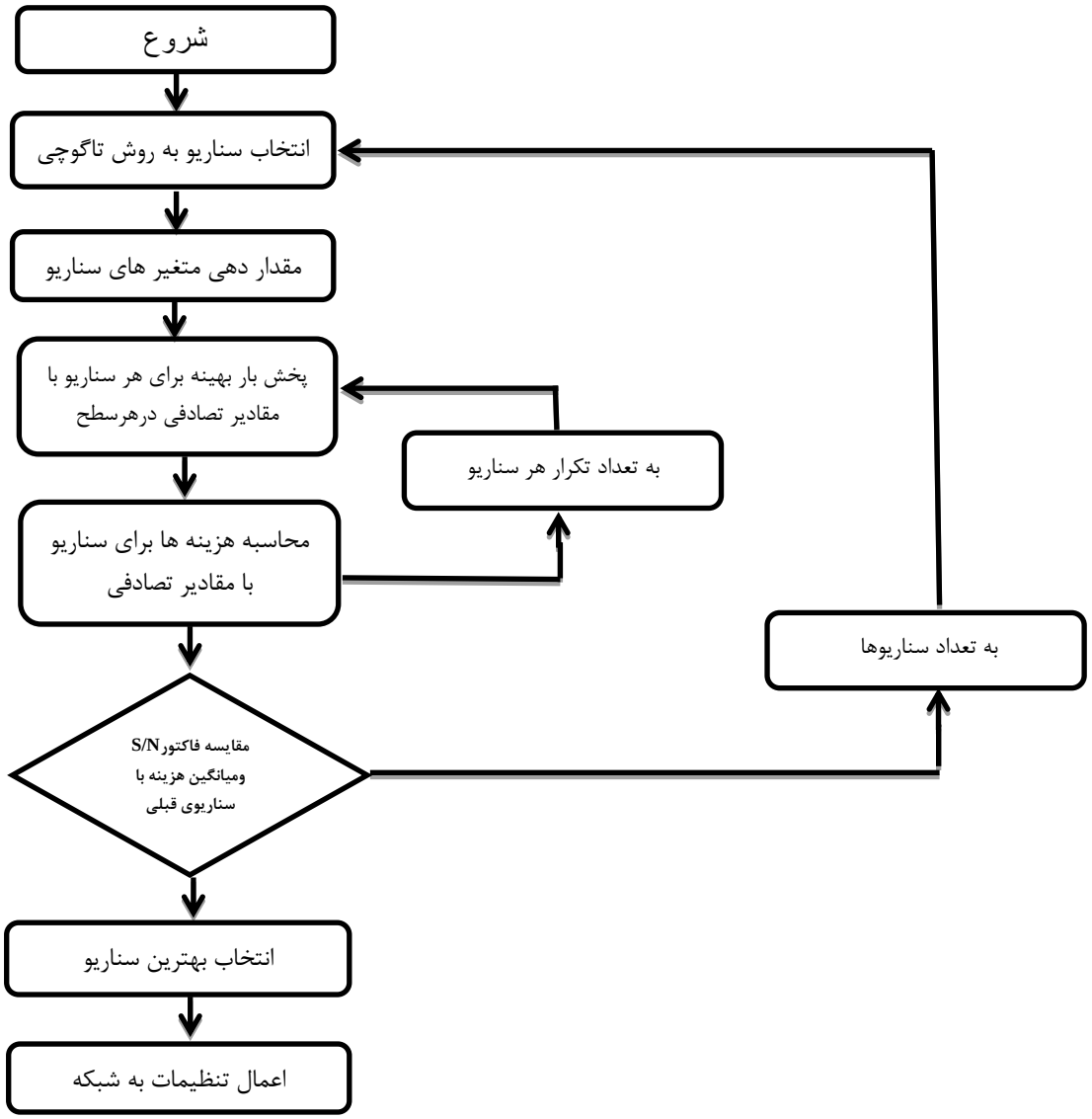
آرایه ارتوگونال L8 (27) برای تعداد متغیر های مختلف به شکل زیر است:

جدول ۱ . آرایه های آرتوگونال دو سطحی برای دو متغیره و سه متغیره

دو سطحی و دو متغییر				دو سطحی و دو متغییر				
Taghuchi , P=2 ,L=2				Taghuchi , P=3 ,L=2				
Run #	*a*	*b*	*X*	*Run #*	a	b	c	**X**
1	1	1	X_1	1	1	1	1	**X1**
2	1	2	X_2	2	1	2	2	**X2**
3	2	1	X_3	3	2	1	2	**X3**
4	2	2	X_4	4	2	2	1	**X4**

روشی که تاگوچی شدیدا برای آزمایشات همراه با تکرار توصیه می کند استفاده از نسبت سیگنال به نویز(S/N) برای مراحل یکسان در تحلیل است . این تحلیل با استفاده از تغییرات نتایج، بهترین و قوی ترین شرایط کاری را تعیین می کند. این نسبت پراکندگی حول یک مقدار مشخصه را بیان می کند هر چه نسبت فوق بیشتر باشد پراکندگی کمتر خواهد بود
نسبت S/N با توجه به تابع هدف، یعنی زمانی که هر چه تابع هدف کوچک تر باشد، برای ما بهتر باشد، به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{S}{N}_{(Smaller)} = -10\log\left(\frac{\sum(y_i^2)}{n}\right) \qquad (۶)$$



شکل ۱. روند نمای حل مسئله

در این مقاله جهت شبیه سازی ها از افزونه ی mathpower در نرم افزار MATLAB استفاده شده است.

۳.مطالعه موردی

۱.۳.داده های مسئله

مدل نیروگاه بادی

در این پروژه توزیع سرعت باد با مدل تابع ویبول[۹]مدل شده است، که پارامتر مقیاس و پارامتر شکل به ترتیب ۱۱,۰۰۸۶ و ۱,۹۶۲۲ m/s هستند.[۱۶]

بعد از شبیه سازی سرعت باد به وسیله ی تابع ویبول ، توان خروجی نیروگاه بادی به صورت زیر محاسبه می شود :

9weibull

$$P_R = \begin{cases} P_{rate}(v - v_{ci})/(v_{rate} - v_{ci}) & v_{ci} \le v \le v_{rate} \\ P_{rate} & v_{rate} \le v \le v_{co} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۷)$$

که در آن v_{ci}= ۴ m/s، v_{rate}= ۱۳٫۶۱ m/s و v_{co} =۲۵ m/s می باشد.
P_{rate} برای سیستم ۱۴ باس برابر ۴۰ مگاوات و برای سیتم های ۱۱۸ باس و ۲۷۳۶ باس برابر ۲۰۰ مگاوات می باشد.

سطح بندی سرعت باد

در این مقاله برای باد، دو سطح به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

جدول ۲.سطح بندی سرعت باد

سطح	سرعت باد
۱	۴ << V ۱۳٫۶۱
۲	۱۳٫۶۱ < V < ۲۵

مدل تابش خورشیدی با تابع بتا مدل شده است. مرجع[۶]

$$f_b(s) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} * s^{(\alpha-1)} * (1-s)^{(\beta-1)}, & \text{for } 0 \le s \le 1, \alpha \ge 0, \beta \ge 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۸)$$

که s تابش خورشیددر سطح ماژول فتوولتائیک(solar irradiance[1]) برحسب kw/m^2 و $f_b(s)$ تابع توزیع بتا برای s است.
همچنین α و β پارامترهای تابع توزیع بتا می باشند که از روابط زیر به دست می آیند:

$$\alpha = \frac{\mu * \beta}{1 - \mu} \quad (۹)$$

$$\beta = (1 - \mu) * \left(\frac{\mu * (1 + \mu)}{\sigma^2} - 1\right) \quad (۱۰)$$

که μ میانگین و σ انحراف معیار از متغیر تصادفی s می باشد. به این ترتیب توان یک نیروگاه خورشیدی به صورت زیر مدل می شود:

$$P_{av} = P_{STC} * f_{b(s)} \left[1 + \gamma(T_c - 25)\right] \quad (۱۱)$$

P_{STC} حداکثر توان ماژول فتوولتائیک در شرایط آزمون استاندارد (STC) که مقدار آن برای سیستم های ۱۴ باس ۴۰مگاوات و برای سیستم های ۱۱۸باس و۲۷۳۶باس ۲۰۰ مگاوات می باشد. γ ضریب دمای ماژول فتوولتائیک($^{\circ}C^{-1}$)
Tدمای سلول فتوولتائیک (ماژول) (C°) است که از رابطه ی زیر به دست می آید :[۲ و۵]

$$T_c = T_a + f_{b(s)}(T_{NOCT} - 20) \quad (۱۲)$$

که در آن

P_{STC} = ۲۵۰ W T_{NOCT} = ۴۶ °C γ = -.۰۰۴۵ $°C^{-1}$

1 Solar irradiance

سطح بندی انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی نیز طبق جدول (۳) در دو سطح تقسیم بندی شده است

جدول ۳ . سطح بندی انرژی خورشیدی

سطح	تابش خورشیدی
۱	0.3< S < 0.7
۲	0.45< S <0.55

مدل سازی بار

در این مقاله مدل بار با توزیع نرمال مدل شده و با انحراف معیار ۵ درصد و میانگین مقادیر نامی سیستم در نظر گرفته شده است.[۱۶]

۲,۳. سیستم های مورد شبیه سازی

سیستم های ۱۴ باس، ۱۱۸ باس و ۲۷۳۶جهت شبیه سازی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت که آن در مرجع[۱۲]آمده است.

شبیه سازی سیستم ۱۴ باس

در این مقله سیستم ۱۴ باس شامل ۱۴باس، ۵ ژنراتور و ۲۰خط انتقال می باشد. اطلاعات این شبکه در مرجع [۱۲] آورده شده است. محدودیت تولید توان واطلاعات تابع هزینه ژنراتورها در جدول (۴) آمده است.حداکثرظرفیت خطوط انتقال نیز در جدول (۵) آمده است

جدول۴. اطلاعات محدودیت تولید توان و تابع هزینه ژنراتورها برای سیستم ۱۴ باس

Gen. bus	Power limits (MW)		Cost parameter		
	P_{Gmin}	P_{Gmax}	c_1(\$/MW^{2}h)	c_2(\$/MWh)	c_3(\$)
1	0	332.4	0.043	20	0
2	0	140	0.250	20	0
3	0	100	0.010	40	0
6	0	100	0.010	40	0
8	0	100	0.010	40	0

جدول ۵. حداکثر ظرفیت خطوط انتقال سیستم ۱۴باس

No.	$i-j$	Capacity (MW)	No.	$i-j$	Capacity (MW)
1	1-2	80	11	6-11	40
2	1-5	40	12	6-12	40
3	2-3	50	13	6-13	40
4	2-4	40	14	7-8	40
5	2-5	40	15	7-9	40
6	3-4	50	16	9-10	40
7	4-5	80	17	9-14	20
8	4-7	40	18	10-11	20
9	4-9	40	19	12-13	20
10	5-6	40	20	13-14	20

سناریو سازی به وسیله تا گوچی در سیستم ۱۴باس به صورت زیر است:

$$L_4(2^3) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

شکل ۲. آرایه های دوسطحی تاگوچی برای ۳ متغیر و۴سناریو

شبیه سازی سیستم ۱۱۸ باس

در این مقاله سیستم ۱۱۸ باس شامل ۱۱۸باس، ۵ ژنراتور و ۲۰خط انتقال می باشد. اطلاعات این شبکه در مرجع [۱۲] آورده شده است. محدودیت تولید توان واطلاعات تابع هزینه ژنراتورها در مرجع [۱۲]آمده است.حداکثرظرفیت خطوط انتقال نیز در جدول (۶) آمده است.

جدول۶. محدودیت ظرفیت خطوط انتقال سیستم ۱۱۸ باس

$i-j$	Capacity (MW)	$i-j$	Capacity (MW)
8-9	550	8-5	500
9-10	550	others	300

$$L_8(2^7) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}.$$

شکل۳ . آرایه های دوسطحی تاگوچی برای حداکثر ۷ متغیر و ۸سناریو

سناریو سازی به وسیله تا گوچی در سیستم ۱۱۸باس و هم چنین ۲۷۳۶ باس طبق آرایه های ارتوگونال تاگوچی در شکل (۳) آمده است (با این توضیح که چون تعداد متغیرهای عدم قطعیت ۵ عدد هستند از ستون های۶،۷و۸آرایه ها استفاده نمی شود.)

شبیه سازی سیستم ۲۷۳۶ باس

اطلاعات شبکه ۲۷۳۶ باس در مرجع [۱۲] آورده شده است.

۳،۳. نتایج عددی

تحلیل نتایج سیستم ۱۴باس

جدول ۷. محاسبه هزینه ها و فاکتور S/Nبرای سناریوهای مختلف در سیستم ۱۴باس

سناریو	نیروگاه بادی	نیروگاه خورشیدی	میانگین هزینه ($\times 10^3$\$/hr)	فاکتورS/N
۱	سطح۱	سطح۱	6.8887	-177.4852
۲	سطح۱	سطح۲	6.4414	-175.9846
۳	سطح۲	سطح۱	6.2872	-174.1393
۴	سطح۲	سطح۲	5.6451	-173.1985

همان طور که در جدول (۷) نشان داده شده است از فاکتور S/N برای مقایسه ی سناریو ها استفاده می شود تا بهترین و بدترین سناریو مشخص شود. فاکتور S/N ، برای هر سناریو محاسبه ونشان داده شده ، که برای هر سناریو آزمایش ۵۰۰۰بار نکرار شده است. از آن

جایی تابع هدف ما کمترین هزینه می باشد، بیشترین مقدار فاکتور S/N برای این نسبت بهترین سناریو را مشخص می کند دارای پراکندگی کمتر است که در سناریوی چهارم اتفاق افتاده است .همچنین بدترین سناریو مربوط به کمترین مقدار برای نسبت S/N می باشدکه در سناریوی اول اتفاق افتاده است . به این ترتیب بهترین و بدترین سناریو ها به ترتیب سناریوهای چهارم و اول می باشد که همچنین بیشترین میانگین هزینه برای سناریوی اول وکمترین میانگین هزینه برای سناریوی چهارم می باشد .

طبق جدول (۸) اگرچه مینیمم هزینه برای پخش بار بهینه ی پیشنهادی از هزینه پخش بار معمولی بیشتر است، اما واضح است که پخش بار پیشنهادی درجات بالاتری از امکان پذیری را دارد.در واقع پخش بار بهینه پیشنهادی عملی تر است تا عملگرهای سیستم قدرت را هدایت کند.همچنین چندین سناریو در پخش بار پیشنهادی پوشش بهتری دارد نسبت به پخش بار معمولی که تنها یک سناریو رادر نظر می گیرد.به عبارتی بالاتر بودن هزینه پخش بار بهینه پیشنهادی نسبت به پخش بار معمولی به این علت است که Opf Robust هزینه را با بیشترین احتمال ممکن محاسبه می کند .

در جدول (۹) تولید ژنراتورها در دو پخش بار معمولی وپخش بار بهینه قدرتمند مقایسه شده است.

جدو ل ۸. مقایسه هزینه ها در پخش بار معمولی و پخش بار بهینه ی پیشنهادی برای سیستم۱۴باس

Opf Method		Cost ($\times 10^3$\$/hr)
Robust opf	max	6.8887
	min	5.6451
Traditional opf		5.1733

جدول ۹. مقایسه تولید ژنراتورها در پخش بار بهینه معمولی و پخش بار بهینه ی پیشنهادی در سیستم۱۴باس(مگاوات)

Bus number	Traditional opf(MW)	Robust opf(MW)	
		Max cost	Min cost
1	106.2669	120.0000	110.1023
2	28.4267	33.8837	27.8603
3	0.0000	0.0000	11.7666
6	43.8063	44.0907	43.5333
8	0.5001	17.5789	11.1707

تحلیل نتایج سیستم ۱۱۸ باس

طبق جدول(۱۰) از آن جایی تابع هدف ما کمترین هزینه می باشد، بیشترین مقدار برای نسبت S/N ، بهترین سناریو و کمترین مقدار بدترین سناریو را مشخص می کند. به این ترتیب بهترین و بدترین سناریو ها به ترتیب سناریوهای هفتم و اول می باشد که همچنین بیشترین میانگین هزینه برای سناریوی اول وکمترین میانگین هزینه برای سناریوی هفتم می باشد.

طبق جدول (۱۱) هزینه برای پخش بار بهینه ی پیشنهادی از هزینه پخش بار معمولی بیشتر است، که به دلایلی که در مورد مشابه در سیستم ۱۴ باس گفته شد ناشی از قوی بودن پخش بار پیشنهادی است

جدول ۱۰. محاسبه هزینه ها و فاکتور S/Nبرای سناریوهای مختلف در سیستم ۱۱۸باس

سناریو	نیروگاه بادی۱	نیروگاه بادی۲	نیروگاه بادی۳	نیروگاه خورشیدی۱	نیروگاه خورشیدی۲	هزینه ($\times 10^3$\$/hr)	S/N
۱	سطح۱	سطح۱	سطح۱	سطح۱	سطح۱	109.5105	-232.0341
۲	سطح۲	سطح۱	سطح۲	سطح۱	سطح۲	99.712	-229.6684
۳	سطح۱	سطح۲	سطح۲	سطح۱	سطح۱	102.19	-230.6777
۴	سطح۲	سطح۲	سطح۱	سطح۱	سطح۲	99.366	-229.8970
۵	سطح۱	سطح۱	سطح۱	سطح۲	سطح۲	105.64	-230.5744
۶	سطح۲	سطح۱	سطح۲	سطح۲	سطح۱	100.24	-229.8458
۷	سطح۱	سطح۲	سطح۲	سطح۲	سطح۲	96.680	-229.0323
۸	سطح۲	سطح۲	سطح۱	سطح۲	سطح۱	99.384	-229.9811

جدول۱۱. مقایسه هزینه ها در پخش بار بهینه معمولی و پخش بار بهینه ی پیشنهادی برای سیستم۱۱۸ باس

Opf Method		Cost($\times 10^3$\$/hr)
Robust opf	max	109.51
	min	96.680
Traditional opf		88.851

نتایج سیستم ۲۷۳۶ باس

طبق جدول (۱۲) محسبه ی فاکتور S/N مشاهده می شود که سناریوی اول دارای کمترین و سناریوی چهارم دارای بیشترین مقدار این فاکتور می یاشد یا به عبارتی سناریوی اول بیشترین هزینه و سناریوی چهارم دارای کمترین هزینه می باشد.

جدول۱۲. محاسبه هزینه ها و فاکتور S/Nبرای سناریوهای مختلف در سیستم ۲۷۳۶باس

سناریو	نیروگاه بادی۱	نیروگاه بادی۲	نیروگاه خورشیدی۱	نیروگاه خورشیدی۲	هزینه تولید ($\times 10^3$\$/hr)	S/N
۱	سطح۱	سطح۱	سطح۱	سطح۱	1202.8	-280.3934
۲	سطح۲	سطح۱	سطح۲	سطح۱	1200.3	-279.9349
۳	سطح۱	سطح۲	سطح۲	سطح۱	1199.3	-279.7488
۴	سطح۲	سطح۲	سطح۱	سطح۱	1198.6	-279.5806
۵	سطح۱	سطح۱	سطح۱	سطح۲	1201.4	-280.0363
۶	سطح۲	سطح۱	سطح۲	سطح۲	1199.8	-279.8179
۷	سطح۱	سطح۲	سطح۲	سطح۲	1199.4	-279.8122
۸	سطح۲	سطح۲	سطح۱	سطح۲	1199.7	-279.8177

جدول ۱۳. مقایسه هزینه ها در پخش بار بهینه معمولی و پخش بار بهینه ی پیشنهادی برای سیستم۲۷۳۶ باس

Opf Method		Cost($\times 10^3$\$/hr)
Robust opf	max	1202.8
	min	1198.6
Traditional opf		1197.8

درجدول (۱۴) مقدار تولید ژنراتورها برای سیستم ۲۷۳۶ باس برای ۲۰ باس اول با یکدیگر مقایسه شده اند،

جدول ۱۴. مقایسه تولید ژنراتورها در پخش بار بهینه معمولی و پخش بار بهینه ی پیشنهادی در سیستم۲۷۳۶باس(مگاوات)

Bus	Opf tradiotional	Robust opf Max cost	Robust opf Min cost
17	0	0	0
26	370.0000	370.0000	369.9978
27	360.0000	360.0000	359.9978
27	360.0000	360.0000	359.9978
27	370.0000	370.0000	369.9978
26	370.0000	370.0000	369.9978
28	370.0000	370.0000	369.9978
28	0	0	0
28	370.0000	370.0000	369.9978
29	0	0	0
29	370.0000	370.0000	369.9978
29	370.0000	370.0000	369.9978
42	130.0000	130.0000	130.0033
42	0	0	0
42	110.0000	110.0000	110.0033
43	120.0000	120.0000	120.0033
43	130.0000	130.0000	130.0033
43	0	0	0
44	255.0000	255.0000	255.0033
44	0	0	0

در این بخش به تحلیل نتایج روش ارائه شده برای پخش بار بهینه برای سیستم های ۱۴باس، ۱۱۸باس و سیستم ۲۷۳۶ باس پرداختیم. هزینه تولید ومقدار توان تولیدی ژنراتورها برای این سیستم ها مقایسه شد.اثربخشی و استحکام روش پخش بار پیشنهادی برای سیستم های ۱۴باس، ۱۱۸باس و سیستم ۲۷۳۶ باس تست شد و نتایج تایید کننده این روش بود.

همچنین نشان داده شد که اگرچه مینیمم هزینه برای پخش بار بهینه ی پیشنهادی از هزینه پخش بار معمولی بیشتر است، اما واضح است که پخش بار پیشنهادی درجات بالاتری از امکان پذیری را دارد.در واقع پخش بار بهینه پیشنهادی عملی تر است تا عملگرهای سیستم قدرت را هدایت کند. همچنین چندین سناریو در پخش بار پیشنهادی پوشش بهتری دارد نسبت به پخش بار معمولی که تنها یک سناریو رادر نظر می گیرد.به عبارتی بالاتر بودن هزینه پخش بار بهینه پیشنهادی نسبت به پخش بار معمولی به این علت است که OPF Robust هزینه را با بیشترین احتمال ممکن رخ دادن محاسبه می کند . به طور کلی در محاسبه پخش بار معمولی به منظور به دست آوردن حداقل هزینه تولید، ژنراتورهایی که کمترین هزینه ی تولید را دارند بیشترین تولید را دارند. با این حال کم نیستند زنراتورهایی که هزینه کمی دارند اما به دلیل محدودیت ها با ظرفیت کامل خود کار نمی کنند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در پخش با بهینه معمولی، ژنراتورها به گونه ای تنظیم می شوند که به حالت هایی منجر می شود که بزرگی توان عبوری از خطوط به همان اندازه ی بزرگی ظرفیت خطوط انتقال است. اگرطبق پخش بار بهینه معمولی برنامه ریزی کنیم در مواردی که بار و نیروگاه های تجدیدپذیر عدم قطعیت هستند، تغیرات بار و تجدیدپذیر احتمال زیادی دارد که در خطوط انتقال سیستم اضافه باری رخ دهد.در مقابل تغییرات بار وتجدیدپذیر درپخش بار پیشنهادی در این مقله نسبت به پخش بار قطعی (معمولی) هزینه افزایش می یابد واین افزایش هزینه را می توان این گونه تحلیل کزد که در واقع ظرفیت برخی از خطوط برای تغییرات رزرو شده اند. بنابراین در مقایسه با پخش بار سنتی هزینه ی تولید در پخش بار پیشنهادی افزایش می یابد زیرا ژنراتورها به شیوه ای متفاوت به کار گرفته می شوند.هدف پخش بار پیشنهادی این است که حداقل هزینه برای سناریوهایی با بیشترین امکان که فاکتورهای عدم قطعیت معین با مقدار مشخص که امکان بیشترین احتمال ظاهر شدن در فاکتورهای تصادفی را دارند.

۴. نتیجه گیری

- دراین مقاله الگوریتم پخش بار بهینه ای پیشنهاد شد که نتایج بهینه ای به دست آورد که بیشترین احتمال را برای کمترین هزینه ی تولید داشته باشد.
- با روش پیشنهادی نتایج بهینه ای به دست آمد که حالت های مقاوم عدم قطعیت را نیز در نظر گیرد.
- اگرچه هزینه تولید برای پخش بار بهینه ی پیشنهادی از هزینه پخش بار معمولی بیشتر است، اما واضح است که پخش بار پیشنهادی درجات بالاتری از امکان پذیری را دارد.
- چندین سناریو در پخش بار پیشنهادی پوشش بهتری نسبت به پخش بار معمولی دارد که تنها یک سناریو رادر نظر می گیرد.
- پخش بار پیشنهادی هزینه تولید را با بیشترین احتمال ممکن رخ دادن محاسبه می کند واین دلیلی برای بالا رفتن هزینه نسبت به روش های سنتی است.
- تغییرات بار وتجدیدپذیر درپخش بار پیشنهادی نسبت به پخش بار قطعی هزینه را افزایش می دهد وآن را اینگونه می توان تحلیل کزد که در واقع ظرفیت برخی از خطوط برای تغییرات رزرو شده اند.
- در مقایسه با پخش بار سنتی هزینه ی تولید در پخش بار پیشنهادی افزایش می یابد زیرا ژنراتورها به شیوه ای متفاوت به کار گرفته می شوند.
- این مقاله پیشنهاد می کند بهینه سازی خروجی تولید قابل کنترل که نه تنهادر هزینه تولید صرفه جویی می کنیم بلکه سیستم قدرتمندی با عدم قطعیت بار و تجدیدپذیر تولید می کنیم.
- هدف پخش بار پیشنهادی این است که حداقل هزینه برای سناریوهایی با بیشترین امکان که فاکتورهای عدم قطعیت معین با مقدار مشخص که امکان بیشترین احتمال ظاهر شدن در فاکتورهای تصادفی را دارند.
- پخش بار بهینه پیشنهادی به منظور تنظیم بهینه متغیرهای تحت کنترل سیستم برای دستیابی به تولیدی مطمئن با کمترین هزینه و بیشترین امنیت است..

مراجع

[1]. Allen J.Wood, Bruse F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control" ,John Wiley & Sons,1966.
[2]. Design Qualification Type Approval of Commercial PV Modules, IEC 61215 10.6 Performance at NOCT with IEC 60904-3 Reference Solar Spectral Irradiance Distribution, 2005
[3]. Atif S. Debs, "Modern Power Systems Control and Operation", 1992.
[4]. J. A Momoh, R. j.Koessler, M. S. Bond, B. Stott, D. Sun, A. Papalexopoulos, P.Ristanovic, “Challenges to Optimal Power Flow”, IEEE Trans. On Power systems, Vol. 12, No. 1,February 1997.
[5]. G.N. Tiwari, S. Dubey: Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications, RSC Publishing, Cambridge, UK, 2010.
[6]. Y. M. Atwa, Student Member, IEEE, E. F. El-Saadany, Senior Member, IEEE, M. M. A. Salama, Fellow, IEEE, and R. Seethapathy, Member, IEEE

[7]. SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING
Vol. 12, No. 2, June 2015, 145-170
[8]. M. Hunealt, F. D. Galiana, "A Survey of the Optimal Power Flow literature", IEEE Trans. On Power Systems, Vol.6, No.2, May 1991.
[9]. H. H. Happ," Optimal Power Dispatch – A Comprehensive Survey" IEEE Trans. On Power Apparatus and system, Vol. PAS – 96,No.3, May/june 1977, pp.847-850.

[10]. B. H. Chowdhury, Saifur Rahman, "A Review of Recent Advances in Economic Dispatch", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990, PP. 1248-1259.
[11]. Dale W. Ross, Sungkook Kim, "Dynamic Economic Dispatch of Generation",IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-99, No. 6, Nov. /Dec.1980, PP. 2060-2068.
[12]. PowerSystemsTestCaseArchive.[Online].Available:http://www.ee. washington.edu/research/pstca.
[13]. C. B. Somuah, N. Khunaizi, "Application of Linear Programming Redispatch Technique to Dynamic Generation Allocation", IEEE Trans. on Power systems, Vol. 5, no. 1, February 1990, PP.20-26.
[14]. Hermann W. Dommel, William F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions", IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-87, No. 10, Oct. 1968, PP. 1866-1876.
[15]. C. L. Wadhwa, N. K. jain, "Multiple Objective Optimal Load : a New Perspective", IEE Proc. C, Vol. 137, No. 1, January 1990, PP. 13-18.
[16]. Han Yu, Member, IEEE, and W. D. Rosehart, Senior Member, IEEE
[17].R. V. Amarnath, "Design And Development of Cluster Algorithms For Power System Problems", India,2012.
[18].Dommel H. W, Tinney W. F, "Optimal Power Flow Solutions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1968.
[19].H. H. Happ, "Optimal Power Dispatch", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974.
[20].Yan Zheng, "Optimal Power Flow", Department of Electrical Engineering Shanghai Jiao University
[۲۱]قاسم صادقی،رضادوستی، "مروری برمقالات منتشره درباره روشهای مختلف حل پخش بار بهینه تا سال ۲۰۰۵"، دانشگاه بیرجند
[۲۲]رضادوستی، " کاربردهای پخش بار بهینه در سیستمهای قدرت"، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد
[23]W.T. Foster, Basic Taguchi design of experiments, National Association of Industrial Technology Conference, Pittsburgh, PA, 2000
[24] Domnita Fratilia, Cristian Caizar, Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3, Journal of Cleaner Production 19 (2011) 640-645
[25] Taguchi G, Konishi S ,Taguchi Methods, orthogonal arrays and linear graphs, tools for quality American supplier institute, American Supplier Institute; 1987 [p. 8-35]
[26] Rao, Ravella Sreenivas; C. Ganesh Kumar, R. Shetty Prakasham, Phil J. Hobbs, The Taguchi Methodology as a statistical tool for biotechnological applications: A critical appraisal, Biotechnology Journal 3 (4):510–523.