

برنامه‌ریزی توان راکتیو در حضور توربین بادی با در نظر گرفتن نایقینی بار و تولید

احسان محرمی و سعید اسماعیلی

حداقل کردن تلفات خط [۴]، حداکثر نمودن بارپذیری سیستم [۵] و [۶] و حداقل نمودن انحراف از قراردادهای صورت گرفته [۷] برای تسویه بازار توان راکتیو پیشنهاد شده است.

کمبود توان راکتیو در سیستم قدرت، سبب افت ولتاژ نامطلوب در بعضی باس‌ها شده و اگر این مشکل برطرف نگردد، ممکن است فروپاشی ولتاژ رخ دهد. عدم تأمین توان راکتیو به مقدار کفایت، یکی از دلایل اصلی بعضی خاموشی‌های عمده در جهان بوده است [۸]. در نتیجه، پایداری ولتاژ سیستم یک پیامد مهم بوده که در برنامه‌ریزی توان راکتیو می‌بایست ملاحظه شود [۹].

در نظر گرفتن حاشیه پایداری ولتاژ به تنهایی، قرارگرفتن اندازه ولتاژ همه باس‌ها در رنج مناسب بعد از هر اغتشاش را تضمین نمی‌کند. بنابراین به عنوان مسأله تکنیکی دیگر در بحث بازار توان راکتیو، رزرو توان راکتیو کافی بعد از هر اغتشاش یا به علت نایقینی پیش‌بینی بار، برای کاهش انحراف ولتاژ نیاز است. مرجع [۱۰] تأمین رزرو توان راکتیو کافی را برای بهبود پایداری و پروفیل ولتاژ سیستم‌های قدرت پیشنهاد می‌کند. از آنجا که مسایل ولتاژ و توان راکتیو به صورت محلی در سیستم‌های قدرت بررسی می‌شوند، بنابراین در این مقاله تقسیم‌بندی سیستم به چندین ناحیه و سپس فراهم‌آوری رزرو توان راکتیو محلی کافی در هر ناحیه، در طول برنامه‌ریزی‌های مورد نظر صورت پذیرفته است.

در دهه‌های اخیر به دلیل بعضی چالش‌های جهانی مثل مسایل محیطی، بحران انرژی و بحران اقتصادی، منابع تجدیدپذیر برای تولید توان الکتریکی مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [۱۱] و [۱۲]. در میان انواع منابع تجدیدپذیر، انرژی باد به عنوان یکی از محبوب‌ترین آنها در سراسر جهان شناخته شده و البته باید توجه داشت که با افزایش استفاده از انرژی باد، مسایل تکنیکی زیادی مانند نوسانات ولتاژ، افزایش مشکلات کیفیت توان و پایداری ولتاژ، پدیدار می‌گردد [۱۳]. یکی از پیامدهای بحرانی این موقعیت چالش برانگیز، مدیریت توان راکتیو می‌باشد که موجب انجام اقدامات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مورد نیاز برای فراهم‌کردن پروفیل ولتاژ و پایداری مناسب ولتاژ در شبکه‌های قدرت خواهد بود [۱۴]. مزارع بادی معمولاً به عنوان باس‌های PQ یا PV برای مطالعات پخش بار یا توان راکتیو در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. برای مثال در [۱۵] پایداری ولتاژ در شبکه‌های قدرت با وجود توربین بادی آنالیز و مزارع بادی به صورت باس‌های PQ مدل شده‌اند. در [۱۶] قابلیت توان راکتیو ماشین القایی توربین بادی سرعت متغیر محدود مجهز به DF¹، برای حداقل کردن تلفات خطوط قدرت در یک توزیع توان راکتیو روزانه را آنالیز می‌کند. در مراجع فوق، تزریق توان راکتیو مورد نیاز تنها توسط ماشین الکتریکی

چکیده: مدیریت توان راکتیو در سیستم‌های قدرت برای انتقال ایمن توان راکتیو به ویژه زمانی که قسمتی از تولید سیستم به صورت احتمالی و توسط منابع بادی تأمین می‌گردد از اهمیت اساسی برخوردار است. در این مقاله یک الگوریتم جدید برای برنامه‌ریزی توان راکتیو در حضور مولدهای بادی و با در نظر گرفتن هم‌زمان طبیعت احتمالی این منابع و همچنین نایقینی بار ارائه گردیده است. در این راستا الگوریتم احتمالی پیشنهادی با در نظر گرفتن تابع هزینه هر یک از منابع توان راکتیو از جمله مولدهای بادی، تابع هزینه کلی سیستم را حداقل می‌نماید. در کنار مسایل اقتصادی، حاشیه پایداری ولتاژ، داشتن رزرو توان راکتیو کافی در هر ناحیه کنترل ولتاژ و احتمال تراکم خطوط نیز به عنوان جنبه‌های تکنیکی برنامه‌ریزی توان راکتیو به خوبی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. از دیگر مزیت‌های این روش نسبت به روش‌های قبلی، لحاظ نمودن قابلیت تولید توان راکتیو در مولدهای بادی از نوع سرعت متغیر محدود با ژنراتور القایی تغذیه مضاعف (DFIG) و در نظر گرفتن محدودیت‌های مبدل سمت روتور و شبکه در تولید توان راکتیو می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده از یک تکنیک برنامه‌ریزی چندهدفه با استفاده از ضرایب وزنی مناسب برای حداقل نمودن مجموع هزینه تأمین توان راکتیو و تلفات شبکه، به طور هم‌زمان و احتمال تراکم خطوط، همراه با حداکثر نمودن حاشیه پایداری ولتاژ و رزرو توان راکتیو در هر ناحیه در یک ساختار احتمالی برای سرعت باد و پیش‌بینی بار استفاده می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی روی شبکه تست ۳۰ باسه IEEE بر کارآمدی روش پیشنهادی برای شرایط واقعی سیستم تأکید دارد.

کلید واژه: مولدهای بادی، برنامه‌ریزی توان راکتیو، تابع هزینه، نایقینی پیش‌بینی بار، پایداری ولتاژ، رزرو توان راکتیو محلی.

۱- مقدمه

مهم‌ترین کالای مبادله شده در بازار برق، توان راکتیو بوده و وظیفه ISO فراهم‌کردن شرایطی مناسب برای انجام قراردادهای انرژی با استفاده از سیستم انتقال می‌باشد. برای این کار، سرویس‌های جانبی نظیر توان راکتیو، نقشی اساسی بازی کرده و می‌بایست با یک روش مناسب تأمین گردند. از میان شش خدمت جانبی مختلفی که در FERC Order ۸۸۸ تعریف شده [۱] تأمین توان راکتیو، یک سرویس مهم برای عملکرد امن و قابل اطمینان بازار بوده و می‌بایست در بسیاری از جنبه‌های برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم در نظر گرفته شود [۲]. در حالی که موضوع اصلی در بازارهای الکتریکی مسایل اقتصادی می‌باشد، به دلیل وظیفه مهم توان راکتیو در ایمنی سیستم، توجه به مسایل تکنیکی نیز ضروری است. تا کنون توابع هدف مختلفی از جمله حداقل نمودن هزینه توان راکتیو [۳]،

این مقاله در تاریخ ۲۶ مهر ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۱۷ تیر ۱۳۹۳ بازنگری شد. احسان محرمی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته، کرمان، (email: ehsanmoharrami@yahoo.com). سعید اسماعیلی، استادیار، بخش مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، (email: s_esmaeili@uk.ac.ir).

باد بر قدرت خروجی توربین بادی و نایقینی پیش‌بینی بار به طور هم‌زمان، ارائه گردیده و الگوریتم به دنبال حداکثر نمودن حاشیه پایداری ولتاژ می‌باشد. علاوه بر این الگوریتم در پی حداکثر کردن رزرو توان راکتیو در هر ناحیه و کمینه‌سازی احتمال تراکم خطوط در شبکه می‌باشد. همچنین توربین بادی استفاده‌شده در این مقاله از نوع سرعت متغیر محدود مجهز به DFIG بوده و توان راکتیو تولیدی مبدل سمت شبکه نیز علاوه بر ماشین الکتریکی القایی در نظر گرفته شده است. برای تسویه بازار توان راکتیو احتمالی، یک تابع چندهدفه احتمالی ارائه گردیده که هم‌زمان هر دو مسأله اقتصادی و فنی را دربرمی‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها روی شبکه تست ۳۰باسه IEEE انجام شده و برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده گردیده است.

۲- توان راکتیو توربین بادی

توربین‌ها و مزارع بادی باید توانایی تنظیم توان راکتیو و کنترل ولتاژ مطابق فرمان اپراتور سیستم در نقطه اتصال را علاوه بر ملزومات شبکه^۳ داشته باشند. برای ایجاد قابلیت تنظیم توان راکتیو در توربین‌های سرعت ثابت، از SVC یا STATCOM در پست مزرعه بادی استفاده می‌گردد. توربین‌های بادی سرعت متغیر مجهز به DFIG مانند شکل ۱ یا توربین‌های سرعت متغیر کامل، هر دو توسط مبدل‌های توان الکتریکی به شبکه متصل می‌شوند. توربین‌های بادی سرعت متغیر مجهز به DFIG دارای توانایی به دست آوردن حداکثر قدرت اکتیو از سرعت باد و کنترل توان اکتیو به طور جداگانه بوده و در نتیجه دارای قابلیت پشتیبانی از سیستم کنترل ولتاژ به عنوان منبع منع توان راکتیو می‌باشد. در این نوع توربین‌ها بخشی از توان راکتیو تولیدی، توسط ماشین الکتریکی القایی و بخشی دیگر توسط مبدل الکتریکی سمت شبکه تأمین می‌گردد که بر این اساس توان راکتیو تحویلی به شبکه از (۱) قابل محاسبه است [۲۳]

$$Q = Q_s + Q_{GSC} \quad (1)$$

۲-۱ محدودیت‌های DFIG برای توان تحویلی

حداکثر قابلیت تولید توان توربین بادی DFIG با قیود زیر تعریف می‌گردد [۲۳]:

- محدودیت ولتاژ و جریان سمت استاتور ماشین (روابط (۲) و (۳))

$$I_s < I_{s,max} \quad (2)$$

$$U_s < U_{s,max} \quad (3)$$

- محدودیت ولتاژ و جریان سمت روتور ماشین و مبدل سمت روتور (روابط (۴) و (۵))

$$I_R < I_{R,max} \quad (4)$$

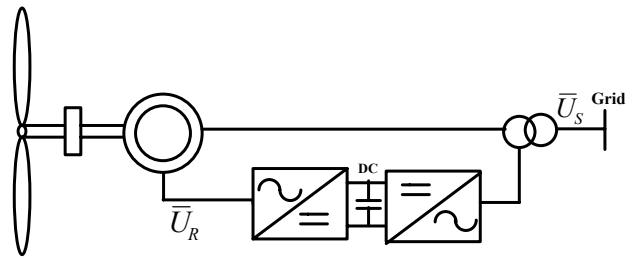
$$U_R < U_{r,max} \quad (5)$$

- محدودیت توان ظاهری مبدل سمت شبکه (رابطه (۶))

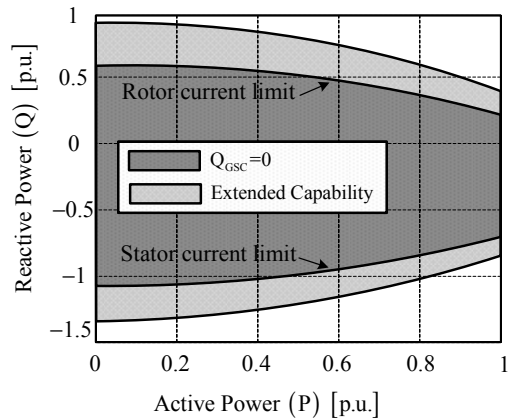
$$S_{GSC} < S_{GSC,nominal} \quad (6)$$

۲-۲ حداکثر قابلیت DFIG

با توجه به تمام محدودیت‌های ذکرشده، منحنی قابلیت توربین بادی DFIG در شکل ۲ نشان داده شده است. هنگامی که ماشین توان راکتیو



شکل ۱: توربین بادی DFIG.



شکل ۲: مکان هندسی قابلیت P-Q توربین بادی مجهز DFIG.

القایی در نظر گرفته شده و توان راکتیو تولیدی توسط مبدل سمت شبکه، لحاظ نگردیده است. بنابراین نتایج به دست آمده، قابلیت توان راکتیو توربین بادی مجهز به DFIG را به درستی منعکس نمی‌کند.

در کنار بسیاری از مزایای توربین بادی، توان تولیدی آن دارای مقدار زیادی نایقینی بوده و بنابراین طبیعت احتمالی سرعت باد، موضوع بسیاری از تحقیقات در سال‌های اخیر قرار گرفته است. همچنین تأثیر این پدیده روی بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های قدرت، مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۷]. اگر اپراتور سیستم متغیر بودن سرعت باد و در نتیجه احتمالی بودن توان تولیدی آن را در برنامه‌ریزی سیستم قدرت در نظر نگیرد، نتیجه آن امکان آسیب‌پذیری سیستم قدرت خواهد بود. برای مثال اگر اپراتور سیستم در بازار توان راکتیو این خصیصه مزارع بادی را اعمال نکند، تغییر تولید توان باد سبب ناپایداری ولتاژ سیستم و یا افزایش بی‌مورد هزینه‌ها می‌گردد. بنابراین احتمالی بودن توان تولیدی توربین بادی در بسیاری از برنامه‌ریزی‌ها، به ویژه در محیط‌های تجدید ساختار یافته باید در نظر گرفته شود [۱۸] و [۱۹].

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت پدیدار می‌گردد، پیش‌بینی بار است [۲۰] و [۲۱]. چندین روش برای پیش‌بینی بار تمامی باس‌های سیستم وجود دارد [۲۲] اما بیشتر این روش‌ها دارای نایقینی و خطا می‌باشند.

در این مقاله، الگوریتم جدید احتمالی برای برنامه‌ریزی توان راکتیو در سیستم‌های الکتریکی با در نظر گرفتن تغییرات توان تولیدی توربین بادی به دلیل نوسانات سرعت باد و همچنین نایقینی پیش‌بینی بار، ارائه شده است. این الگوریتم میزان پرداختی سیستم^۲ که برابر مجموع هزینه تهیه توان راکتیو و هزینه تلفات خطوط می‌باشد را حداقل می‌نماید. همچنین شاخصی برای حاشیه پایداری ولتاژ با در نظر گرفتن تأثیر نوسانات سرعت

1. Grid-Side Converter
2. System Payment

3. Grid Code

$$\beta_{ci} = \frac{\text{هزینه سرمایه‌گذاری}}{\$/MVA_{r-h} \times \text{متوسط میزان استفاده} \times \text{طول عمر}} \times ۸۷۶۰ \quad (۹)$$

۳-۳ هزینه توان راکتیو توربین بادی

برای محاسبه هزینه توان راکتیو تولیدی توربین بادی از مدل ارائه شده در [۲۸] استفاده شده است.

هزینه توان راکتیو توربین بادی سرعت متغیر محدود، شامل یک ترم هزینه ثابت و یک ترم برای هزینه ناشی از تلفات اکتیو در سوئیچ‌های مبدل، به دلیل تولید توان راکتیو می‌باشد.

۳-۳-۱ ترم هزینه ثابت

این ترم به دلیل اصلاح نرم‌افزاری در قسمت‌های کنترلی توربین بادی برای تولید توان راکتیو، اضافه می‌شود و به دلیل این که نیاز به تغییرات سخت‌افزاری نبوده، در نتیجه مقدار این ترم زیاد نخواهد بود. بر اساس مطالعات صورت گرفته، هزینه تغییرات نرم‌افزاری ۲۷٪ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه خواهد بود که با محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری، طول عمر اقتصادی و نرخ بهره آن، مقدار ترم هزینه ثابت بر حسب \$/MWh تعیین می‌گردد [۲۸].

۳-۳-۲ ترم هزینه مربوط به تلفات

این ترم شامل افزایش تلفات توان اکتیو در سوئیچ‌های مبدل، به دلیل تولید توان راکتیو بیشتر از مقدار اجباری که مربوط به کارکرد آن بوده، می‌باشد و این مقدار اجباری با ملزومات شبکه، تعیین می‌گردد.

برای مدل‌سازی تلفات، ترانزیستور و دیودهای مربوط به هر سوئیچ می‌تواند به صورت افت ولتاژهای ثابت (V_{TO} و V_{CEO}) با مقاومت‌های سری (r_T و r_{CE}) مدل شوند. برای محاسبه این تلفات از روابط زیر استفاده می‌شود

$$\Delta P_{loss} = a_l (I_{rms,l} - I_{rms,s}) + b_l (I_{rms,l}^2 - I_{rms,s}^2) \quad (۱۰)$$

$$I_{rms,s} = \frac{\sqrt{P_s^2 + Q_{man}^2}}{V_g} \quad (۱۱)$$

$$I_{rms,l} = \frac{\sqrt{P_l^2 + Q_l^2}}{V_g} \quad (۱۲)$$

$$a_l = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} (V_{IGBT} + \frac{E_{ON} + E_{OFF}}{I_{C,nom}} f_{sw} + \frac{E_{rr}}{I_{C,nom}} f_{sw}) \quad (۱۳)$$

$$b_l = 3r_{IGBT} \quad (۱۴)$$

در (۱۱) و (۱۲)، P_l و P_s به ترتیب توان اکتیو تولیدی قبل و بعد از تولید توان راکتیو بیش از مقدار اجباری می‌باشد ($P_l \geq P_s$). Q_{man} توان راکتیو اجباری^۲ که توسط استاندارد تعیین شده و Q_l افزایش تولید توان راکتیو خواهد بود ($Q_l \geq Q_{man}$). $E_{ON} + E_{OFF}$ انرژی مصرفی روشن و خاموش شدن IGBT، E_{rr} تلفات انرژی بازبایی معکوس دیود، f_{sw} فرکانس سوئیچینگ و $I_{C,nom}$ جریان نامی مبدل می‌باشد. پارامترهای مربوط به (۱۳) و (۱۴) از اطلاعات سازنده مبدل مربوط، اتخاذ می‌گردد و همچنین فرض می‌گردد که $r_{IGBT} = r_{CE} \approx r_T$ و $V_{IGBT} = V_{CEO} \approx V_{TO}$. رابطه (۱۰) برای ظرفیت ۱ MW توربین بادی نصب شده می‌باشد.

به شبکه انتقال می‌دهد محدودیت جریان روتور مهم بوده، در حالی که محدودیت جریان استاتور عامل مهم در میزان مصرف توان راکتیو توسط ماشین خواهد بود.

ناحیه درونی در شکل ۲ مربوط به نمودار P-Q بدون در نظر گرفتن توان راکتیو GSC و ناحیه بیرونی با در نظر گرفتن قابلیت توان راکتیو GSC رسم شده است. این قابلیت توسعه یافته می‌تواند برای اپراتورهای سیستم بسیار مفید باشد.

۳- هزینه توان راکتیو منابع در بازار توان راکتیو

در بازارهای مربوط به شبکه‌های تجدید ساختار یافته می‌بایست هزینه‌ای به شرکت‌کننده‌ها برای تأمین توان راکتیو تعلق گیرد. در برخی از مراجع تنها برای ژنراتورهای سنکرون هزینه‌ای در نظر گرفته می‌شود [۲۴] در حالی که بعضی از مراجع دیگر، پرداختن هزینه برای دیگر منابع توان راکتیو مانند ادوات FACTS، کندانسور سنکرون و ... را لازم می‌دانند [۲۵]. در این مقاله توان راکتیو تولیدی ژنراتور سنکرون، کندانسور سنکرون و توربین بادی به عنوان سرویس جانبی در نظر گرفته شده و اپراتور سیستم باید هزینه‌ای را به آنها تعلق دهد. در ادامه مدل محاسبه هزینه مربوط به تولید توان راکتیو برای هر کدام از منابع آورده شده است.

۳-۱ هزینه توان راکتیو ژنراتور

مدل‌های مختلفی برای پرداخت هزینه توان راکتیو ژنراتور پیشنهاد گردیده [۲۶] که در این مقاله از یک مدل کامل تشریح شده در [۲۷] استفاده شده است. با توجه به این مرجع با فرض این که همیشه از تمام ظرفیت ژنراتور استفاده شود، از طریق چندجمله‌ای Newton-Gregory می‌توان $cost(Q_i)$ را به صورت تابعی از Q و یک رابطه درجه ۲ به شکل زیر در نظر گرفت

$$cost(Q_i) = a_q Q_i^2 + b_q Q_i + c_q \quad (۷)$$

در این رابطه Q_i توان راکتیو خروجی ژنراتور i ام و a_q ، b_q و c_q ضرایب ثابت می‌باشند. مطابق توضیحات [۲۷] با داشتن منحنی هزینه توان اکتیو، منحنی قابلیت و حداکثر مقدار توان اکتیو و راکتیو ژنراتور، این ضرایب ثابت می‌توانند به دقت با استفاده از یک تکنیک درون‌یابی مناسب، تخمین زده شوند. در این معادله، نه تنها هزینه بهره‌برداری تحمیل شده به سیستم به دلیل تأمین توان راکتیو در نظر گرفته شده، بلکه هزینه فرصت^۱ نیز لحاظ می‌گردد و به علاوه هزینه سرمایه‌گذاری نیز در این معادله به درستی وارد شده است.

۳-۲ هزینه توان راکتیو کندانسور سنکرون

کندانسور سنکرون ماشین سنکرونی است که تنها توان راکتیو تولید می‌کند و هزینه توان راکتیو کندانسور سنکرون، شامل هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری می‌شود. هزینه بهره‌برداری شامل هزینه مصرف شده برای غلبه بر اصطکاک مکانیکی، تلفات الکتریکی و هزینه تعمیر و نگهداری است. در نتیجه، هزینه توان راکتیو کندانسور سنکرون با (۸) بیان می‌گردد

$$cost(Q) = (\beta_{ci} + \sigma_{ci}) Q_{ci} \quad (۸)$$

که Q_{ci} توان راکتیو خروجی از کندانسور، σ هزینه بهره‌برداری کندانسور و β_{ci} هزینه سرمایه‌گذاری بوده که با (۹) بیان می‌شود

$$L_{mn} = \frac{4XQ_r}{[V_m \sin(\theta - \delta_m + \delta_n)]^2} \quad (۱۶)$$

در این رابطه، V_m اندازه ولتاژ باس m ، δ_m و δ_n به ترتیب زوایای فاز ولتاژ باس m و n ، θ زاویه امپدانس خط، X راکتانس خط و Q_r توان راکتیو تحویلی به انتهای خط می‌باشد. این شاخص باید برای تمام خطوط شبکه محاسبه شده و هرچه اندازه این شاخص از یک فاصله داشته باشد حاشیه پایداری ولتاژ مناسب‌تر خواهد بود.

۲-۴ شاخص پایداری ولتاژ برای حالت احتمالی پیش‌بینی بار

۲-۴-۱ تولید سناریوها و کاهش آنها

در بیشتر کارهایی که نایقینی را در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت لحاظ می‌کنند، با در نظر گرفتن یک تابع چگالی احتمال^۲ برای متغیر مورد نظر، از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو^۳ برای تولید سناریوهای مختلف استفاده می‌شود و سپس برنامه‌ریزی سیستم بر اساس سناریوهای تولیدشده انجام می‌گیرد.

به منظور سرعت‌بخشیدن به فرایند برنامه‌ریزی بازار، در این مقاله، تابع چگالی احتمال مربوط به هر بار به تعدادی بارهای پیش‌بینی شده محتمل تقسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، احتمال i امین دسته، برابر احتمال تجمعی بین i امین و $(i-1)$ امین دسته می‌باشد. شایان ذکر است در این مقاله از تابع توزیع نرمال برای نایقینی بار استفاده شده است. در مرحله بعد از بین تمام سناریوهای ممکن، تعداد مناسبی به صورت تصادفی انتخاب شده و در آنها، سناریوهای دارای احتمال ناچیز حذف می‌گردند. این روش تعداد سناریوها را کاهش داده و بنابراین به طور مؤثر، سرعت فرایند تسویه بازار، افزایش می‌یابد. سپس از سناریوهای باقی‌مانده برای برنامه‌ریزی بازار توان راکتیو استفاده می‌گردد.

۲-۴-۲ شاخص پایداری ولتاژ در حالت احتمالی

از آنجایی که توان عبوری از خطوط انتقال و اندازه و زاویه ولتاژ باس‌ها به بار اکتیو و راکتیو مصرفی در آنها بستگی دارد، حاشیه پایداری ولتاژ ممکن است با تغییر توان مصرفی در باس‌ها تغییر کند. بنابراین در این مقاله با توجه به مفاهیم شاخص پایداری ولتاژ و نایقینی پیش‌بینی بار، شاخص پایداری ولتاژ برای حالت نایقینی در پیش‌بینی بار به صورت (۱۷) تعریف می‌شود

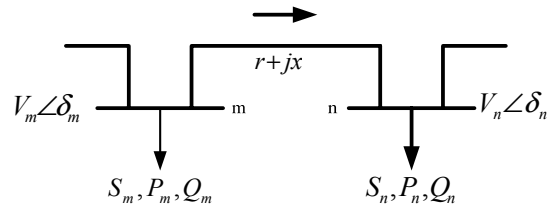
$$PL_{mn} = \sum_{i=1}^{N_B} P(B_i).L_{mn,i} \quad (۱۷)$$

جایی که N_B تعداد سناریوهای بار پیش‌بینی شده محتمل، $L_{mn,i}$ شاخص پایداری خط بین باس m و باس n در i امین B (i امین سناریو) و $P(B_i)$ احتمال i امین B می‌باشد. برای محاسبه این شاخص، پخش بار برای هر سناریو (B_i) به دست آمده و سپس با استفاده از نتایج حاصل، شاخص L_{mn} برای هر خط از (۱۷) محاسبه می‌گردد.

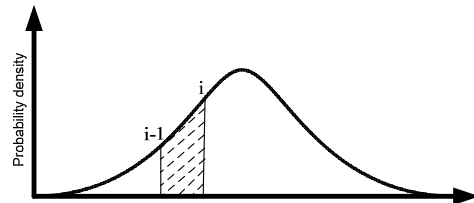
۳-۴ شاخص پایداری ولتاژ برای حالت احتمالی توان

تولیدی توربین بادی

به دلیل وابستگی تولید توان اکتیو و راکتیو توربین بادی به سرعت باد، در یک شبکه قدرت شامل مزرعه بادی، حاشیه پایداری ولتاژ سیستم



شکل ۳: دیاگرام تک‌خطی از یک خط انتقال.



شکل ۴: تابع چگالی احتمال نرمال دسته‌بندی شده.

۳-۴ هزینه تلفات مربوط به انتقال توان الکتریکی در شبکه

اگر اپراتور سیستم تنها حداقل نمودن هزینه تأمین توان راکتیو را در نظر بگیرد، در نتیجه با منابعی دارای حداقل هزینه پیشنهادی قرارداد می‌بندد که این اقدام ممکن است سبب افزایش تلفات انرژی در خطوط و در نتیجه افزایش هزینه‌های سیستم شود. در نتیجه می‌بایست در بازار توان راکتیو، هزینه مربوط به تولید توان راکتیو و تلفات انرژی در خطوط انتقال به طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند.

هزینه مربوط به تلفات انتقال به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$cost(P_{loss}) = \lambda P_{loss} \quad (۱۵)$$

که λ قیمت توان اکتیو در شبکه و P_{loss} تلفات انتقال می‌باشد.

۴- ارزیابی پایداری ولتاژ

پایداری ولتاژ به عنوان یک مسأله مهم در سیستم‌های قدرت در نظر گرفته شده و می‌بایست در مسایل برنامه‌ریزی و طراحی مربوط به آنها لحاظ شود [۲۹]. برای بهره‌برداری ایمن از شبکه قدرت، باید حاشیه پایداری ولتاژ در هر حالت بهره‌برداری از شبکه در حد مورد نیاز باشد.

۴-۱ شاخص پایداری ولتاژ برای حالت قطعی

برای تخمین حاشیه پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت روش‌های زیادی پیشنهاد شده و استفاده از شاخص‌های مختلف پایداری ولتاژ، یک روش مفید و قدیمی برای تشخیص حاشیه پایداری ولتاژ می‌باشد. شاخص‌های مختلفی برای تعیین فاصله بین نقطه بهره‌برداری و نقطه ناپایداری ولتاژ^۱ وجود دارد [۳۰] و [۳۱].

در [۳۰] شاخص L_{mn} بر مبنای معادلات پخش بار، ارائه شده که یک مقدار کمی برای تخمین فاصله بین حالت بهره‌برداری و حد پایداری شبکه می‌باشد. این شاخص از صفر (حالت بی‌باری) تا یک (حالت ناپایداری ولتاژ) تغییر می‌کند. با توجه به سادگی، دقت و سرعت محاسبات مربوط به آن، در این مقاله از این شاخص برای تشخیص حاشیه پایداری ولتاژ استفاده شده است.

شکل ۳ دیاگرام تک‌خطی از یک خط انتقال را نشان می‌دهد. شاخص L_{mn} خط بین باس m و باس n به صورت (۱۶) بیان می‌گردد

2. Probability Distribution Function

3. Monte Carlo Simulation

1. Voltage Collapse

$$Q_{g,max} = \min(Q_{g,max-armor}, Q_{g,max-field}) \quad (22)$$

بنابراین حداکثر رزرو توان راکتیو از g امین ژنراتور برابر است با

$$Q_{g,max-reserve} = Q_{g,max} - Q_g \quad (23)$$

۵-۱ نواحی کنترل ولتاژ

یک سیستم را می‌توان به چندین ناحیه کنترل ولتاژ شامل گروهی از باس‌های مرتبط به هم تقسیم کرد. مجموعه‌ای از باس‌ها را که به میزان کافی به لحاظ الکتریکی از نواحی دیگر جدا هستند را می‌توان به عنوان یک ناحیه کنترل ولتاژ طبقه‌بندی کرد. برای کنترل ولتاژ باس‌ها در هر ناحیه، باید توان راکتیو تولیدی در همان ناحیه به میزان کافی باشد و این توان تولیدی، تأثیر چندانی بر ولتاژ سایر باس‌ها نخواهد داشت.

در [۳۲] معیاری برای تفکیک نواحی کنترل ولتاژ بیان شده است. بر طبق آن پروفیل ولتاژ یک ناحیه، اساساً با منابع توان راکتیو موجود در آن ناحیه کنترل شده و این منابع بر نواحی دیگر تأثیر اندکی دارند. در [۳۳] یک روش دومرحله‌ای برای تعیین نواحی کنترل ولتاژ در سیستم قدرت فرانسه ارائه گردیده است. اولین مرحله عبارت است از محاسبه فاصله الکتریکی بین باس‌ها در سیستم و دومین مرحله گروه‌بندی باس‌ها بر اساس روش‌های تجزیه و تحلیل توپولوژیکی می‌باشد. در [۳۴] مفهوم بالا برای آنالیز مسایل پایداری ولتاژ محلی و تعیین امنیت ولتاژ، استفاده شده و در [۳۵] از همین مفهوم برای بررسی سرویس‌های کنترل ولتاژ محلی استفاده گردیده است.

در این مقاله برای تعیین نواحی کنترل ولتاژ برای یک سیستم از روش ارائه‌شده در [۳۲] استفاده شده که به صورت دو مرحله زیر خواهد بود:

۱) محاسبه فاصله الکتریکی بین همه باس‌ها در سیستم.

۲) رده‌بندی نواحی و تعیین مرزهای هر یک از آنها با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی سلسله مراتبی.

۶-۱ مدل‌سازی بازار چندهدفه احتمالی توان راکتیو

در بازارهای الکتریکی، هر دوی مسایل اقتصادی و فنی برای تسویه بازار دارای اهمیت هستند. معطوف‌شدن به یک مسأله و توجه‌نداشتن به دیگری، سبب عدم برنامه‌ریزی بهینه و امن توان راکتیو خواهد شد. در نتیجه در این بخش با در نظر گرفتن هر دو مسأله فنی و اقتصادی، الگوریتم چندهدفه احتمالی برای برنامه‌ریزی توان راکتیو که نایقینی پیش‌بینی بار و نایقینی توان تولیدی توربین بادی را در محاسبات وارد می‌کند، پیشنهاد شده است. هر یک از قسمت‌های الگوریتم یادشده، در ادامه تشریح شده است.

۶-۱-۱ حداقل نمودن هزینه‌ها

هزینه‌ها برابر با مجموع هزینه پرداختی برای تأمین توان راکتیو و تلفات خطوط انتقال می‌باشد. در این قسمت، ابتدا مدل‌های هزینه برای منابع تولید توان راکتیو با روش‌های توضیح داده شده در بخش ۳ محاسبه شده و سپس با در نظر گرفتن نایقینی پیش‌بینی بار و نایقینی توان تولیدی توربین بادی، برای حداقل کردن هزینه‌ها باید (۲۴) مینیمم گردد

$$PL_{mn} = \sum_{j=1}^{N_B} \sum_{i=1}^{N_A} [P(A_i).P(B_j) + \rho \sqrt{P(A_i)(1-P(A_i))P(B_j)(1-P(B_j))}] . L_{mn,i} \quad (19)$$

$$F_1 = \sum_{j=1}^{N_B} \sum_{i=1}^{N_A} [P(A_i).P(B_j) + \rho \sqrt{P(A_i)(1-P(A_i))P(B_j)(1-P(B_j))}] \times (\sum_k cost(Q_k) + \lambda . P_{loss,i,j}) , \forall k \quad (24)$$

با نوسانات سرعت باد تغییر می‌کند. بنابراین در این مقاله با توجه به احتمالی بودن توان خروجی توربین بادی، شاخص پایداری ولتاژ به شکل جدیدی تعریف می‌شود (PL_{mn}). برای محاسبه PL_{mn} ، تابع چگالی احتمال سرعت باد به قسمت‌های مساوی برای بعضی سرعت‌های باد محتمل تقسیم شده (A_i ها) و توان خروجی توربین بادی و مطالعات پخش بار برای هر دسته انجام شده است. سپس با استفاده از نتایج حاصل، شاخص L_{mn} برای هر خط از رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$PL_{mn} = \sum_{i=1}^{N_A} P(A_i) . L_{mn,i} \quad (18)$$

در این رابطه N_A تعداد سطوحی که تابع چگالی احتمال سرعت باد به آنها تقسیم شده، $L_{mn,i}$ شاخص پایداری خط بین باس m و باس n در i امین A و $P(A_i)$ احتمال i امین دسته (A) می‌باشد.

۴-۴ شاخص پایداری ولتاژ برای حالت احتمالی به صورت هم‌زمان

در این حالت هم نایقینی مربوط به توان تولیدی توربین بادی و هم مربوط به پیش‌بینی بار لحاظ می‌گردد. در این حالت شاخص L_{mn} برای هر خط از (۱۹) محاسبه می‌شود که در این رابطه ρ ضریب همبستگی میان توان تولیدی توربین بادی و بار مصرفی شبکه می‌باشد که در مناطق مختلف، متفاوت است. به طور مثال در منطقه‌ای ممکن است در طول روز که توان مصرفی بالاست، سرعت باد نیز نسبت به شب بیشتر باشد و اگر ارتباطی بین این دو وجود نداشته باشد، ضریب همبستگی صفر خواهد بود.

۵-۱ رزرو توان راکتیو

رزرو توان راکتیو مسأله‌ای مهم بوده و تأثیر بسزایی روی بهره‌برداری ایمن از سیستم قدرت دارد. بعضی از اغتشاشات ممکن است باعث افت ولتاژ شدید در شبکه گردند. برای پیشگیری از افت ولتاژ بعد از هر اغتشاش یا به دلیل نایقینی پیش‌بینی بار، می‌بایست رزرو توان راکتیو کافی برای سیستم در دسترس باشد. مقدار توان راکتیو تولیدشده توسط یک ماشین سنکرون به محدودیت جریان میدان و آرمیچر، موقعیت بهره‌برداری سیستم و محل ماشین در شبکه بستگی دارد [۸]. بر مبنای متحنی قابلیت آرمیچر، حداکثر خروجی توان راکتیو می‌تواند به صورت معادله زیر بیان شود

$$Q_{g,max-armor} = \sqrt{V_g^r . I_{g,max}^r - P_g^r} \quad (20)$$

در این رابطه V_g ولتاژ ترمینال، P_g توان اکتیو خروجی و $I_{g,max}$ حداکثر جریان آرمیچر ژنراتور می‌باشد. برای تعیین حداکثر توان خروجی به دلیل محدودیت جریان میدان از (۲۱) استفاده می‌گردد

$$Q_{g,max-field} = -\frac{V_g^r}{X_d^r} + \sqrt{\frac{V_g^r . E_{max}^r}{X_d^r} - P_g^r} \quad (21)$$

جایی که X_d راکتانس سنکرون محور d و E_{max} ولتاژ ماکسیمم داخلی مطابق با حداکثر جریان میدان ژنراتور می‌باشد. حداکثر خروجی توان راکتیو ژنراتور برابر کمترین مقدار محاسبه‌شده از (۲۲) و (۲۳) است

توان خروجی توربین بادی یا پیش‌بینی بار در نظر گرفته شود، عبارت داخل کروشه، تنها به یک تابع چگالی احتمال تبدیل شده و قسمت مربوط به همبستگی نیز حذف می‌گردد.

۵-۶ برنامه‌ریزی چندهدفه احتمالی پیشنهادی

در نهایت بر مبنای نتایج به دست آمده از چهار مرحله قبل، تابع هدف نهایی که چهار مسأله حداقل کردن هزینه‌ها، حداکثر کردن پایداری و ولتاژ، حداکثر کردن رزرو توان راکتیو و کمینه‌سازی احتمال تراکم خطوط، هم‌زمان در آن لحاظ شده به صورت (۲۹) بیان می‌شود. در این مقاله از یک برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه استفاده شده که می‌تواند بهترین مصالحه بین دو یا چند هدف مختلف را پیدا کند [۳۶] و بر اساس رابطه زیر می‌باشد

$$F = \sqrt{\alpha \left(\frac{F_1}{F_1^*}\right)^r + \beta \left(\frac{F_2}{F_2^*}\right)^r + \sum_{i=1}^b \gamma_i \left(\frac{F_{vi}^*}{F_{vi}}\right)^r + \eta \left(\frac{F_r}{F_r^*}\right)^r} \quad (29)$$

F_1^* ، F_2^* و F_{vi}^* مینیمم مقادیر قابل دستیابی توابع هدف در بخش‌های ۱-۶، ۲-۶ و ۳-۶ بوده و F_{vi}^* حداکثر مقدار قابل حصول تابع هدف در بخش ۳-۶ برای هر ناحیه می‌باشد. پارامترهای α ، β ، γ_i و η ضرایب وزنی بوده که می‌توانند اثر ترم‌های مختلف را در F تنظیم کنند که این ضرایب به اپراتور سیستم کمک می‌کند تا تابع هدف را در موقعیت‌های مختلف سیستم و بازار کنترل کند. برای مثال اگر حداقل نمودن مجموع هزینه‌ها نسبت به دیگر اهداف از اهمیت بیشتری برخوردار است، اپراتور سیستم می‌تواند مقادیر کوچکی را برای β ، γ_i و η در مقایسه با α قرار دهد.

قیود بهینه‌سازی به صورت (۳۰) تا (۳۶) می‌باشند. C حالات به وجود آمده از در نظر گرفتن هم‌زمان نایقینی در توان توربین بادی و پیش‌بینی بار می‌باشد. بدین معنی که هر دسته از سرعت باد محتمل (A) با تمامی سناریوهای محتمل به دست آمده از بخش ۴-۲-۱، در نظر گرفته شده و پخش بار برای هر حالت، انجام می‌شود. در واقع تعداد حالات C برابر حاصل ضرب تعداد A در تعداد B خواهد بود یعنی $N_C = N_A \cdot N_B$

$$P_{Gi,C} + P_{Ci,C} - P_{Di} = - \sum_{j=1}^n V_{i,C} V_{j,C} Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_{j,C} - \delta_{i,C}) \quad (30)$$

$$\forall i, \forall C = 1, \dots, N_C$$

$$Q_{Gi,C} + Q_{Ci,C} - Q_{Di} = - \sum_{j=1}^n V_{i,C} V_{j,C} Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_{j,C} - \delta_{i,C}) \quad (31)$$

$$\forall i, \forall C = 1, \dots, N_C$$

$$Q_{G \min,i} \leq Q_{Gi,C} \leq Q_{G \max,i}, \quad \forall i \in SM, \forall C = 1, \dots, N_C \quad (32)$$

$$Q_{C \min,i} \leq Q_{Ci,C} \leq Q_{C \max,i}, \quad \forall i \in SC, \forall C = 1, \dots, N_C \quad (33)$$

$$V_i^{\min} \leq V_{i,C} \leq V_i^{\max}, \quad \forall i, \forall C = 1, \dots, N_C \quad (34)$$

$$|S_{ij,C}(V, \delta)| \leq S_{ij}^{\max}, \quad \forall ij, \forall C = 1, \dots, N_C \quad (35)$$

$$F_{rL} = \sum_{j=1}^{N_B} \sum_{i=1}^{N_A} \left[P(A_i) \cdot P(B_j) + \rho \sqrt{P(A_i)(1-P(A_i))P(B_j)(1-P(B_j))} \right] \sum_{g \in SM} Q_{reserve,g,i,j}, \quad \forall L = 1, \dots, b \quad (26)$$

$$F = \sum_{j=1}^{N_B} \sum_{i=1}^{N_A} \left[P(A_i) \cdot P(B_j) + \rho \sqrt{P(A_i)(1-P(A_i))P(B_j)(1-P(B_j))} \right] \cdot \frac{S_{m,i,j}}{S_{m \max}} \quad (28)$$

در (۲۴) k مجموعه ژنراتورهای سنکرون، کندانسورها و توربین‌های بادی می‌باشد. اگر نایقینی تنها برای توان خروجی توربین بادی یا پیش‌بینی بار در نظر گرفته شود، عبارت داخل کروشه، تنها به یک تابع چگالی احتمال تبدیل شده و قسمت مربوط به همبستگی نیز حذف می‌گردد.

۲-۶ حداکثر نمودن حاشیه پایداری و ولتاژ

ناپایداری و ولتاژ یکی از بدترین مشکلات در بهره‌برداری سیستم قدرت می‌باشد و بنابراین اپراتور سعی می‌کند تا از سیستم با حاشیه پایداری و ولتاژ مناسب بهره‌برداری کند. در این قسمت، الگوریتم به دنبال یافتن بهترین حاشیه پایداری و ولتاژ ممکن با در نظر گرفتن نایقینی پیش‌بینی بار و نایقینی توان تولیدی توربین بادی می‌باشد. هم‌راستا با حداکثر کردن حد پایداری و ولتاژ، بایستی تابع هدف که با (۲۵) نشان داده شده مینیمم گردد

$$F_r = WPL_{mn} \quad (25)$$

که WPL_{mn} بدترین شاخص PL_{mn} در شبکه یعنی بزرگ‌ترین آن می‌باشد.

۳-۶ حداکثر نمودن رزرو توان راکتیو در هر ناحیه

طبق توضیحات بخش ۵، رزرو توان راکتیو می‌تواند به کاهش انحراف پروفیل ولتاژ به ویژه بعد از اغتشاش‌های سخت یا به علت نایقینی بار کمک کند. در این قسمت، ابتدا تمامی نواحی سیستم با استفاده از روش توصیف‌شده در بخش ۵-۱ تعیین شده و سپس برای هر سناریوی بار شبکه، حاصل از روش توضیح داده شده در بخش ۴-۲-۱ (B) و هر دسته از سرعت باد محتمل (A)، رزرو توان راکتیو بهینه برای هر ناحیه به طور جداگانه محاسبه می‌شود. تابع هدف مورد نظر در این بخش به صورت (۲۶) خواهد بود و باید ماکسیمم گردد که $Q_{reserve,j,i}$ رزرو توان راکتیو g امین ژنراتور در i امین A و z امین B ، SM مجموعه ماشین‌های سنکرون، کندانسور و توربین بادی قرار گرفته در L امین ناحیه و b تعداد نواحی شبکه است. اگر نایقینی تنها برای توان خروجی توربین بادی یا پیش‌بینی بار در نظر گرفته شود، عبارت داخل کروشه، تنها به یک تابع چگالی احتمال تبدیل شده و قسمت مربوط به همبستگی نیز حذف می‌گردد. این مدل بهینه‌سازی، می‌بایست برای تمام نواحی اجرا گردد.

۴-۶ حداقل نمودن احتمال تراکم خطوط

در بازارهای الکتریکی به علت مسایلی مانند نایقینی بار یا اغتشاش‌ها که احتمال رخداد آنها در طول بهره‌برداری سیستم وجود دارد، اپراتور سیستم باید تراکم خطوط را در برنامه‌ریزی‌ها لحاظ کند. در این قسمت از الگوریتم، سعی شده تا بارگذاری خطوط انتقال برای کاهش احتمال تراکم، حداقل گردد. تابع هدف در این قسمت به صورت (۲۷) مدل شده است

$$F_r = WF \quad (27)$$

WF بدترین F یعنی بزرگ‌ترین آن بوده که توسط (۲۸) بیان می‌گردد و F موقعیت بارگذاری هر خط انتقال را با در نظر گرفتن نایقینی پیش‌بینی بار و نایقینی توان تولیدی توربین بادی نشان می‌دهد. در (۲۸) $S_{m,i,j}$ مقدار توان ظاهری عبوری از خط m در i امین A و j امین B و $S_{m \max}$ حداکثر مقدار توان ظاهری که قابلیت عبور از خط m را دارد می‌باشد و هدف، مینیمم کردن F_r خواهد بود. اگر نایقینی تنها برای

جدول ۱: پارامترهای ژنراتورها و کندانسور سنکرون به عنوان منابع توان راکتیو ($S_{base} = 100 \text{ MVA}$).

| منابع توان راکتیو | شماره باس | P_{min} (pu) | P_{max} (pu) | Q_{min} (pu) | Q_{max} (pu) |
|-------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| G_1 | ۲ | ۰٫۱۵ | ۰٫۸ | -۰٫۲ | ۰٫۶ |
| G_r | ۲۲ | ۰٫۱ | ۰٫۵ | -۰٫۱۵ | ۰٫۴۹ |
| G_r | ۲۷ | ۰٫۱ | ۰٫۵ | -۰٫۱۵ | ۰٫۴۸ |
| G_r | ۲۳ | ۰٫۰۵ | ۰٫۳ | -۰٫۱ | ۰٫۲۴ |
| G_s | ۱۳ | ۰٫۱ | ۰٫۵ | -۰٫۱۵ | ۰٫۴۴ |
| Condenser | ۱۷ | ۰ | ۰ | -۰٫۵ | ۰٫۴ |

جدول ۲: ضرایب تابع هزینه ژنراتور با رابطه $\text{cost}(P) = a_p P^2 + b_p P + c_p$.

| ژنراتور | a_p | b_p | c_p |
|---------|-------|-------|-------|
| G_1 | ۰٫۰۱۷ | ۱۴٫۷۵ | ۰ |
| G_r | ۰٫۰۶۲ | ۱۴ | ۰ |
| G_r | ۰٫۰۰۸ | ۱۴٫۷۵ | ۰ |
| G_r | ۰٫۰۲۵ | ۱۵٫۲۵ | ۰ |
| G_s | ۰٫۰۲۵ | ۱۶ | ۰ |

جدول ۴: مجموعه سرعت‌های باد محتمل (A_i ها).

| سرعت باد (m/s) | احتمال |
|----------------|--------|
| ۷٫۵ | ۰٫۰۰۶ |
| ۸٫۲۵ | ۰٫۰۱۲۴ |
| ۹ | ۰٫۰۲۹۱ |
| ۹٫۷۵ | ۰٫۰۵۷۸ |
| ۱۰٫۵ | ۰٫۰۹۶۵ |
| ۱۱٫۲۵ | ۰٫۱۳۵۹ |
| ۱۲ | ۰٫۳۲۲۶ |
| ۱۲٫۷۵ | ۰٫۱۳۵۹ |
| ۱۳٫۵ | ۰٫۰۰۶ |
| ۱۴٫۲۵ | ۰٫۰۹۶۵ |
| ۱۵ | ۰٫۰۵۷۸ |
| ۱۵٫۷۵ | ۰٫۰۲۹۱ |
| ۱۶٫۵ | ۰٫۰۰۶ |

جدول ۳: کاتالوگ مربوط به مبدل SKIIP ۱۸۰۳GB۱۷۲-۳DW [۳۸].

| | | |
|----------------------------------|--------------------|--------|
| Nomina current | $I_{C,nom}$ | ۱۸۰۰ A |
| Operating dc-link voltage | V_{cc} | ۱۲۰۰ V |
| | V_{CEO} | ۱ V |
| Lead resistance IGBT | r_{CE} | ۱ mΩ |
| Turn-on and turn-off energy IGBT | $E_{on} + E_{off}$ | ۸۶۳ mJ |
| | V_{TO} | ۱٫۱ V |
| Lead resistance Diode | r_r | ۱ mΩ |
| Reverse recovery energy Diode | E_{rr} | ۱۲۸ mJ |
| Switching frequency | f_{sw} | ۵ KHz |

به جز ژنراتور اسلک شامل ۵ ژنراتور در باس‌های ۲، ۲۲، ۲۷، ۲۳ و ۱۳ بوده، روی ۲۰ باس از شبکه بارگذاری صورت گرفته و همچنین دارای ۴۱ خط انتقال می‌باشد. پارامترهای مربوط به ژنراتورها و کندانسور سنکرون در جدول ۱ و ضرایب تابع هزینه ژنراتورها در جدول ۲ آورده شده است. یک کندانسور سنکرون نیز در باس ۲۸ قرار داده شده و هزینه توان راکتیو تولیدی کندانسور سنکرون، $1 \text{ \$/MWh}$ می‌باشد. همچنین یک مزرعه بادی با ۲۰ توربین بادی مبتنی بر DFIG شبیه به هم در باس ۴ قرار داده شده و منحنی توان-سرعت مربوط به هر توربین در شکل ۵ ترسیم شده است. حداکثر توان تولیدی توربین ۲ MW می‌باشد. برای محاسبه هزینه تولید توان راکتیو توربین بادی، پارامترهای مربوط به (۱۳) و (۱۴) از جدول ۳ که از اطلاعات سازنده مبدل مربوط اتخاذ شده، محاسبه می‌شوند. بر اساس توضیحات بخش ۳-۳ در این مقاله با فرض سرمایه‌گذاری اولیه $2/5 \text{ M\$/MW}$ برای مزرعه بادی، ترم هزینه ثابت برابر $6750 \text{ \$/MW}$ می‌باشد. حال با فرض طول عمر اقتصادی ۲۰ سال و نرخ بهره ۵٪، مقدار ترم هزینه ثابت برابر با $0.06 \text{ \$/MWh}$ (a) خواهد بود که با توجه به ظرفیت نصب‌شده مزرعه بادی، مقدار ترم هزینه ثابت برای تولید توان راکتیو مزرعه برابر $40a \text{ \$/h}$ یعنی $2/4 \text{ \$/h}$ و مقدار ترم هزینه مربوط به تلفات برابر $40\lambda \Delta P_{loss} \text{ \$/h}$ می‌باشد که با توجه به میزان توان راکتیو تولیدی تعیین می‌گردد.

برای سادگی برای سرعت باد، تابع چگالی احتمالی نرمال فرض شده است، اگرچه به راحتی می‌توان از مدل‌های پیچیده‌تر مثل توزیع احتمالاتی رایلی و یا ویبول نیز استفاده کرد. پارامترهای تابع چگالی احتمال، میانگین (μ) 12 m/s و انحراف معیار (σ) $1/8 \text{ m/s}$ در نظر گرفته شده [۳۷] و تابع چگالی احتمال به ۱۳ قسمت (A_i ها) تقسیم شده که در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

$$L_{mn,ij,C} \leq v, \forall ij, \forall C = 1, \dots, N_C \quad (36)$$

در این روابط n تعداد باس‌ها، λ قیمت انرژی بازار، N_C حاصل ضرب تعداد دسته‌های سرعت باد محتمل در تعداد سناریوهای محتمل، SM مجموعه ماشین‌های سنکرون، SC مجموعه خازن‌ها، P_{Gi} توان اکتیو تولیدشده در باس i ام، Q_{Gi} توان راکتیو تولیدشده در باس i ام، P_{Di} بار اکتیو در باس i ام، Q_{Di} بار راکتیو در باس i ام، Q_{Ci} توان راکتیو خازنی تولیدشده در باس i ام، V_i اندازه ولتاژ باس i ام، δ_i زاویه ولتاژ باس i ام، $Y_{ij} < \theta_{ij}$ مؤلفه ij ام از ماتریس admittانس، S_{ij} ظرفیت خط بین باس i و j و $L_{mn,ij}$ شاخص پایداری خط برای خط بین باس i ام و j ام می‌باشند.

در فرمول‌بندی OPF بالا، (۳۰) و (۳۱) معادلات پخش بار هستند. محدودیت‌های تأمین توان راکتیو با ژنراتورها، کندانسورها و وجود خازن‌ها به ترتیب با (۳۲) و (۳۳) نشان داده شده و محدودیت‌های ولتاژ تمام باس‌ها و ظرفیت خط انتقال به ترتیب با (۳۴) و (۳۵) اعمال می‌گردد. به علاوه قید حاشیه پایداری ولتاژ به وسیله (۳۶) در نظر گرفته می‌شود. پارامتر v باید به قدر کفایت کمتر از واحد بوده و اگر کمتر از حد مورد نیاز باشد، هزینه بهره‌برداری افزایش می‌یابد. همچنین فرض شده که ژنراتور باس اسلک، مسئول توازن بار توان اکتیو و راکتیو در سیستم است.

۷- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها روی شبکه ۳۰ باسه IEEE انجام شده است. این سیستم

جدول ۶: نتایج برنامه‌ریزی توان راکتیو برای حالت کم‌باری (حالت اول).

| منابع توان راکتیو | استراتژی ۱ | استراتژی ۲ | استراتژی ۳ | استراتژی ۴ |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| G_1 | ۰٫۰۵۴ | ۰٫۱۰۰ | ۰٫۱۴۲ | ۰٫۱۳۴ |
| G_2 | ۰٫۱۰۹ | ۰٫۱۲۳ | ۰٫۰۹۷ | ۰٫۱۱۸ |
| G_3 | ۰٫۰۹۲ | ۰٫۰۴ | ۰٫۰۹۳ | ۰٫۰۹۰ |
| G_4 | ۰٫۱۹۶ | ۰٫۲۸۱ | ۰٫۲۲۳ | ۰٫۲۵۵ |
| G_5 | ۰٫۲۲۳ | ۰٫۲۴۳ | ۰٫۲۱۳ | ۰٫۲۱۶ |
| Condenser | ۰٫۱۲۴ | ۰٫۱۳۱ | ۰٫۱۰۳ | ۰٫۱۱۲ |
| WT | -۰٫۱۶۳ | ۰٫۰۳۰ | ۰٫۰۱ | -۰٫۱۵۵ |
| مجموع هزینه‌ها | ۲۸۷٫۸۷ | ۲۵۱٫۰۶ | ۲۶۹٫۹۲ | ۲۵۷٫۴۳ |
| WPL_{min} | ۰٫۲۹۲ | ۰٫۲۲۰ | ۰٫۲۶۷ | ۰٫۲۵۲ |

برای نشان‌دادن دقت و کارایی الگوریتم بازار توان راکتیو احتمالی در این طرح، برای شبیه‌سازی‌ها، دو حالت مختلف برای سطوح بارگذاری مختلف سیستم در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر حالت، چهار استراتژی متفاوت برای مقایسه برنامه‌ریزی توان راکتیو احتمالی نسبت به برنامه‌ریزی توان راکتیو قطعی در نظر گرفته شده است.

۷-۱-۱ حالت اول

در این حالت بارگذاری سبک روی شبکه صورت گرفته و در نتیجه بهره‌برداری از خطوط در نزدیکی محدودیت ظرفیت نامی آنها صورت می‌پذیرد. قیمت توان اکتیو در این حالت (λ) برای شبکه $60 \text{ \$/MWh}$ در نظر گرفته شده و مقدار یک برای α قرار داده شده است.

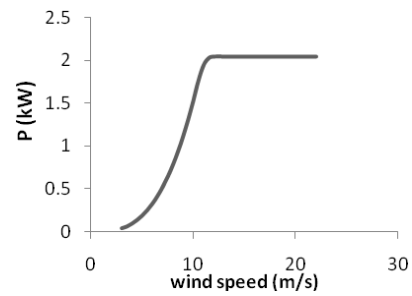
در اولین استراتژی، برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن مینیمم توان تولیدی برای توربین بادی صورت می‌پذیرد. در استراتژی دوم تولید ماکسیمم توان تولیدی برای توربین و در استراتژی سوم محتمل‌ترین سرعت باد و توان تولیدی توربین، در نظر گرفته شده است. در استراتژی آخر از برنامه‌ریزی احتمالی پیشنهادی در این طرح، تمام سرعت‌های باد احتمالی در نظر گرفته شده است.

نتایج شبیه‌سازی در جدول ۶ آورده شده و برای مقایسه نتایج، مجموع هزینه‌ها و WPL_{min} برای هر استراتژی در آن آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد در هر چهار استراتژی، سیستم دارای حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب بوده و از نقطه ناپایداری ($WPL_{min} = 1$) به اندازه کافی دور می‌باشد. کمترین مجموع هزینه، مربوط به استراتژی دوم یعنی حداکثر توان توربین بادی و استراتژی چهارم خواهد بود. باید توجه داشت در استراتژی دوم به دلیل این که حداکثر توان برای توربین قرار داده شده، در نتیجه توان اکتیو بیشتری در سیستم تزریق شده و تلفات کاهش و حاشیه پایداری ولتاژ افزایش می‌یابد. این در حالی است که توربین بادی در اکثر مواقع (با احتمال بیشتر) در این حالت قرار ندارد و بنابراین نتیجه به دست آمده را نمی‌توان برای تمام زمان‌ها و سرعت‌های باد نسبت داد. ولی استراتژی چهارم که برنامه‌ریزی توان راکتیو احتمالی می‌باشد، برای تمام زمان‌ها و سرعت‌های باد خواهد بود.

۷-۱-۲ حالت دوم

در این حالت، شبکه در سطح بارگذاری سنگین قرار داشته و بعضی از خطوط، دارای تراکم بالا می‌باشند و قیمت توان اکتیو در این حالت (λ) برای شبکه $100 \text{ \$/MWh}$ در نظر گرفته شده است. در این حالت احتمال فروپاشی ولتاژ افزایش یافته و اپراتور سیستم باید توجه بیشتری به حاشیه پایداری ولتاژ داشته باشد. در نتیجه می‌بایست در (۳۷) مقدار بیشتری برای α اتخاذ گردد. در این حالت مقدار α ، $1/2$ قرار داده شده است.



شکل ۵: منحنی توان-سرعت توربین بادی.

جدول ۵: پارامترهای مورد استفاده در مسأله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی توان راکتیو.

| پارامتر | مقدار |
|--------------------|-------|
| تولید نسل | ۱۰۰ |
| اندازه جمعیت اولیه | ۱۰۰ |
| احتمال تقاطع | ۰٫۹ |
| احتمال جهش | ۰٫۰۲ |

برای شبیه‌سازی‌ها از دو طرح مختلف استفاده شده است. در طرح اول تنها نایقینی مربوط به توان خروجی توربین بادی در نظر گرفته شده و نایقینی مربوط به پیش‌بینی بار لحاظ نگردیده است. همچنین در این طرح، تنها دو هدف حداقل کردن هزینه و حداکثر کردن حاشیه پایداری ولتاژ برای برنامه‌ریزی بهینه توان راکتیو، مد نظر قرار داده شده است. شبیه‌سازی‌ها در این طرح برای دو حالت بارگذاری سنگین و سبک شبکه صورت پذیرفته و همچنین هر حالت، دارای چهار استراتژی مختلف برای مقایسه حالت قطعی و احتمالی می‌باشد. در طرح دوم از الگوریتم احتمالی پیشنهادی در این مقاله با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از بارهای پیش‌بینی شده احتمالی و مجموعه‌ای از سرعت‌های محتمل برای برنامه‌ریزی توان راکتیو استفاده شده است. در این طرح، تمام اهداف بیان شده در بخش ۶ مد نظر قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها در این طرح برای پنج استراتژی صورت پذیرفته که برای مقایسه حالت‌های تک‌هدفه و حالت چندهدفه می‌باشد. همچنین در ادامه به بررسی تأثیر ضرایب وزنی در برنامه‌ریزی توان راکتیو و تأثیر ارتباط بین تغییرات توان خروجی توربین و بار مصرفی شبکه در برنامه‌ریزی توان راکتیو احتمالاتی پرداخته شده است. پارامترهای روش بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در حل مسأله برنامه‌ریزی توان راکتیو در جدول ۵ آورده شده است.

۷-۱-۳ برنامه‌ریزی توان راکتیو مربوط به طرح اول

تابع هدف در این طرح به صورت (۳۷) خواهد بود

$$F = \sqrt{\left(\frac{F_1}{F_1^*}\right)^2 + \alpha \left(\frac{F_2}{F_2^*}\right)^2} \quad (37)$$

F_1^* و F_2^* مینیمم مقادیر قابل دستیابی توابع هدف در بخش‌های ۱-۶ و ۲-۶ می‌باشد. اپراتور سیستم با توجه به شرایط بازار یا موقعیت بهره‌برداری شبکه، می‌تواند فاکتور وزنی مناسب (α) را برای WPL_{min} انتخاب کند.

برای مثال اگر حداقل کردن هزینه از اهمیت بیشتری نسبت به حاشیه امنیت ولتاژ برخوردار باشد، اپراتور می‌تواند عدد کوچک‌تری را برای α در نظر بگیرد. قیود مسأله (۳۰) تا (۳۶) می‌باشند و روشن است زمانی که شبکه دارای بارگذاری سبک باشد، نقطه بهره‌برداری سیستم به اندازه کافی از نقطه فروپاشی ولتاژ دور بوده و برای کاهش هزینه بهتر است، فاکتور وزنی کوچک‌تری به WPL_{min} اختصاص داده شود.

جدول ۸: اطلاعات بار اکتیو و راکتیو تمامی باس‌ها برای شبکه ۳۰ باسه IEEE.

| شماره باس | P_d | Q_d | شماره باس | P_d | Q_d |
|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| ۱ | ۰ | ۰ | ۱۶ | ۴,۲ | ۲,۱۶ |
| ۲ | ۲۶,۰۴ | ۱۵,۲۴ | ۱۷ | ۱۰,۸ | ۶,۹۶ |
| ۳ | ۲,۸۸ | ۱,۴۴ | ۱۸ | ۳,۸۴ | ۱,۸ |
| ۴ | ۹,۱۲ | ۱,۹۲ | ۱۹ | ۱۱,۴ | ۴,۰۸ |
| ۵ | ۰ | ۰ | ۲۰ | ۲,۶۴ | ۰,۸۴ |
| ۶ | ۰ | ۰ | ۲۱ | ۲۱ | ۱۳,۴۴ |
| ۷ | ۲۷,۳۶ | ۱۳,۰۸ | ۲۲ | ۰ | ۰ |
| ۸ | ۳۶ | ۳۶ | ۲۳ | ۱,۹۲ | ۱,۲۸ |
| ۹ | ۰ | ۰ | ۲۴ | ۱۰,۴۴ | ۸,۰۴ |
| ۱۰ | ۶,۹۶ | ۲,۴ | ۲۵ | ۰ | ۰ |
| ۱۱ | ۰ | ۰ | ۲۶ | ۴,۲ | ۲,۷۶ |
| ۱۲ | ۱۳,۴۴ | ۹ | ۲۷ | ۰ | ۰ |
| ۱۳ | ۰ | ۰ | ۲۸ | ۰ | ۰ |
| ۱۴ | ۷,۴۴ | ۱,۹۲ | ۲۹ | ۲,۸۸ | ۱,۰۸ |
| ۱۵ | ۹,۸۴ | ۳ | ۳۰ | ۱۲,۷۲ | ۲,۲۸ |

جدول ۷: نتایج برنامه‌ریزی توان راکتیو برای حالت بارگذاری سنگین (حالت دوم).

| منابع توان راکتیو | استراتژی ۱ | استراتژی ۲ | استراتژی ۳ | استراتژی ۴ |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| G_1 | ۰,۱۸۰ | ۰,۲۱۴ | ۰,۲۳۸ | ۰,۲۳۴ |
| G_r | ۰,۲۶۴ | ۰,۳۴۱ | ۰,۳۰۸ | ۰,۳۱۸ |
| G_r | ۰,۲۲۳ | ۰,۱۵۰ | ۰,۲۱۴ | ۰,۱۹۰ |
| G_f | ۰,۳۰۱ | ۰,۳۶۶ | ۰,۳۲۲ | ۰,۳۵۵ |
| G_s | ۰,۴۲۱ | ۰,۴۳۱ | ۰,۴۱۲ | ۰,۴۱۶ |
| Condenser | ۰,۲۱۸ | ۰,۲۲۹ | ۰,۱۸۴ | ۰,۲۱۲ |
| WT | ۰,۱۱۳ | ۰,۱۲۶ | ۰,۱۰۵ | ۰,۱۰۲ |
| مجموع هزینه‌ها | ۶۴۷,۴۵ | ۵۷۹,۶۷ | ۶۱۱,۷۹ | ۵۹۱,۴۶ |
| WPL_{mn} | ۰,۶۹۸ | ۰,۶۲۲ | ۰,۶۷۳ | ۰,۶۵۹ |

جدول ۹: گروه‌بندی باس‌ها بر اساس فاصله الکتریکی آنها از منابع توان راکتیو.

| منبع تولید توان راکتیو | $D_{ij} \leq 0,1$ | $0,1 < D_{ij} \leq 0,2$ | $0,2 < D_{ij} \leq 0,25$ | $0,25 < D_{ij} \leq 0,3$ |
|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| G_{slack} | ۲ | ۳, ۴, ۵, ۶, ۷, ۸ و ۲۸ | | ۹ |
| G_1 | ۱, ۴ و ۶ | ۳, ۵, ۷, ۸ و ۲۸ | ۹ | ۱۰ و ۱۲ |
| G_r | | ۹, ۱۷ و ۲۴ | ۴, ۶, ۱۲, ۱۶ و ۲۰ | ۲, ۳, ۷, ۸, ۱۵, ۱۸, ۱۹, ۲۳ و ۲۸ |
| G_r | | | | ۲۵, ۲۶ و ۲۹ |
| G_f | | ۱۵ | | ۱۲ و ۲۴ |
| G_s | | ۱۲ | | ۱۵ و ۱۴ |
| Condenser | | ۹, ۱۶, ۲۱ و ۲۲ | ۱۲ | ۳, ۴, ۶, ۸, ۱۵, ۱۸, ۱۹, ۲۰ و ۱۱ |

فرض شده و حذف می‌گردند.

برای تعیین نواحی کنترل ولتاژ به منظور تأمین رزرو توان راکتیو محلی با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش ۵، فواصل الکتریکی بین باس‌ها به صورت جدول ۹ دسته‌بندی شده‌اند. بر اساس جدول یادشده، ناحیه‌بندی شبکه ۳۰ باسه IEEE صورت می‌پذیرد. شکل ۶ ناحیه‌بندی نهایی شبکه را که شامل چهار ناحیه بوده، نشان می‌دهد.

برای نشان‌دادن دقت و کارایی الگوریتم احتمالاتی جامع پیشنهادی از پنج استراتژی مختلف استفاده گردیده است. هر یک از این پنج استراتژی، نتایج برنامه‌ریزی توان راکتیو را برای هر کدام از بخش‌های ۱-۶، ۲-۶، ۳-۶، ۴-۶ و ۵-۶ به تنهایی ارائه می‌کنند. برای مثال در استراتژی ۱، تابع هدف، تنها حداقل نمودن مجموع هزینه‌ها می‌باشد.

تمامی ضرایب وزنی برابر با یک قرار داده شده و قیمت انرژی شبکه در این حالت $100 \text{ \$/MWh}$ (λ) و ضریب همبستگی (ρ) صفر در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی به همراه مجموع هزینه‌ها، WPL_{mn} ، رزرو توان راکتیو هر ناحیه و احتمال تراکم خطوط در جدول ۱۰ آورده شده است.

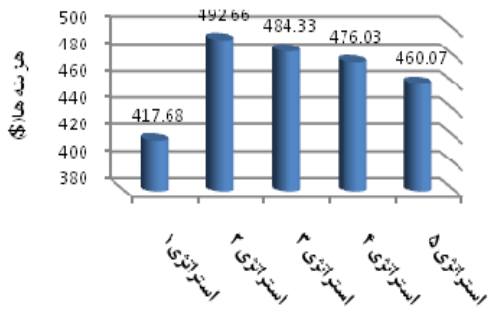
برای توربین بادی به دلیل نایقینی در توان خروجی آن، بازه قابلیت تولید توان راکتیو نیز به ازای تغییرات تولید توان اکتیو، تغییر می‌کند. با توجه به این موضوع، رزرو توان راکتیو مربوط به توربین بادی دارای نایقینی بوده و با توجه به توان اکتیو تولیدی، تغییر می‌کند زیرا بازه قابلیت

شبیه به حالت اول، چهار استراتژی در نظر گرفته شده است. توان راکتیو برنامه‌ریزی شده، مجموع هزینه‌ها و بدترین شاخص پایداری ولتاژ معرفی شده برای همه استراتژی‌ها در جدول ۷ آورده شده است. با توجه به جدول ۷ مشاهده می‌شود که شاخص پایداری ولتاژ برای هر استراتژی، بزرگ‌تر از حالت اول و نزدیک به یک می‌باشد. در این حالت نیز کمترین هزینه و بیشترین حاشیه پایداری ولتاژ، مربوط به استراتژی دوم و چهارم است که دلایل آن در حالت اول بررسی شد.

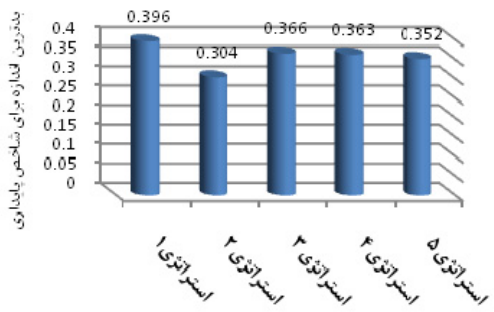
۷-۲ برنامه‌ریزی توان راکتیو مربوط به طرح دوم

در این طرح، الگوریتم احتمالاتی جامع پیشنهادی در این مقاله برای برنامه‌ریزی بهینه و امن توان راکتیو پیاده‌سازی شد و سعی بر کمینه‌سازی تابع چندهدفه بیان‌شده به صورت (۲۹) گردیده است. تمامی اهداف بیان‌شده در بخش ۶ مد نظر قرار گرفته و حالت احتمالاتی هم برای توان خروجی توربین و هم پیش‌بینی بار لحاظ گردیده است. برای مدل نایقینی بار، بارهای اکتیو و راکتیو هر گره به صورت تابع چگالی احتمال نرمال فرض شده‌اند. برای هر بار، مقدار میانگین (μ) برابر با مقدار داده‌شده در جدول ۸ و مقدار انحراف معیار آن (σ) برابر ۵٪ در نظر گرفته شده و شایان ذکر است که ضریب توان تمام مصرف‌کننده‌ها ثابت می‌باشد.

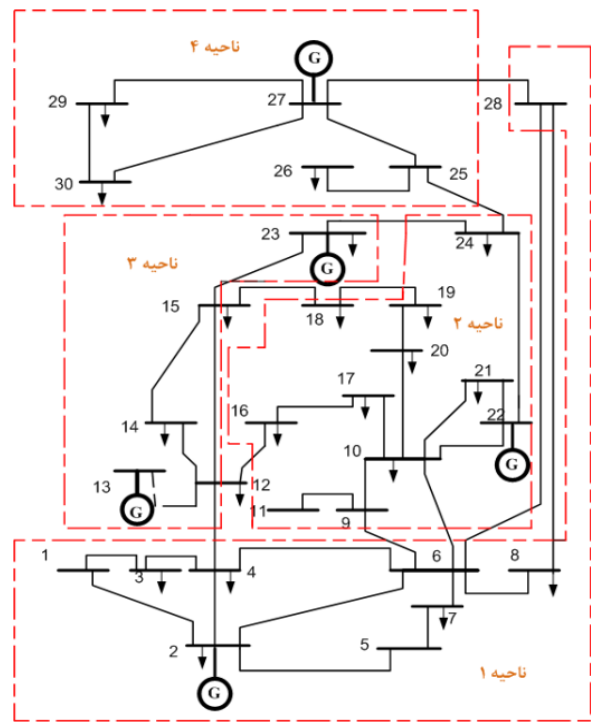
تابع چگالی احتمال هر بار در هر باس به هفت قسمت تقسیم شده است. همان‌طور که در بخش ۴-۲-۱ توضیح داده شد برای کاهش سناریوها، سناریوهایی که احتمال آنها بسیار کوچک بوده، غیر ممکن



شکل ۷: مقایسه هزینه‌های مربوط به پنج استراتژی مورد مطالعه.



شکل ۸: مقایسه اندازه شاخص پایداری ولتاژ مربوط به پنج استراتژی مورد مطالعه.



شکل ۶: ناحیه‌بندی شبکه ۳۰ باسه IEEE به چهار ناحیه.

استراتژی ۵ که برنامه‌ریزی توان راکتیو احتمالی پیشنهادی در این طرح بوده، دارای حاشیه پایداری ولتاژ مناسب و همچنین هزینه نسبتاً پایین می‌باشد. در این استراتژی رزرو توان راکتیو در همه نواحی به میزان کافی و احتمال تراکم خطوط، نسبتاً پایین خواهد بود. برای مقایسه بهتر، هزینه‌ها و اندازه شاخص پایداری ولتاژ برای پنج استراتژی در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است.

برای نشان‌دادن تأثیر ضرایب وزنی در برنامه‌ریزی توان راکتیو در جداول ۱۱ و ۱۲ نتایج حاصل از انتخاب مقادیر متفاوت برای دو ضریب α و β که مربوط به دو شاخص هزینه و حاشیه پایداری ولتاژ می‌شوند، نمایش داده شده و دلیل انتخاب این دو شاخص، آن است که تأثیر ضرایب مختلف در آنها کاملاً قابل مقایسه می‌باشد. در این حالت، بقیه ضرایب یک فرض شده است. با توجه به جدول ۱۱ هرچه ضریب وزنی مربوط به هزینه، عدد بزرگ‌تری قرار داده شود، برنامه‌ریزی به نحوی صورت می‌پذیرد که مجموع هزینه‌ها کمتر خواهد شد. همین روند برای شاخص حاشیه پایداری ولتاژ نیز تکرار شده است. در نتیجه با توجه به ضریب وزنی انتخابی از سوی اپراتور، میزان اهمیت هر شاخص تعیین می‌گردد. برای نشان‌دادن تأثیر ارتباط بین تغییرات توان خروجی توربین و بار مصرفی شبکه در برنامه‌ریزی توان راکتیو، در جدول ۱۳ به ازای مقادیر مختلف ضریب همستگی، نتایج مربوط به برنامه‌ریزی توان راکتیو صورت‌پذیرفته، نشان داده است.

۸- نتیجه‌گیری

تأمین توان راکتیو یک سرویس جانبی مهم بوده که تقریباً در تمامی بازارهای الکتریکی به واسطه قراردادهای تجاری با شرکت‌کننده‌های بازار فراهم می‌گردد. توان تولیدی توسط توربین‌های بادی به سرعت باد بستگی داشته و بنابراین به دلیل طبیعت نامنظم و متغیر باد و وجود مزارع بادی در سیستم، نایقینی را در آن افزایش داده و ممکن است این عامل روی کارکرد شبکه و امنیت آن اثر بگذارد. از آنجا که هر بار پیش‌بینی شده در مقایسه با بار واقعی دارای مقداری خطا بوده، در نظر گرفتن نایقینی در پیش‌بینی بار برای داشتن برنامه‌ریزی توان راکتیو امن و بهینه

تولید توان راکتیو و در نتیجه حداکثر توان راکتیو قابل تولید که برای محاسبه رزرو نیاز است تغییر خواهد کرد.

با توجه به شکل ۱ به ازای هر میزان توان تولیدی توربین بادی، می‌توان بازه تولید توان راکتیو را تعیین کرد. اگر فرض شود توان تولیدی توربین بادی کمتر از ۰/۸ پریونیت باشد، بازه توان راکتیو تولیدی توسط توربین از شکل ۱ و برای توان ۰/۸ پریونیت، تعیین و احتمال آن به وسیله جدول ۴ و شکل ۵ محاسبه می‌گردد. به این صورت که اندازه احتمال مورد نظر از مجموع احتمالات تولید توان راکتیو کمتر از ۰/۸ پریونیت توسط توربین به دست می‌آید. در واقع این احتمال، درصد اطمینان به رزرو توان راکتیو تولیدی توسط توربین بادی خواهد بود. بسته به درصد اطمینان لازم به رزرو توان راکتیو تولیدی توسط توربین بادی، شبیه‌سازی‌ها صورت می‌گیرد و هرچه درصد اطمینان بالاتر رود، بازه توان راکتیو تولیدی، کوچک‌تر می‌گردد. در اینجا نیز فرض شده توان تولیدی توربین بادی، کمتر از ۰/۸ پریونیت باشد.

همان طور که در جدول ۱۰ نشان داده شده، کمترین هزینه مربوط به استراتژی اول می‌باشد اما در صورت استفاده از این استراتژی برای برنامه‌ریزی توان راکتیو، ناحیه ۳ دارای رزرو توان راکتیو بسیار کمتری نسبت به بقیه نواحی بوده و به نظر ناکافی می‌رسد. در این حالت در صورت بروز یک اغتشاش سخت در ناحیه ۳، ممکن است ولتاژ باس‌های آن، دچار افت شدید شوند. بدترین شاخص پایداری ولتاژ و بالاترین احتمال تراکم خطوط نیز مربوط به این استراتژی می‌باشد. در صورت انتخاب استراتژی دوم توسط اپراتور سیستم، شبکه دارای بهترین حاشیه پایداری ولتاژ بین استراتژی‌های دیگر می‌باشد اما در این استراتژی، هزینه‌ها بسیار بالا رفته و احتمال تراکم خطوط نیز بالاست. در نتیجه به عنوان یک برنامه‌ریزی مناسب، نمی‌توان از این استراتژی استفاده نمود. در استراتژی ۳، رزرو توان راکتیو در تمامی نواحی به میزان مناسب بوده اما مجموع هزینه‌ها بیشتر از استراتژی ۱ می‌باشد. در حالی که استراتژی ۴ دارای احتمال تراکم خطوط بسیار کم نسبت به بقیه استراتژی‌ها می‌باشد اما مجموع هزینه‌های مربوط به این استراتژی نیز بسیار بالا خواهد بود.

جدول ۱۰: نتایج شبیه‌سازی برای طرح دوم و استراتژی‌های مربوط به آن.

| منابع توان راکتیو | استراتژی ۱ | استراتژی ۲ | استراتژی ۳ | استراتژی ۴ | استراتژی ۵ |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| G_1 | ۰.۱۰۶ | ۰.۲۴۷ | ۰.۲۵۴ | ۰.۲۹۳ | ۰.۲۴۳ |
| G_r | ۰.۱۰۶ | ۰.۱۶۴ | ۰.۰۹۱ | ۰.۱۵۷ | ۰.۰۷۸ |
| G_f | ۰.۰۷۳ | ۰.۰۸۶ | ۰.۰۹۳ | ۰.۱۱۰ | ۰.۱۲۹ |
| G_e | ۰.۱۵۴ | ۰.۱۴۶ | ۰.۱۱۶ | ۰.۱۰۵ | ۰.۱۲۴ |
| G_o | ۰.۲۴۴ | ۰.۱۹۴ | ۰.۱۷۸ | ۰.۱۷۲ | ۰.۱۹۰ |
| Condenser | ۰.۱۷۵ | ۰.۱۸۲ | ۰.۲۵۷ | ۰.۲۱۳ | ۰.۲۴۷ |
| WT | ۰.۰۹۶ | ۰.۱۴۴ | ۰.۲۰۴ | ۰.۱۷۱ | ۰.۱۶۸ |
| مجموع هزینه‌ها | ۴۱۷.۶۸ | ۴۹۲.۶۶ | ۴۸۴.۳۳ | ۴۷۶.۰۳ | ۴۶۰.۰۷ |
| WPL_{min} | ۰.۳۹۶ | ۰.۳۰۴ | ۰.۳۶۶ | ۰.۲۶۳ | ۰.۳۵۲ |
| مجموع رزرو ناحیه ۱ | ۱.۱۹ | ۱.۰۰۹ | ۰.۹۴ | ۰.۹۳ | ۰.۹۹ |
| مجموع رزرو ناحیه ۲ | ۰.۶۰ | ۰.۵۴ | ۰.۵۴ | ۰.۵۳ | ۰.۵۶ |
| مجموع رزرو ناحیه ۳ | ۰.۲۸ | ۰.۳۴ | ۰.۳۸ | ۰.۴۰ | ۰.۳۶ |
| مجموع رزرو ناحیه ۴ | ۰.۴۰ | ۰.۳۹ | ۰.۳۸ | ۰.۳۷ | ۰.۳۵ |
| احتمال تراکم خطوط | ۰.۹۰ | ۰.۸۷ | ۰.۷۹ | ۰.۶۲ | ۰.۷۵ |

جدول ۱۳: تأثیر ضریب همبستگی در برنامه‌ریزی توان راکتیو.

| تولید منابع توان راکتیو (p.u) | ρ | | | |
|-------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | ۰.۸ | ۰.۶ | ۰.۴ | ۰.۲ |
| G_1 | ۰.۲۱۲ | ۰.۲۳۹ | ۰.۲۰۲ | ۰.۱۸۳ |
| G_r | ۰.۰۸۱ | ۰.۱۱۴ | ۰.۰۵۴ | ۰.۱۰۱ |
| G_f | ۰.۱۱۹ | ۰.۱۲۲ | ۰.۱۴۵ | ۰.۰۹۲ |
| G_e | ۰.۱۵۷ | ۰.۱۳۴ | ۰.۱۶۳ | ۰.۱۲۰ |
| G_o | ۰.۱۷۱ | ۰.۱۲۸ | ۰.۲۳۱ | ۰.۱۶۳ |
| Condenser | ۰.۲۴۹ | ۰.۲۶۳ | ۰.۲۴۰ | ۰.۲۵۹ |
| WT | ۰.۱۴۳ | ۰.۱۶۲ | ۰.۱۵۴ | ۰.۱۳۳ |

جدول ۱۱: تأثیر ضریب وزنی α در برنامه‌ریزی توان راکتیو.

| α | $\beta = 1$ | |
|----------|-------------|--------|
| | F_r | F_1 |
| ۰.۶ | ۰.۳۴۴ | ۴۶۹.۰۱ |
| ۰.۸ | ۰.۳۴۹ | ۴۶۴.۹۷ |
| ۱ | ۰.۳۵۲ | ۴۶۰.۰۷ |
| ۱.۲ | ۰.۳۵۵ | ۴۵۳.۳۶ |
| ۱.۴ | ۰.۳۶۱ | ۴۴۹.۱۱ |

جدول ۱۲: تأثیر ضریب وزنی β در برنامه‌ریزی توان راکتیو.

| β | $\alpha = 1$ | |
|---------|--------------|--------|
| | F_r | F_1 |
| ۰.۶ | ۰.۳۷۰ | ۴۵۶.۴۵ |
| ۰.۸ | ۰.۳۶۲ | ۴۵۸.۸۹ |
| ۱ | ۰.۳۵۲ | ۴۶۰.۰۷ |
| ۱.۲ | ۰.۳۴۳ | ۴۶۲.۰۲ |
| ۱.۴ | ۰.۳۳۵ | ۴۶۳.۹۱ |

مراجع

- [1] FERC Order No. 888, Promotion of Wholesale Competition Through Open Access Non-Discriminatory Transmission Services by Public Utilities and Recovery of Stranded Costs by Public Utilities and Transmitting Utilities, Apr. 1996.
- [2] T. Plavsic and I. Kuzle, "Two-stage optimization algorithm for short-term reactive power planning based on zonal approach," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 4, pp. 949-957, Apr. 2011.
- [3] N. Amjady, A. Rabiee, and H. Shayanfar, "A stochastic framework for clearing of reactive power market," *Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 239-245, Jun. 2010.
- [4] I. El-Samahy, C. Canizares, K. Bhattacharya, and J. Pan, "An optimal reactive power dispatch model for deregulated electricity markets," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 7 pp., Jun. 2007.
- [5] F. Echavarren, E. Lobato, and L. Rouco, "Steady-state analysis of the effect of reactive generation limits in voltage stability," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 9, pp. 1292-1299, Sep. 2009.
- [6] C. T. Su and C. T. Lin, "Fuzzy-based voltage/reactive power scheduling for voltage security improvement and loss reduction," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 319-323, Apr. 2001.
- [7] J. Zhong and K. Bhattacharya, "Toward a competitive market for reactive power," *Power Systems, IEEE Trans. on*, vol. 17, no. 4, pp. 1206-1215, Nov. 2002.
- [8] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Tata McGraw-Hill Education, 1994.
- [9] I. El-Samahy, K. Bhattacharya, C. Canizares, M. F. Anjos, and J. Pan, "A procurement market model for reactive power services considering system security," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 137-149, Feb. 2008.
- [10] L. Arya, L. Titare, and D. Kothari, "Improved particle swarm optimization applied to reactive power reserve maximization," *Int.*

دارای اهمیت بالایی است. در این مقاله الگوریتمی جدید برای برنامه‌ریزی تأمین توان راکتیو در شبکه ارائه شده که یک مسأله بهینه‌سازی غیر خطی چندهدفه احتمالی بوده که در آن، نایقینی‌ها و خطاهای پیش‌بینی بار به همراه نایقینی در توان خروجی توربین بادی، وارد محاسبات گردیده است. به دلیل تأثیر برنامه‌ریزی توان راکتیو روی امنیت و قابلیت اطمینان سیستم، باید در طول برنامه‌ریزی، مسایل فنی مختلف در کنار مسایل اقتصادی در نظر گرفته شوند. شبیه‌سازی‌ها روی سیستم تست ۳۰ باسه IEEE صورت پذیرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده آن است که الگوریتم احتمالاتی پیشنهادی، دارای بهینه‌ترین برنامه‌ریزی می‌باشد که در صورت استفاده اپراتور از این برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری شبکه، علاوه بر هزینه، حاشیه پایداری و لتاژ سیستم نیز در رنج مناسب قرار می‌گیرد. همچنین رزرو توان راکتیو در هر ناحیه نیز به میزان کافی خواهد بود. یکی از عیوب روش پیشنهادی این است که به دلیل پیچیده‌شدن مدل پیشنهادی و در نظر گرفتن ترم‌های متعدد، پیاده‌سازی آن به صورت عملی به سختی و با مشکلاتی خواهد بود که البته قابل حل می‌باشند.

- issues," *Energy Conversion, IEEE Trans. on*, vol. 24, no. 3, pp. 661-672, Jan. 2009.
- [29] M. Esmaili, H. A. Shayanfar, and N. Amjady, "Multi-objective congestion management incorporating voltage and transient stabilities," *Energy*, vol. 34, no. 9, pp. 1401-1412, Sep. 2009.
- [30] M. Moghavvemi and F. Omar, "Technique for contingency monitoring and voltage collapse prediction," *IET Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 145, no. 6, pp. 634-640, Nov. 1998.
- [31] M. Mohammadi and G. Gharehpetian, "Application of core vector machines for on-line voltage security assessment using a decision-tree-based feature selection algorithm," *IET Generation, Transmission, & Distribution*, vol. 3, no. 8, pp. 701-712, Aug. 2009.
- [32] R. A. Schlueter, S. Z. Liu, and K. Ben-Kilani, "Justification of the voltage stability security assessment and diagnostic procedure using a bifurcation subsystem method," *Power Systems, IEEE Trans. on*, vol. 15, no. 3, pp. 1105-1111, Aug. 2000.
- [33] P. Lagonotte, J. Sabonnadiere, J. Y. Leost, and J. P. Paul, "Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France," *Power Systems, IEEE Trans. on*, vol. 4, no. 2, pp. 479-486, May 1989.
- [34] H. Liu, A. Bose, and V. Venkatasubramanian, "A fast voltage security assessment method using adaptive bounding," in *Proc. of the 21st IEEE Power Industry Computer Applications, PICA'99/1999 International Conf.*, pp. 325-330, Jul. 1999.
- [35] E. Nobile and A. Bose, "A new scheme for voltage control in a competitive ancillary service market," in *Proc. of the Power Systems Computation Conf.*, Seville, Spain, Jun. 2002.
- [36] M. Zeleny and J. L. Cochrane, *Multiple Criteria Decision Making*, vol. 25, McGraw-Hill, New York, 1982.
- [37] A. Kargarian and M. Raoofat, "Stochastic reactive power market with volatility of wind power considering voltage security," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 2565-2571, May 2011.
- [38] SKiiP 1803GB172-3DW power module data sheet [Online], Available: <http://www.semikron.com/internet/ds.jsp?file=1264.html>.
- احسان محرمی** در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق گرایش قدرت را از دانشگاه شهید باهنر کرمان و در سال ۱۳۹۲ مدرک کارشناسی ارشد در همان گرایش را از دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته دریافت نمود. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل موضوعاتی مانند انرژی‌های نو به طور ویژه انرژی باد و طراحی مزارع بادی و بازار توان راکتیو می‌باشد.
- سعید اسماعیلی** در سال ۱۳۷۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق-قدرت را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی ارشد در همان گرایش را از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود. از سال ۱۳۸۱ به دوره دکترا مهندسی برق گرایش قدرت در دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) وارد و در سال ۱۳۸۶ موفق به اخذ درجه دکتری در این رشته از دانشگاه مذکور گردید. دکتر اسماعیلی از بهمن ماه سال ۱۳۸۶ در بخش مهندسی برق دانشگاه شهید باهنر در کرمان مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این بخش می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل موضوعاتی مانند تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت، کیفیت توان و دینامیک سیستم‌های قدرت می‌باشد.
- J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 368-374, Jun. 2010.
- [11] H. Lund, "Renewable energy strategies for sustainable development," *Energy*, vol. 32, no. 6, pp. 912-919, Jun. 2007.
- [12] N. Lior, "Sustainable energy development: the present (2009) situation and possible paths to the future," *Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 3976-3994, Apr. 2010.
- [13] T. Lobos, J. Rezmer, P. Janik, H. Amaris, M. Alonso, and C. Alvarez, "Application of wavelets and Prony method for disturbance detection in fixed speed wind farms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 31, no. 9, pp. 429-436, Oct. 2009.
- [14] H. Raoufi and M. Kalantar, "Reactive power rescheduling with generator ranking for voltage stability improvement," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 4, pp. 1129-1135, Feb. 2009.
- [15] Q. Ai and C. Gu, "Economic operation of wind farm integrated system considering voltage stability," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 608-614, Mar. 2009.
- [16] M. Braun, "Reactive power supply by distributed generators," in *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, 8 pp., Jul. 2008.
- [17] M. Albadi and E. El-Saadany, "Overview of wind power intermittency impacts on power systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 6, pp. 627-632, Jun. 2010.
- [18] J. Wang, M. Shahidehpour, and Z. Li, "Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation," *Power Systems, IEEE Trans. on*, vol. 23, no. 3, pp. 1319-1327, Jul. 2008.
- [19] H. Siahkhalil and M. Vakilian, "Stochastic unit commitment of wind farms integrated in power system," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 9, pp. 1006-1017, Sep. 2010.
- [20] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, *Frontmatter and Index*, Wiley Online Library, 2002.
- [21] L. Wu, M. Shahidehpour, and Y. Fu, "Security-constrained generation and transmission outage scheduling with uncertainties," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 1674-1685, Feb. 2010.
- [22] H. Chen, C. A. Canizares, and A. Singh, "ANN-based short-term load forecasting in electricity markets," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, pp. 411-415, Jan. 2001.
- [23] H. Amaris and M. Alonso, "Coordinated reactive power management in power networks with wind turbines and FACTS devices," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 7, pp. 2575-2586, Jul. 2011.
- [24] *NERC Operating Policy-10 on Interconnected Operation Services, Electricity Reliability Council*, North Amer, Draft-3.1, 2000.
- [25] S. Parida, S. Singh, and S. Srivastava, "Reactive power cost allocation by using a value-based approach," *Generation, Transmission, & Distribution, IET*, vol. 3, no. 9, pp. 872-884, Sep. 2009.
- [26] S. Hao, "A reactive power management proposal for transmission operators," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1374-1381, Nov. 2003.
- [27] S. Hasanpour, R. Ghazi, and M. Javidi, "A new approach for cost allocation and reactive power pricing in a deregulated environment," *Electrical Engineering*, vol. 91, no. 1, pp. 27-34, May 2009.
- [28] N. R. Ullah, K. Bhattacharya, and T. Thiringer, "Wind farms as reactive power ancillary service providers - technical and economic