

ارزیابی راهکارهای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ با در نظر گرفتن تلفات، عدم قطعیت توربین‌های بادی همبسته به هم و تغییرات بار

مرتضی نوجوان گل‌تپه^۱، دانشجوی دکتری؛ هیرش سیدی^۲، دانشیار؛ بهنام محمدی ایواتلو^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - m.nojavan@tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - hseyedi@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - bmohammadi@tabrizu.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی برای ارزیابی کامل راهکارهای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ با در نظر گرفتن تغییرات بار، تلفات شبکه و عدم قطعیت تولید توربین‌های بادی همبسته به هم ارائه شده است. محدوده وسیعی برای تغییر بار سیستم قدرت لحاظ شده و نحوه تغییر راهکارهای پیشگیرانه با تغییر بارگذاری سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. طرح ارائه شده روی شبکه مقیاس بزرگ استاندارد ۱۱۸ باسه IEEE شبیه‌سازی شده است و تأثیر عواملی چون عدم قطعیت تولید توربین‌های بادی همبسته به هم، بهینه کردن تلفات شبکه به همراه حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب سیستم بر نحوه تغییر راهکارهای پیشگیرانه مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. تأثیر میزان مشارکت بارها بر هزینه راهکارهای پیشگیرانه، همچنین دستیابی به روندی از تمام راهکارها با تغییرات بار از دیگر موارد قابل توجه در این مقاله است.

واژه‌های کلیدی: پایداری ولتاژ، راهکارهای پیشگیرانه، تلفات، تغییرات بار، توربین‌های بادی همبسته به هم.

Assessment of Preventive Facilities against Voltage Instability Considering Power System Losses, Correlated Wind Turbine Uncertainty and Load Variations

M. Nojavan Goltappeh¹, PhD Student; H. Seyedi², Associate Professor; B. Mohammadi Ivatloo³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: m.nojavan@tabrizu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: hseyedi@tabrizu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: bmohammadi@tabrizu.ac.ir

Abstract: This paper presents a comprehensive method for preventing voltage instability, considering load variation, power system losses and correlated wind turbines. The proposed method considers large interval for load variation and comprehensive assessment of preventive facilities versus load variation is performed. The proposed method is simulated on large scale IEEE 118-bus test system. The effect of uncertain correlated wind turbines, power system losses and demand response considering voltage stability margin, on preventive facilities is analyzed, too.

Keywords: Voltage stability, preventive facilities, losses, load variation, correlated wind turbines.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۶

نام نویسنده مسئول: هیرش سیدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

جریان توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور به‌دست آمده و سپس معیارهای پایداری ولتاژ پیشنهادی بر اساس مدار معادل تونن از دید باس محاسبه شده‌اند، معیارهای پایداری ولتاژ بر اساس مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم در مراجع [۱۵، ۱۶] ارائه شده‌اند. مرجع [۱۵] ضرایب مشارکت و مقادیر ویژه انتخابی را جهت تحلیل پایداری ولتاژ سیستم قدرت پیشنهاد می‌دهد. درحالی‌که مرجع [۱۶] برای محاسبه حاشیه پایداری از حساسیت درجه دوم مقادیر ویژه نسبت به بار، استفاده می‌کند.

مرجع [۱۷] بر اساس ماتریس ژاکوبین سیستم کل شبکه را با یک سیستم ساده دو باسه مدل کرده است. سپس معیاری برای شناسایی باس‌های بحرانی و میزان مشارکت المان‌های شبکه در بحرانی بودن آن باس ارائه کرده است.

۱-۱-۲- معیارهای دسته دوم

یک معیار بر اساس اندازه‌گیری‌های تجمیع‌شده در یک مرکز در مرجع [۱۸] ارائه شده است. استفاده از ماتریس ادمیتانس شبکه برای به‌دست آوردن مدار معادل تونن از دید باس در این مرجع موردتوجه بوده است. باس‌های سیستم قدرت به سه نوع ژنراتوری، بار و تزریق صفر تقسیم‌بندی شده است. سپس با حذف ولتاژ باس‌های تزریق صفر در روابط، ولتاژ باس‌های بار برحسب ادمیتانس‌های شبکه و ولتاژ باس‌های ژنراتوری به‌دست می‌آید که درواقع همان مدار معادل تونن از دید باس است. یک معیار پایداری ولتاژ گسترده بر اساس داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازور در مرجع [۱۹] پیشنهاد شده است. در معیار معرفی‌شده، دو شاخص مدنظر بوده است. شاخص اول تغییر دامنه ولتاژ از مقدار مرجع آن و شاخص دوم افت ولتاژ باس بین دو مقدار متوسط اندازه‌گیری‌های متوالی می‌باشد. درنهایت شاخص پایداری ولتاژ موردنظر به‌صورت مجموع وزن‌داری از این دو شاخص معرفی شده است. برای ارزیابی پایداری سیستم قدرت با در نظر گرفتن دینامیک سیستم قدرت، ترکیبی از بارهای امیدانس ثابت و موتور القایی برای بار هر باس در مرجع [۲۰] در نظر گرفته شده است. سپس ماتریس حالت برای هر باس با استفاده از معادلات دینامیکی موتور القایی به‌دست آمده است. درنهایت، معیار پایداری ولتاژ بر اساس این معادلات ارائه شده است. تخمین معیار پایداری ولتاژ برای تمام باس‌های بار سیستم قدرت بر اساس داده‌های باس‌های شامل واحدهای اندازه‌گیری فازور در مرجع [۲۱] ارائه شده است. در این روش، داده واحدهای اندازه‌گیری فازور به‌عنوان ورودی مسئله لحاظ شده و خروجی مسئله، مقدار معیار پایداری ولتاژ برای تمام باس‌های بار سیستم قدرت است.

جدول ۱ به‌طور کلی معیارهای پایداری ولتاژ ارائه‌شده در مراجع مختلف را با هم مقایسه کرده و مزایای هر معیار را بیان نموده است.

۱-۲- راهکارهای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ

به‌طور کلی راهکارهای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ عبارت‌اند از: حذف بار، تغییر نقطه کار منابع تولیدکننده توان اکتیو و راکتیو و مشارکت بار. در

پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل‌قبول در تمام شین‌های سیستم در شرایط عادی عملکرد و پس از اینکه تحت یک اختلال قرار گرفت [۱]. تحقیقات انجام‌شده در این زمینه را می‌توان به دو گروه اصلی طبقه‌بندی کرد. هدف گروه اول ارائه معیارهایی جهت پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ و یا تعیین حاشیه پایداری ولتاژ سیستم قدرت است. درحالی‌که هدف گروه دوم ارائه بهینه‌ترین و مؤثرترین راهکارها جهت پیشگیری از ناپایداری ولتاژ و یا افزایش حاشیه پایداری ولتاژ باس‌های سیستم قدرت می‌باشد.

۱-۱-۱- معیارهای پایداری ولتاژ

معیارهای پایداری ولتاژ خود به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند. در دسته اول، معیارها از اندازه‌گیری‌های محلی استفاده می‌کنند. درحالی‌که در دسته دوم، معیارها از اندازه‌گیری‌های تجمیع‌شده در یک مرکز استفاده می‌کنند.

۱-۱-۱-۱- معیارهای دسته اول

یک روش جدید بر اساس تقریب‌های درجه اول و دوم منحنی P-V در همسایگی نقطه فروپاشی برای تخمین نقطه فروپاشی ولتاژ و محاسبه حاشیه پایداری ولتاژ سیستم به ترتیب در مراجع [۲، ۳] ارائه شده است. در مرجع [۲] به‌منظور کاهش تعداد اجرای برنامه پخش بار یک پله زمانی کارا استفاده شده است که از مزایای روش مورداستفاده است. در مرجع [۳] نیز به‌جای تقریب درجه دوم از تقریب درجه اول استفاده شده تا محاسبات سریع‌تر انجام پذیرد. مرجع [۴] شاخصی برای تشخیص فروپاشی ولتاژ بر اساس کمبود توان راکتیو ارائه کرده است. این مرجع برای دستیابی به معیار موردنظر از سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده استفاده کرده است. محاسبه حاشیه پایداری ولتاژ استاتیک و افزایش آن با استفاده از معادلات پخش بار در مراجع [۸-۵] موردتوجه بوده است. در این مراجع، بار سیستم با پله‌هایی که به‌صورت درصدی کوچکی از بار نامی است افزایش پیدا می‌کند و در هر مرحله پخش بار اجرا می‌شود. این عمل تا زمانی که پخش بار واگرا شود، ادامه پیدا می‌کند. در مراجع [۹، ۱۰] پایداری ولتاژ استاتیک با استفاده از منحنی‌های P-V و Q-V مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [۹] یک دیاگرام سه‌بعدی P-Q-V ترسیم شده و بر اساس آن باس‌های ضعیف از لحاظ ولتاژی شناسایی می‌شوند. در مرجع [۱۰]، تأثیر نحوه مدل کردن بار بر حاشیه پایداری ولتاژ موردتوجه قرار گرفته است. یک معیار پایداری ولتاژ برای خطوط سیستم قدرت در مرجع [۱۱] معرفی شده است. معیار معرفی‌شده از مدل دقیق خط انتقال استفاده نموده و جهت پخش توان اکتیو و راکتیو را در نظر می‌گیرد. بر اساس معیار معرفی‌شده در این مرجع، ناپایداری ولتاژ یک خط، ناپایداری ولتاژ باس‌های دو طرف آن را نتیجه می‌دهد. معیارهای پایداری ولتاژی بر اساس اندازه‌گیری‌های فازور محلی در مراجع [۱۴-۱۲] معرفی شده‌اند. در این مراجع، فازورهای محلی ولتاژ و

شناسایی کرده و سپس بر اساس یک روش تحلیلی در مورد مقدار باری که برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ باید حذف شود، تصمیم‌گیری می‌کند. درحالی‌که روش دوم مستقیماً مقدار باری را که باید از باس‌های بحرانی حذف شود، پیش‌بینی می‌نماید. یک روش بهینه‌سازی خطی برای حذف بار ولتاژی در مرجع [۳۲] در نظر گرفته شده است. در این مرجع، حساسیت درجه اول حاشیه پایداری بار به باری که باید حذف شود در الگوریتم گنجانده شده است. یک مدل پخش بار بهینه برای محاسبه محل، زمان و مقدار باری که جهت حفظ حاشیه پایداری ولتاژ باید حذف شود در مرجع [۳۳] ارائه شده است. حذف بار برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ بلندمدت، بر اساس دامنه ولتاژ باس در مرجع [۳۴] مورد توجه بوده است. یک مقدار آستانه برای دامنه ولتاژ باس در نظر گرفته می‌شود. اگر دامنه ولتاژ یک باس از این مقدار آستانه کم‌تر شود بعد از یک تأخیر زمانی که از محاسبات دینامیکی سیستم به دست می‌آید، مقدار معینی بار حذف می‌شود. این عمل تا بازیابی ولتاژ تمام باس‌های سیستم به مقداری بالاتر از مقدار آستانه تکرار می‌شود. یک روش حذف بار تطبیقی برای بهبود حاشیه پایداری ولتاژ سیستم در مرجع [۳۵] ارائه شده است. در روش مذکور، حذف بار از محل‌هایی که دارای بیشترین افت ولتاژ برای یک مدت طولانی هستند، شروع می‌شود. سرعت، محل و مقدار بار حذف شونده بسته به محل اغتشاش، وضعیت ولتاژ سیستم و میزان افت فرکانس است.

حذف بار در مطالعات پایداری ولتاژ میان‌مدت و بلندمدت می‌تواند بسیار پرهزینه باشد. در این‌گونه موارد تغییر نقطه کار منابع تولیدکننده توان اکتیو و راکتیو و مشارکت بار می‌تواند به‌عنوان راهکارهای دیگر در کنار حذف بار مورد استفاده قرار گرفته و هزینه‌های جلوگیری از ناپایداری ولتاژ را کاهش دهند. گروه دوم از مقالات در این زمینه، این راهکارها را در کنار حذف بار مورد استفاده قرار داده‌اند.

یک طرح حفاظتی برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ بر اساس داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازور در مراجع [۳۶-۳۷] ارائه شده است. شناسایی خطوط بحرانی به‌جای باس‌های بحرانی در این مراجع مورد توجه بوده است. تفاوت توان ظاهری ابتدا و انتهای خط به‌عنوان معیاری برای ناپایداری ولتاژ در نظر گرفته شده است و به‌محض تشخیص شرایط بحرانی، رله مورد نظر یک سیگنال راه‌اندازی به منابع توان راکتیو به‌منظور افزایش تولید آن‌ها ارسال می‌کند. در این مراجع، به‌منظور محاسبه توان ظاهری ابتدا و انتهای خطوط، از فازورهای ولتاژ و جریان حالت دائمی باس‌های ابتدا و انتهای خطوط استفاده شده است. از مزایای روش مورد نظر می‌توان به حجم محاسبات کم و سرعت بالا به‌خاطر محلی بودن معیار پایداری ولتاژ در نظر گرفته برای آن اشاره کرد. در مرجع [۳۸]، برای حفظ پایداری ولتاژ سیستم و افزایش حاشیه پایداری، یک تابع هدف شامل حذف بار، تغییر توان راکتیو و اکتیو منابع تولیدکننده توان با در نظر گرفتن هزینه مربوط به هر مورد در نظر گرفته شده است. قیود مسئله مانند اکثر روش‌های بحث‌شده محدودیت توان انتقالی از

بین این راهکارها، حذف بار به‌عنوان آخرین، ساده‌ترین و البته پرهزینه‌ترین راهکار، بیش‌تر مورد توجه محققان بوده است. بنابراین، مقالات زیادی به ارائه یک حذف بار بهینه به‌منظور حفظ پایداری ولتاژ شبکه پرداخته‌اند.

یک روش حذف بار بهینه برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ در مرجع [۲۲] ارائه شده است. باس‌های کاندیدا برای حذف بار بر اساس حساسیت مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم نسبت به بار حذف‌شونده انتخاب می‌شوند. در این مرجع، برای حل مسئله مفروض از الگوریتم دیفرانسیل تکاملی استفاده شده است. یک روش حذف بار متمرکز با در نظر گرفتن خصوصیات بار در مرجع [۲۳] ارائه شده است. در مرجع مورد نظر ابعاد مسئله بهینه‌سازی با فرض یک معیار مناسب به‌طور چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است. در مرجع [۲۴]، تابع هدف شامل حساسیت مقادیر ویژه نسبت به تغییر توان باس‌ها نیز است که باعث می‌شود مسئله بهینه‌سازی قسمت عمده حذف بار را از بارهای تأثیرگذار در ناپایداری ولتاژ انتخاب نماید. از قیود جدیدی که نسبت به مراجع دیگر در مسئله بهینه‌سازی لحاظ شده می‌توان به در نظر گرفتن ضریب توان ثابت برای بارها اشاره نمود. مسئله مورد نظر بر اساس حاشیه پایداری ولتاژ استاتیک سیستم و حساسیت آن در نقطه حد بارگذاری سیستم مدل شده است. روش ارائه‌شده در مرجع [۲۵] برای حذف بار ولتاژی بهینه، بر اساس مفهوم حاشیه پایداری ولتاژ استاتیک و حساسیت آن در نقطه فروپاشی ولتاژ است. مسئله مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار GAMS و همچنین روش‌های هوشمند ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک حل شده است. یک روش بهینه‌سازی خطی بر اساس معادلات پخش بار (پخش بار بهینه) در مرجع [۲۶] مورد توجه بوده است. در مرجع [۲۷] یک روش حذف بار بهینه به‌منظور بهبود حاشیه پایداری ولتاژ سیستم ارائه شده است. از ویژگی‌های روش مذکور، در نظر گرفتن حساسیت حاشیه پایداری ولتاژ به بار حذف‌شونده و همچنین حذف بار از بارهای با اولویت پایین (بارهای غیرضروری و غیرمهم) می‌باشد. یک روش کاربردی برای محاسبه بهترین محل و حداقل مقدار بار حذف‌شونده برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ در مرجع [۲۸] ارائه شده است. در این مرجع یک روش چندمرحله‌ای برای حذف بار ولتاژی بهینه ارائه شده است. ایده اصلی روش مفروض، حل مرحله به مرحله مسئله و حداقل کردن بار حذف‌شونده در هر مرحله است. یک طرح حذف بار ولتاژی تطبیقی برای مقابله با ناپایداری ولتاژ در مرجع [۲۹] مورد توجه قرار گرفته است. طرح مورد نظر بر اساس دامنه ولتاژ باس‌ها و مقدار تولید توان راکتیو منابع تولیدکننده توان راکتیو است. حداقل مقدار از مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم به‌عنوان یک معیار پایداری ولتاژ در مرجع [۳۰] در نظر گرفته شده و بر اساس بزرگ‌تر شدن این معیار از یک مقدار حدی و همچنین رعایت شدن محدوده دامنه ولتاژ باس‌ها برای مقدار حذف بار تصمیم‌گیری می‌شود. دو روش برای حذف بار ولتاژی بر اساس الگوریتم فازی در مرجع [۳۱] بیان شده است. الگوریتم اول ابتدا محل‌های مناسب برای حذف بار را

کرده است. راهکار مقاله مورد نظر برای در نظر گرفتن عدم قطعیت بسیار ساده و دور از واقعیت است. بنابراین در این مقاله سعی شده است راه حل جامع تر و واقعی تری از مدل کردن عدم قطعیت توربین های باد ارائه گردد.

جدول ۲ راهکارهای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ ارائه شده در مراجع مختلف را با یکدیگر مقایسه نموده و نکات قابل توجه هر مرجع و مزیت روش های ارائه شده را بیان نموده است. مراجع [۳۹] و [۴۰] که در این جدول گنجانده نشده در واقع ایده اصلی شان در نظر گرفتن عدم قطعیت های مؤثر است که تا حدودی قابل مقایسه با بقیه مراجع به علت متفاوت بودن کارشان نیستند.

جدول ۱: مقایسه معیارهای پایداری ولتاژ ارائه شده در مراجع مختلف

مزایا	هدف معیار	داده های مورد نیاز	اساس معیار	مرجع
-	تعیین حاشیه بارگذاری سیستم	نقطه کار سیستم	معادلات پخش بار	[۲-۳]
سرعت	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها	نقطه کار سیستم	کمبود توان راکتیو	[۴]
پاسخ گو بودن در نقاط بحرانی	تعیین حاشیه بارگذاری سیستم	نقطه کار سیستم	معادلات پخش بار	[۵]
-	افزایش حاشیه بارگذاری سیستم	نقطه کار سیستم	بهینه سازی با استفاده از معادلات پخش بار	[۶-۷]
-	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها	توان اکتیو و راکتیو	منحنی های $Q-V$ و $P-V$	[۸]
در نظر گرفتن انواع مدل های بار	تعیین حاشیه پایداری ولتاژ باس ها	توان اکتیو و راکتیو	منحنی های $Q-V$ و $P-V$	[۹]
در نظر گرفتن خاصیت خازنی خطوط	تشخیص پایداری ولتاژ خطوط	توان اکتیو، راکتیو و ماتریس انتقال خطوط	معادلات خط انتقال	[۱۰]
-	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها	فازورهای ولتاژ و جریان	مدار معادل تونن از دید باس	[۱۱]
-	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها	فازورهای ولتاژ و جریان	مدار معادل تونن از دید باس و منحنی $P-V$	[۱۲]
در نظر گرفتن تأثیر سیستم خارجی	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها	فازورهای ولتاژ و جریان	مدار معادل تونن از دید باس	[۱۳]
محاسبه تأثیر هر المان در ناپایداری	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها و محاسبه ضرایب مشارکت	ولتاژ باس ها و ماتریس ادمیتانس شبکه	ماتریس ژاکوبین سیستم	[۱۴]
-	تعیین حداکثر افت ولتاژ مجاز	ولتاژ باس ها و ماتریس ادمیتانس شبکه	ماتریس ژاکوبین سیستم	[۱۵]
-	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها	ماتریس ادمیتانس شبکه	مدار معادل تونن از دید باس	[۱۶]
-	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها	ماتریس امیدانس شبکه	ماتریس ژاکوبین سیستم	[۱۷]
-	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها	فازورهای ولتاژ و جریان	دامنه ولتاژ	[۱۸]
در نظر گرفتن دینامیک موتور القایی	تعیین حاشیه پایداری ولتاژ باس ها	فازورهای ولتاژ و جریان	معادلات دینامیکی موتور القایی	[۱۹]
-	تشخیص پایداری ولتاژ باس ها	فازورهای ولتاژ	فازور ولتاژ باس ها	[۲۰-۲۱]

۳-۱- اهداف و نوآوری مقاله

در این مقاله، ارزیابی کاملی از راهکارهای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ با در نظر گرفتن تغییرات بار و تلفات ارائه می شود. نحوه تغییر هر راهکار با تغییر بارگذاری سیستم در یک محدوده وسیع مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر عوامل مختلف از جمله عدم قطعیت تولید توربین های بادی همبسته به هم، حداقل کردن تلفات، در نظر گرفتن حذف بار اجباری، به عنوان تنها راهکار و مقدار حداکثر مشارکت بارها در حفظ پایداری، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. به طور کلی روش پیشنهادی دارای مزایای زیر است:

خطوط، محدودیت سطح ولتاژ باس های شبکه، معادلات پخش بار بعد از وقوع اختلال و ... است.

عدم قطعیت های زیادی در مطالعات پایداری ولتاژ سیستم های قدرت باید مورد توجه قرار گیرند. از جمله این عدم قطعیت ها می توان به دو عدم قطعیت مهم یعنی عدم قطعیت بار و عدم قطعیت تولید منابع تولید پراکنده اشاره کرد. یک روش برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ سیستم قدرت با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار در مرجع [۳۹] ارائه شده است. یک طرح برای کنترل ولتاژ با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و تولید منابع تولید پراکنده در مرجع [۴۰] ارائه شده است. این طرح بر اساس تولید چند سناریوی مختلف، عدم قطعیت های مورد نظر را مدل

با مراجعه به جدول ۲ می توان مشاهده کرد که ارزیابی روند تغییرات راهکارهای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ با تغییر وضعیت سیستم مورد توجه محققان نبوده و نیاز برای بررسی این روند به منظور تصمیم گیری دقیق تر برای پیشگیری از ناپایداری و همچنین رسیدن به بینش صحیحی از روند حفظ حاشیه پایداری مطلوب سیستم امری ضروری به نظر می رسد. بنابراین در این مقاله ارزیابی کاملی از روند تغییر تمام راهکارهای ارائه شده در مراجع مختلف با تغییر بارگذاری سیستم ارائه شده است. همچنین، مدل سازی جدیدی برای عدم قطعیت تولید توربین های بادی همبسته به هم به صورتی که با واقعیت تطابق داشته باشد، ارائه گشته است.

- ۱- تأثیر عدم قطعیت تولید توربین‌های بادی همبسته به هم در مسئله پایداری ولتاژ برای اولین بار در این مقاله مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که عدم قطعیت مورد نظر در زمینه پایداری ولتاژ به صورتی که در این مقاله مدل سازی و ارزیابی شده است، در هیچ مقاله‌ای مورد بررسی قرار نگرفته است.
- ۲- تأثیر حداقل کردن تلفات بر مقدار بار حذف شونده و دیگر راهکارهای پیشگیرانه به ازای بارگذاری‌های مختلف سیستم مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، در مقالات دیگری که در این زمینه ارائه شده است، تلفات در نظر گرفته نشده است.
- ۳- محدوده وسیعی از تغییرات بار (از ۸۰ درصد نامی تا ۱۷۷/۵ درصد نامی) در این روش لحاظ شده است که می‌تواند اکثر حالات ممکن برای مقدار بار در شبکه قدرت را پوشش دهد.
- ۴- مسئله مفروض بر روی شبکه استاندارد مقیاس بزرگ ۱۱۸ باسه IEEE که به شبکه واقعی نزدیک‌تر است شبیه‌سازی شده است.
- ۵- تأثیر افزایش یا کاهش حداکثر پاسخ‌گویی بارها برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب، در مقدار بار حذف‌شونده و همچنین هزینه حفظ حاشیه پایداری مورد بررسی قرار گرفته است.
- ۶- ضریب توان ثابت برای بارهای حذف‌شونده لحاظ شده تا مسئله مورد نظر واقعی‌تر باشد.

جدول ۲: مقایسه راهکارهای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ ارائه شده در مراجع مختلف

مرجع	عملیات حفاظتی	عملیات کنترلی	نکته قابل توجه	روش بهینه‌سازی	مزایا
[۲۲]	حذف بار	-----	شرکت دادن باس‌های انتخابی در برنامه حذف بار	سیر تکاملی دیفرانسیلی	کاهش حجم مسئله بهینه‌سازی
[۲۳]	حذف بار	-----	-----	HSPPSO	-----
[۲۴-۲۵]	حذف بار	-----	شرکت دادن بارهای تأثیرگذار در برنامه حذف بار	PSO	افزایش سرعت مسئله بهینه‌سازی
[۲۶]	حذف بار	-----	در نظر گرفتن قیمت و حساسیت	-----	-----
[۲۷]	حذف بار	-----	در نظر گرفتن معیار پایداری ولتاژ دقیق‌تر	-----	قطع بار کمتر نسبت به دیگر مراجع
[۲۸-۲۹]	حذف بار	-----	شرکت دادن باس‌های انتخابی در برنامه حذف بار	-----	-----
[۳۰]	حذف بار	-----	روش بهینه‌سازی جدید	Hopfield	در نظر گرفتن یک تابع درجه دوم از بار حذف شونده
[۳۱]	حذف بار	-----	استفاده از الگوریتم فازی	-----	-----
[۳۲]	حذف بار	-----	در نظر گرفتن حساسیت معیار به بار حذف‌شونده	-----	-----
[۳۳]	حذف بار	-----	در نظر گرفتن زمان تأخیر کنترلرها در تابع هدف	-----	-----
[۳۴]	حذف بار	-----	توجه به دامنه ولتاژ باس‌ها	-----	انجام محاسبات دینامیکی
[۳۵]	حذف بار تطبیقی	-----	حفظ پایداری فرکانسی علاوه بر پایداری ولتاژ	-----	توجه پیوسته به وضعیت ولتاژ سیستم
[۳۶]	-----	-----	شناسایی خطوط بحرانی به جای باس‌های بحرانی	-----	حجم محاسبات کم و سرعت بالا
[۳۷]	-----	-----	انتخاب عملیات کنترلی بسته به شرایط	-----	-----
[۳۸]	حذف بار	-----	توجه به بحث هزینه	MINLP (GAMS)	در نظر گرفتن همزمان عملیات حفاظتی و کنترلی

۴-۱- سازمان‌دهی مقاله

سازمان‌دهی مقاله مورد نظر به صورت زیر است:

در بخش ۲ فرمول‌بندی مسئله پایداری ولتاژ ارائه خواهد شد. بخش ۳ نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت تولید توربین‌های بادی همبسته به هم را ارائه می‌دهد. بخش ۴ سیستم شبیه‌سازی مورد نظر را معرفی نموده و بخشی از نتایج شبیه‌سازی در این بخش ارائه می‌شود. تأثیر تلفات و سایر عوامل روی نحوه تغییر هر راهکار پیشگیرانه با تغییر بارگذاری سیستم و همچنین تأثیر آن‌ها روی هزینه حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب در بخش ۵ بررسی می‌شود. و در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۶ ارائه می‌شود.

۲- فرمول‌بندی مسئله پایداری ولتاژ

راهکارهایی که برای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ در این مقاله مدنظر بوده است عبارت‌اند از: حذف بار، تغییر نقطه کار منابع تولیدکننده توان اکتیو و راکتیو و پاسخ‌گویی بار (برای جزییات بیشتر در مورد برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به مراجع [۴۱] و [۴۲] رجوع شود). برای هر راهکار پیشگیرانه هزینه‌ای در نظر گرفته شده و قطع بار به‌عنوان پرهزینه‌ترین راهکار مدنظر بوده است. رابطه (۱) تابع هدف مورد نظر را نشان می‌دهد.

$$Q_{G_i}^- \times Q_{G_i}^+ = 0 \quad i \in G \quad (13)$$

$$\sum_{i \in G} \tilde{P}_{G_i} - (AA * P_{L_b} - DRC_b^P - ILCC_b^P)(1 + \lambda) \quad (14)$$

$$= \sum_{j \in B} \tilde{V}_b \tilde{V}_j |Y_{bj}| \cos(\tilde{\delta}_b - \tilde{\delta}_j - \theta_{bj}) \quad \forall b \in B$$

$$\sum_{i \in G} \tilde{Q}_{G_i} - (AA * Q_{L_b} - DRC_b^Q - ILCC_b^Q)(1 + \lambda) \quad (15)$$

$$= \sum_{j \in B} \tilde{V}_b \tilde{V}_j |Y_{bj}| \sin(\tilde{\delta}_b - \tilde{\delta}_j - \theta_{bj}) \quad \forall b \in B$$

$$\lambda > \lambda_{threshold} \quad (16)$$

$$0 \leq DRC_b^P \leq \alpha_b P_{L_b} \quad (17)$$

$$0 \leq DRC_b^Q \leq \alpha_b Q_{L_b} \quad (18)$$

$$0 \leq ILCC_b^P \leq (1 - \alpha_b - \beta_b) P_{L_b} \quad (19)$$

$$0 \leq ILCC_b^Q \leq (1 - \alpha_b - \beta_b) Q_{L_b} \quad (20)$$

$$\tilde{V}_b^{\min} \leq \tilde{V}_b \leq \tilde{V}_b^{\max} \quad (21)$$

روابط (۲) و (۳) برقراری معادلات پخش بار در تمام باس‌های سیستم با در نظر گرفتن تغییر بار را نشان می‌دهد. AA در این روابط نرخ تغییرات بار را نشان می‌دهد. روابط (۴) و (۵) در نظر گرفتن ضریب توان ثابت برای بار کاهش‌یابنده را نشان می‌دهند. روابط (۶) و (۱۳) نشان می‌دهند که برای یک بار مشخص توان اکتیو یا راکتیو یک منبع توان نمی‌تواند همزمان هم کاهش و هم افزایش یابد. به عبارت دیگر، حداقل یکی از مقادیر توان افزایش‌دهنده یا کاهش‌دهنده باید صفر باشد. روابط (۷) و (۲۱) مربوط به محدودیت ولتاژ باس‌ها در شرایط کار عادی و همچنین در نقطه فروپاشی ولتاژ است. روابط (۸) تا (۱۲) مربوط به محدودیت توان تولیدی یا محدودیت افزایش یا کاهش توان منابع تولیدکننده توان می‌باشد. روابط (۱۴) و (۱۵) برقراری معادلات پخش بار در تمام باس‌های سیستم با در نظر گرفتن تغییر بار در نقطه فروپاشی ولتاژ را نشان می‌دهد. حاشیه پایداری ولتاژ دلخواه نیز توسط رابطه (۱۶) برآورده می‌شود. محدودیت مشارکت بار هر باس در حفظ پایداری ولتاژ و همچنین محدودیت حذف بار اجباری از هر باس با روابط (۱۷) تا (۲۰) ارائه شده است. در این روابط α_b درصد مشارکت بار هر باس در حفظ حاشیه پایداری و β_b بارهای حساس و ضروری که نباید حذف شوند را نشان می‌دهند.

لازم به ذکر است که معیار پایداری ولتاژ لحاظ‌شده در این مسئله λ می‌باشد. که این معیار توسط منحنی P-V باس به صورت فاصله نقطه کار باس موردنظر از حداکثر توان قابل جذب توسط همان باس تعریف می‌شود. در مسئله بهینه‌سازی موردنظر همان‌طور که در بالا اشاره شده، روابط (۲) و (۳) مربوط به نقطه کار و روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) مشخص‌کننده نقطه حداکثر توان قابل جذب و حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب باس موردنظر می‌باشند.

از قیود جدیدی که در این مرجع نسبت به مرجع [۳۸] لحاظ شده است می‌توان به قیود (۴)، (۵)، (۶) و (۱۳) اشاره کرد. قیود (۴) و (۵)

$$F = \sum_{i \in G_F} (CA_i^- P_{G_i}^- + CA_i^+ P_{G_i}^+) + \sum_{i \in G} (CR_i^- Q_{G_i}^- + CR_i^+ Q_{G_i}^+) + \sum_{b \in d} (CC_b^{DR} DRC_b^P + CC_b^{ILC} ILCC_b^P) + COL \sum_{i \in N} P_{loss_i} \quad (1)$$

در این رابطه، $Q_{G_i}^+$ و $Q_{G_i}^-$ ، $P_{G_i}^+$ ، $P_{G_i}^-$ ، CR_i^+ و CR_i^- ، CA_i^+ ، CA_i^- توان اکتیو منابع تولیدکننده توان اکتیو با قابلیت تغییر نقطه کار سریع از نقطه کار بهینه و مقدار کاهش و افزایش توان راکتیو منابع تولیدکننده توان راکتیو از نقطه کار بهینه می‌باشند. CR_i^+ و CR_i^- هزینه‌های مربوط به تغییرات این منابع تولیدکننده توان از نقطه کار بهینه آن‌ها است. $ILCC_b^P$ و DRC_b^P مقدار پاسخ‌گویی بار و همچنین مقدار بار حذف‌شونده از هر باس بوده، CC_b^{ILC} و CC_b^{DR} هزینه‌های مربوط به آن‌ها هستند. $\sum_{i \in N} P_{loss_i}$ نیز مجموع توان حقیقی تلف‌شده در خطوط انتقال شبکه موردنظر و COL هزینه مربوط به آن را نشان می‌دهد. G ، G_F ، N و d به ترتیب نشان‌دهنده باس‌های ژنراتوری، باس‌های دارای ژنراتور با تغییر نقطه کار سریع، شماره باس‌ها و باس‌های بار می‌باشند. پارامتر جدیدی که در این مقاله نسبت به مرجع [۳۸] در تابع هدف لحاظ شده است، تلفات است.

با توجه به اینکه اکثر ناپایداری‌های ولتاژ رخ داده در سیستم قدرت از نوع میان‌مدت و بلندمدت می‌باشند، بهینه کردن تلفات همراه با دیگر راهکارهای پیشگیرانه می‌تواند به بهره‌برداری بهینه و اقتصادی از سیستم قدرت کمک شایانی بکند.

قیودی که در حداقل کردن تابع هدف موردنظر در نظر گرفته شده است عبارت‌اند از:

$$\sum_{i \in G} P_{G_i} - (AA * P_{L_b} - DRC_b^P - ILCC_b^P)(1 + \lambda) \quad (2)$$

$$= \sum_{j \in B} V_b V_j |Y_{bj}| \cos(\delta_b - \delta_j - \theta_{bj}) \quad \forall b \in B$$

$$\sum_{i \in G} Q_{G_i} - (AA * Q_{L_b} - DRC_b^Q - ILCC_b^Q) \quad (3)$$

$$= \sum_{j \in B} V_b V_j |Y_{bj}| \sin(\delta_b - \delta_j - \theta_{bj}) \quad \forall b \in B$$

$$DRC_b^Q = 0.8 * DRC_b^P \quad \forall b \in B \quad (4)$$

$$ILCC_b^Q = 0.8 * ILCC_b^P \quad \forall b \in B \quad (5)$$

$$P_{G_i}^- \times P_{G_i}^+ = 0 \quad i \in G_F \quad (6)$$

$$V_b^{\min} \leq V_b \leq V_b^{\max} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{G_i}^+ \leq RU_{G_i} \times \tau_{CC} \quad i \in G_F \quad (8)$$

$$0 \leq P_{G_i}^- \leq RD_{G_i} \times \tau_{CC} \quad i \in G_F \quad (9)$$

$$P_{G_i} = P_{G_i}^0 + P_{G_i}^+ - P_{G_i}^- \quad i \in G_F \quad (10)$$

$$Q_{G_i} = Q_{G_i}^0 + Q_{G_i}^+ - Q_{G_i}^- \quad i \in G \quad (11)$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \quad i \in G \quad (12)$$

$$\rho_0 = L_0 L_0^T \quad (25)$$

در رابطه بالا L_0 یک ماتریس پایین مثلثی است. در مرحله بعد، بردار U به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$U = L_0^{-1} Y \quad (26)$$

در نهایت، سناریوهای همبسته به هم بر اساس رابطه (۲۷) تولید می‌شوند:

$$S = \mu + U \quad (27)$$

در رابطه (۲۷)، μ و S به ترتیب مقادیر نامی توان نیروگاه‌های بادی و سناریوهای همبسته به هم می‌باشند.

به طور کلی مقدار تولید توربین‌های بادی در نقاط مختلف شبکه متأثر از شرایط جوی در منطقه مورد نظر است. معمولاً توربین‌هایی که در شرایط جوی یکسان یا نزدیک به هم می‌باشند، دارای منحنی تولید توان مشابه در زمان‌های مشخصی هستند. بنابراین هرچقدر شرایط جوی دو منطقه نزدیک به هم باشد، توان تولیدی توربین‌های بادی آن دو منطقه همبستگی بیشتری با یکدیگر دارند. در این مقاله بر اساس مرجع [۴۳] ۶ توربین بادی برای شبکه استاندارد IEEE ۱۱۸ باسه در نظر گرفته شده است. این توربین‌ها در باس‌های ۱۷، ۳۰، ۵۹، ۸۰، ۹۲ و ۱۰۰ قرار گرفته و همبستگی بین آن‌ها بر اساس همین مرجع برای جفت توربین‌های (۱۷ و ۳۰)، (۳۰ و ۵۹) و (۹۲ و ۱۰۰) برابر ۰/۸۸ و برای بقیه ۰/۴۸ در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

مسئله بیان‌شده در بخش ۲ با استفاده از مدل ریاضی کلاسیک و اثبات‌شده NLP در نرم‌افزار GAMS و روی شبکه استاندارد ۱۱۸ باسه IEEE که یک شبکه مقیاس بزرگ بوده و به شبکه واقعی سیستم قدرت نزدیک‌تر است، شبیه‌سازی شده است. این شبکه دارای ۹۹ باس بار و ۱۰ ژنراتور با قابلیت تغییر نقطه کار سریع است. در شبیه‌سازی‌های مورد نظر بار از ۸۰ درصد مقدار نامی تا ۱۷۷/۵ درصد مقدار نامی با پله‌های ۲/۵ درصد بار نامی افزایش پیدا می‌کند. در این مرحله تلفات شبکه در تابع هدف لحاظ نشده است و در بخش تجزیه و تحلیل نتایج در بخش ۵ مورد توجه خواهد بود. هزینه حذف بار، پاسخ‌گویی بار، افزایش توان اکتیو ژنراتورها و کاهش آن‌ها و همچنین افزایش و کاهش توان راکتیو منابع تولیدکننده با توجه به مرجع [۳۸] به ترتیب ۱۰، ۱۰۰، ۱/۲۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵ برابر قیمت بار در هر باس لحاظ شده است (قیمت بار در هر باس ۹ \$/Mwh فرض شده است). هزینه تلفات هم برابر قیمت بار در هر باس در نظر گرفته شده است. مسئله بهینه‌سازی مفروض با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS و با مدل حل شده است و نحوه افزایش هر یک از عملیات پیشگیرانه با توجه به افزایش بار به صورت زیر بوده است.

راهکار حذف بار اجباری به عنوان پرهزینه‌ترین راهکار در مسئله حفظ پایداری و لتاژ لحاظ شده است. به همین دلیل، تا زمانی که مسئله بتواند به کمک راهکارهای دیگر حاشیه پایداری و لتاژ مطلوب را فراهم

که به در نظر گرفتن ضریب توان ثابت برای بار حذف‌شونده اشاره می‌کند می‌تواند به واقعی‌تر شدن نتایج به دست آمده کمک شایانی نماید. همچنین در نظر گرفتن قیود (۶) و (۱۳) در مسئله مفروض غیرقابل اجتناب است. چرا که توان یک نیروگاه در عمل نمی‌تواند همزمان افزایش و کاهش یابد. قیود مربوط به پخش بار نیز به خاطر در نظر گرفتن تغییرات بار در مسئله اصلاح گردیده‌اند.

۳- مدل سازی عدم قطعیت تولید توربین‌های بادی همبسته به هم

برنامه‌ریزی تولید یک نیروگاه بادی به سرعت باد در محل قرارگیری نیروگاه مورد نظر بستگی دارد. سرعت باد یک پارامتر غیرقطعی بوده و متناسب با داده‌های ثبت‌شده قبلی سرعت باد و مدل‌های احتمالاتی می‌باشد. در این مقاله، تغییر سرعت باد مطابق با مراجع [۴۳] با تابع چگالی احتمالی رایلی مدل شده است. تابع چگالی احتمال مورد نظر به صورت زیر است:

$$PDF(v) = \left(\frac{2v}{c}\right) \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \quad (22)$$

از طرفی توان تولیدی توربین بادی بر حسب سرعت باد به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۳]:

$$P_b^w(v) = \begin{cases} 0 & \text{if } v \leq v_{in}^c \text{ or } v \geq v_{out}^c \\ \frac{v - v_{in}^c}{v_{rated}^c - v_{in}^c} P_{b,r}^w & \text{if } v_{in}^c \leq v \leq v_{rated} \\ P_{b,r}^w & \text{else} \end{cases} \quad (23)$$

در این روابط، v_{in}^c ، v_{out}^c ، v_{rated}^c و $P_{b,r}^w$ به ترتیب سرعت برش، سرعت قطع، سرعت و توان نامی توربین باد می‌باشند.

برای تولید سناریوهای همبسته به هم از روش چولوسکی استفاده شده است [۴۴]. بر اساس این روش، ابتدا یک ماتریس همبستگی بین متغیرها تعریف می‌شود. درایه‌های این ماتریس به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\rho_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}\right) \left(\frac{x_j - \mu_j}{\sigma_j}\right) f_{x_i, x_j}(x_i, x_j) dx_i dx_j = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{F_i^{-1}(\phi(y_i)) - \mu_i}{\sigma_i}\right) \left(\frac{F_j^{-1}(\phi(y_j)) - \mu_j}{\sigma_j}\right) \times \phi_2(y_i, y_j, \rho_{0ij}) dy_i dy_j \quad (24)$$

در این رابطه، کمیت‌های مورد استفاده به صورت زیر تعریف می‌شوند:

ρ_{0ij} : درایه سطر i و ستون j ماتریس همبستگی

$\Phi(\cdot)$: تابع چگالی احتمال مورد نظر

$F_i(x_i)$: تابع توزیع تجمعی متناظر

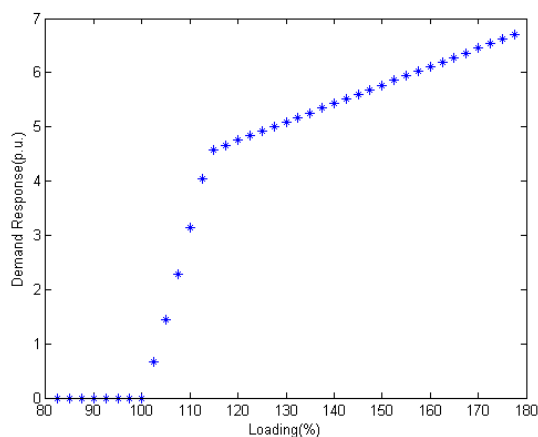
$f_{x_i, x_j}(x_i, x_j)$: تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای تصادفی x_j و x_i

μ_i و μ_j : مقدار متوسط متغیرهای تصادفی x_i و x_j

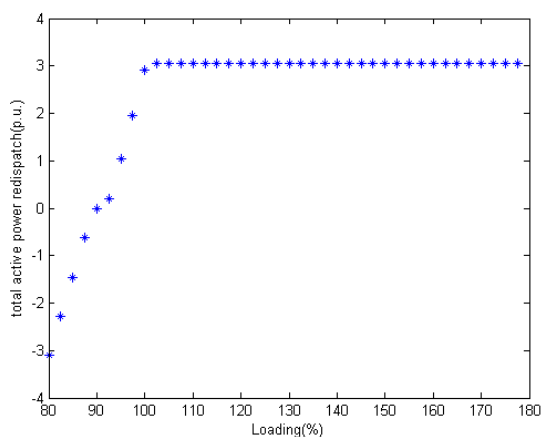
σ_i و σ_j : واریانس متغیرهای تصادفی x_i و x_j

بعد از مشخص شدن ρ_0 ، روش تلفیق چولوسکی می‌تواند به صورت زیر اعمال شود:

تا حاشیه پایداری مطلوب فراهم شود. اما با افزایش از بار نامی توان تولیدی منابع به حداکثر مقدار خود رسیده و از این مرحله به بعد، راهکارهای حذف بار اجباری و مشارکت یا پاسخ‌گویی بار وظیفه حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب را بر عهده می‌گیرند.



شکل ۲: مقدار پاسخ‌گویی بار برحسب پریونیت برای حفظ حاشیه پایداری مطلوب به ازای درصد بارگذاری سیستم

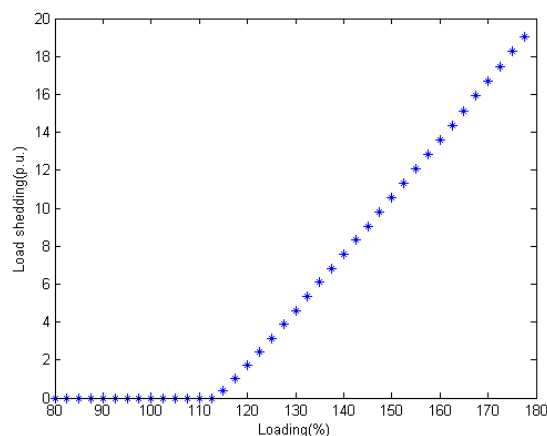


شکل ۳: مقدار تغییر توان اکتیو منابع برحسب پریونیت برای حفظ حاشیه پایداری مطلوب به ازای درصد بارگذاری سیستم

شکل ۴ تغییر نقطه کار منابع تولیدکننده توان راکتیو را از نقطه بهینه کار آن‌ها از لحاظ اقتصادی نشان می‌دهد. این راهکار همان‌طور که شکل ۴ هم نشان می‌دهد روند خاصی را طی نمی‌کند. تا ۱۱۲/۵ درصد بار نامی تغییرات آن نامنظم بوده که به دلیل ارضا شدن قیود پخش بار و سایر قیود فرض شده در مسئله است. اما با افزایش بارگذاری با توجه به شکل ۱، حذف بار اجباری افزایش پیدا کرده و با توجه به در نظر گرفتن ضریب توان ثابت برای بار حذف‌شونده توان راکتیو تولیدی کاهش می‌یابد تا معادلات پخش بار برقرار شود.

به‌منظور اعتباربخشی به نتایج حاصل، جزئیات مقادیر انواع راهکارهای پیشگیرانه برای بارگذاری ۱۱۵ درصد نامی (حداقل بارگذاری که نیاز به حذف بار برای حفظ حاشیه پایداری مطلوب دارد) آورده شده است. جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ این مقادیر را نشان می‌دهد. مقدار افزایش

حذف بار اجباری انجام نخواهد داد. شکل ۱ حذف بار اجباری لازم برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب را برحسب افزایش بار نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، برای بارگذاری سیستم تا ۱۱۲/۵ درصد بار نامی، مسئله موردنظر برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب، حذف باری انجام نمی‌دهد. اما برای بارگذاری بالاتر از ۱۱۲/۵ درصد بار نامی، الگوریتم مجبور به حذف بار اجباری برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب می‌باشد. برای این بخش از نمودار می‌توان یک ضریب حساسیت $0/3$ در نظر گرفت. به عبارت دیگر، برای افزایش بار ۱۰ درصد، باید ۳ پریونیت بیش‌تر بار حذف شود تا حاشیه پایداری ولتاژ سیستم در حد مطلوب باقی بماند.



شکل ۱: مقدار بار حذف‌شونده برحسب پریونیت برای حفظ حاشیه پایداری مطلوب به ازای درصد بارگذاری سیستم

پاسخ‌گویی بار یا مشارکت بار در حفظ پایداری ولتاژ، دومین راهکار پرهزینه بعد از حذف بار اجباری در مسئله مفروض مدنظر قرار گرفته است. در این بخش فرض شده است که حداکثر ۱۰ درصد از بار هر باس با توجه به مرجع [۳۸] در حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب مشارکت می‌کند. شکل ۲ پاسخ‌گویی بار را برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب برحسب افزایش بارگذاری سیستم نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۲، تا بار نامی تغییر نقطه کار منابع تولیدکننده توان حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب را فراهم می‌کنند. اما با افزایش بارگذاری سیستم، بارهای سیستم قدرت برای حفظ پایداری ولتاژ سیستم مشارکت می‌کنند. ابتدا روند این مشارکت نرخ افزایشی شدید دارد اما با نزدیک شدن آن به محدودیت پاسخ‌گویی بار هر باس در حفظ پایداری، نرخ افزایش روند نزولی پیدا می‌کند.

تغییر نقطه کار منابع تولیدکننده توان برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب به‌عنوان کم‌هزینه‌ترین راهکار مدنظر بوده است. بنابراین تا جایی که امکان داشته باشد مسئله موردنظر سعی خواهد کرد با تغییر نقطه کار مذکور حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب را فراهم آورد، بدون آنکه نیاز به راهکارهای دیگر باشد. شکل ۳ تغییر نقطه کار منابع تولیدکننده توان اکتیو را از نقطه بهینه کار آن‌ها از لحاظ اقتصادی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تا بارگذاری نامی توان تولیدی منابع افزایش می‌یابد

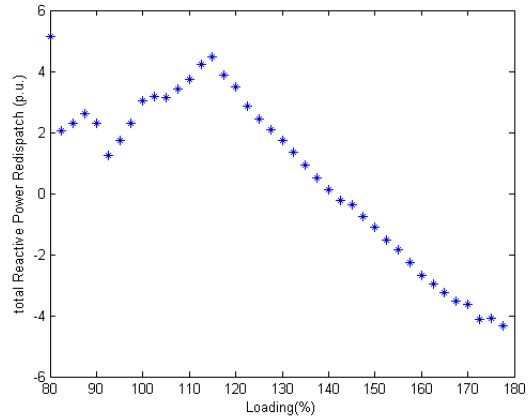
۵- تجزیه و تحلیل نتایج

در این بخش تأثیر عوامل مختلف از جمله حداقل کردن تلفات، مقدار مشارکت بار در حفظ پایداری ولتاژ و ... روی نحوه تغییر راهکارهای موردنظر با افزایش بارگذاری سیستم موردبررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۱- در نظر گرفتن تلفات شبکه در تابع هدف

در این بخش تلفات شبکه نیز در تابع هدف لحاظ شده و هزینه تلفات برابر با هزینه بار مصرفی در تابع هدف گنجانده شده است. با افزایش مصرف، تلفات نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین پیش‌بینی می‌شود مسئله مفروض با در نظر گرفتن تلفات، بار بیش‌تری را نسبت به حالتی که تلفات در تابع هدف لحاظ نشده قطع نماید. جدول ۷ حذف بار اجباری موردنیاز جهت حفظ حاشیه پایداری مطلوب در بارگذاری‌های مختلف سیستم را در دو حالت با در نظر گرفتن تلفات در تابع هدف و بدون در نظر گرفتن آن نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول، در نظر گرفتن تلفات در تابع هدف باعث حذف بار اجباری بیش‌تر به ازای بارگذاری‌های یکسان شده و همچنین لحظه شروع حذف بار زودتر اتفاق می‌افتد.

توان اکتیو در این حالت به حداکثر مقدار مجاز خود با توجه به قیود مسئله رسیده است (برای ژنراتورهای ۱ تا ۶ و ۸ برابر ۰/۳ پریونیت، برای ژنراتور ۷، ۰/۴ پریونیت و برای ژنراتورهای ۹ و ۱۰ به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۲ پریونیت).



شکل ۴: مقدار تغییر توان راکتیو منابع برحسب پریونیت برای حفظ حاشیه پایداری مطلوب به ازای درصد بارگذاری سیستم

جدول ۳: مقدار بار اکتیو حذف شونده از باس‌های مختلف

شماره بار	بار ۱	بار ۱	بار ۱۸	بار ۱۹	بار ۲۴	بار ۲۵	بار ۲۶
مقدار بار حذف‌شونده	۰/۱۷۷۰۴۱	۰/۰۰۱۵۷۱	۰/۰۰۲۶۶۴	۰/۰۰۲۳۶۹	۰/۰۴۳۲	۰/۰۰۳۴۳۵	۰/۰۴۷۴۴۱
شماره بار	۳۳	۴۵	۴۶	۴۹	۵۰	۹۸	
مقدار بار حذف‌شونده	۰/۰۰۱۱۴	۰/۰۱۸۵۶۹	۰/۰۳۵۹۴۹	۰/۰۰۶۱۱۶	۰/۰۱۲۷۴۹	۰/۰۰۰۳۹۹	

جدول ۴: مقدار کاهش توان راکتیو ژنراتورهای مختلف

شماره ژنراتور	ژنراتور ۲	ژنراتور ۶	ژنراتور ۸	ژنراتور ۲۳	ژنراتور ۲۴	ژنراتور ۳۴	ژنراتور ۳۷
کاهش توان راکتیو	۰/۱۱۱۹۲	۰/۷۸۰۸۶۸	۰/۶۸۳۹۲۳	۰/۴۳۳۵۵۵	۰/۰۵۷۰۰۵	۰/۰۱۳۵۳۲	۰/۰۵۷۷۷۷
شماره ژنراتور	۴۴	ژنراتور ۴۶					
کاهش توان راکتیو	۰/۰۴۸۳۶۴	۰/۰۱۶۸					

جدول ۵: مقدار پاسخ‌گویی بار اکتیو در باس‌های مختلف

شماره بار	بار ۱	بار ۲	بار ۸	بار ۱۰	بار ۱۱	بار ۱۲	بار ۱۳
مقدار پاسخ‌گویی بار	۰/۰۴۹۹۸	۰/۰۱۹۶	۰/۰۶۸۶	۰/۰۳۳۳۲	۰/۰۱۳۷۲	۰/۰۸۸۲	۰/۰۲۴۵
شماره بار	۱۴	بار ۱۵	بار ۱۶	بار ۱۷	بار ۱۸	بار ۲۲	بار ۲۳
مقدار پاسخ‌گویی بار	۰/۰۰۲۳۵	۰/۰۵۸۸	۰/۰۴۴۱	۰/۰۱۵۸۲۷	۰/۰۰۳۵۶۶	۰/۰۰۰۸۳۲	۰/۰۰۷۰۴۴
شماره بار	۲۴	بار ۲۵	بار ۲۶	بار ۲۷	بار ۳۱	بار ۳۲	بار ۳۳
مقدار پاسخ‌گویی بار	۰/۰۲۳۵۲	۰/۰۳۹۸۸۵	۰/۰۰۲۵۸۲	۰/۰۱۲۸۴۲	۰/۰۱۴۰۸۳	۰/۰۶۴۶۸	۰/۰۳۶۲۶
شماره بار	۵۰	بار ۹۵	بار ۹۶	بار ۹۸			
مقدار پاسخ‌گویی بار	۰/۰۱۱۷۶	۰/۰۰۰۸۵۸	۰/۰۰۳۸۹۵	۰/۰۱۹۶			

جدول ۶: مقدار افزایش توان راکتیو ژنراتورهای مختلف

شماره ژنراتور	ژنراتور ۵	ژنراتور ۹	ژنراتور ۱۱	ژنراتور ۱۲	ژنراتور ۱۴	ژنراتور ۱۷	ژنراتور ۱۸
افزایش توان راکتیو	۱/۹۳۲۱	۰/۰۲۶۲۹	۰/۰۴۹۶۹۴	۱/۶۱۱۴۸۲	۰/۷۲۹۸۸۳	۰/۰۲۳۷۴۸	۰/۰۹۷۱۴۶
شماره ژنراتور	ژنراتور ۲۲	ژنراتور ۲۸	ژنراتور ۲۹	ژنراتور ۳۰	ژنراتور ۳۱	ژنراتور ۳۲	ژنراتور ۳۸
افزایش توان راکتیو	۰/۴۳۲۱۷	۰/۲۸۳۱۱	۰/۰۵۱۶۳۸	۰/۱۲۲۸۳۵	۰/۶۰۵۴۷۸	۰/۱۵۱۳۸	۰/۰۷۶۳۴۶
شماره ژنراتور	ژنراتور ۳۹	ژنراتور ۴۰	ژنراتور ۴۲	ژنراتور ۴۳	ژنراتور ۴۷	ژنراتور ۴۸	ژنراتور ۴۹
افزایش توان راکتیو	۰/۱۰۶۳۷	۰/۰۹۲۷۶۶	۰/۰۰۲۲۲۴	۰/۰۰۲۱۱۵	۰/۰۱۹۰۰۴	۰/۰۲۱۸۵۶	۰/۱۵۵۸۲۳
شماره ژنراتور	ژنراتور ۵۱	ژنراتور ۵۲					
افزایش توان راکتیو	۰/۰۹۲۰۴	۰/۰۰۴۵۲۱					

جدول ۷: حذف بار اجباری در بارگذاریهای مختلف با در نظر گرفتن

تلفات در تابع هدف و بدون در نظر گرفتن آن

درصد بارگذاری سیستم	حذف بار با در نظر گرفتن تلفات (p.u.)	حذف بار بدون در نظر گرفتن تلفات (p.u.)
۱۰۰	۰/۳۷	۰
۱۱۰	۱/۰۵	۰
۱۲۰	۳/۳۵	۱/۷۳
۱۳۰	۶/۲۷	۴/۶۱
۱۴۰	۹/۲۵	۷/۵۷
۱۵۰	۱۲/۲۶	۱۰/۵۷
۱۶۰	۱۵/۱۶	۱۳/۶۱
۱۷۰	۱۸/۱۳	۱۶/۶۹

۵-۲- در نظر گرفتن حذف بار اجباری به عنوان تنها راهکار

اگر حذف بار اجباری به عنوان تنها راهکار جهت جلوگیری از ناپایداری ولتاژ و حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب در نظر گرفته شود، مطمئناً سیستم مجبور به حذف بار بیش تر نسبت به حالتی خواهد شد که دیگر راهکارها نیز مدنظر قرار گیرند. جدول ۸ افزایش شدید حذف بار اجباری در حالتی که حذف بار به عنوان تنها راهکار مدنظر بوده نسبت به حالتی که تمام راهکارهای مذکور لحاظ شده است را نشان می دهد. بنابراین با توجه به این که حذف بار به عنوان پرهزینه ترین راهکار در تابع هدف لحاظ شده است، هزینه حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مورد نظر به طور چشم گیری افزایش پیدا می کند. همچنین، در این حالت حذف بار در بارگذاری های خیلی پایین شروع می شود (۸۰ درصد بار نامی با توجه به جدول ۸). درحالی که اگر از تمام راهکارها برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب استفاده شود تا ۱۱۲/۵ درصد بار نامی نیازی به حذف بار اجباری برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب نمی باشد.

هزینه راهکارهای پیشگیرانه در جدول ۸ به شرح زیر محاسبه شده است:

$$= \text{هزینه راهکارهای پیشگیرانه با در نظر گرفتن تمام راهکارها} \\ + \text{افزایش توان اکتیو و راکتیو منابع} \times \text{قیمت فرض شده برای آن ها} \\ + \text{کاهش توان اکتیو و راکتیو منابع} \times \text{قیمت فرض شده برای آن ها} \\ + \text{مقدار پاسخ گویی بار} \times \text{قیمت فرض شده برای آن}$$

مقدار حذف بار \times قیمت فرض شده برای آن +

= هزینه راهکارهای پیشگیرانه با فرض حذف بار به عنوان تنها راهکار

مقدار حذف بار \times قیمت فرض شده برای آن

جدول ۸: حذف بار اجباری در بارگذاریهای مختلف با در نظر گرفتن

حذف بار به عنوان تنها راهکار و با در نظر گرفتن تمام راهکارهای

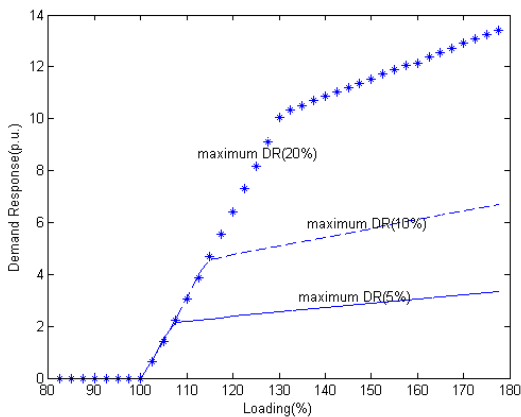
پیشگیرانه

درصد بارگذاری سیستم	مقدار حذف بار با فرض حذف بار به عنوان تنها راهکار (p.u.)	مقدار حذف بار با فرض حذف تمام راهکارها (p.u.)	هزینه راهکارهای پیشگیرانه با فرض حذف تنها راهکار	هزینه راهکارهای پیشگیرانه با فرض حذف تمام راهکارها
۸۰	۰/۲۹	۰	۲۵۹۴۶/۰۴	۱۶۱۷/۷۷
۹۰	۲/۴۹	۰	۲۳۴۲۰/۷۵	۵۲۶/۴۱
۱۰۰	۵/۷۶	۰	۵۱۸۶۷۷/۳	۳۸۲۴/۶۳
۱۱۰	۹/۱	۰	۸۱۸۶۸۲/۴	۳۲۵۰۸/۱۱
۱۲۰	۱۲/۵۱	۱/۷۳	۱۱۲۶۲۹۹	۲۰۲۵۸۶/۴
۱۳۰	۱۵/۹۹	۴/۶۱	۱۴۳۹۴۷۴	۴۶۵۲۸۱/۷

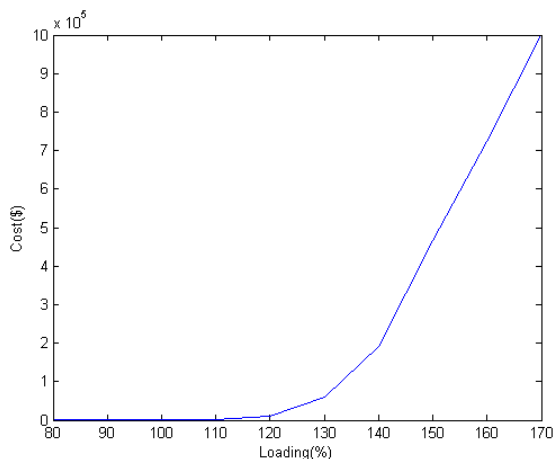
۵-۳- تأثیر تغییر میزان پاسخ گویی بارها

افزایش میزان پاسخ گویی بارها در حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب باعث کاهش حذف بار اجباری به ازای یک بارگذاری معین خواهد شد. در این بخش، حداکثر میزان پاسخ گویی بارها در حفظ پایداری از ۱۰ درصد بار هر یک بار به ۲۰ درصد افزایش و در تحلیل دوم به ۵ درصد کاهش پیدا می کند. نتایج حاکی از ثابت بودن روند تغییرات توان تولیدی منابع تولیدکننده توان اکتیو با وجود تغییر محدودیت حداکثر مشارکت بارها در حفظ پایداری دارد. دلیل این امر، کم بودن هزینه تغییر توان منابع در مقایسه با هزینه مشارکت بارها است. بنابراین مسئله مورد نظر باز تغییر توان منابع را به عنوان با اولویت ترین راهکار مدنظر قرار می دهد. برای حالت اول، پاسخ گویی بارها برای حفظ پایداری ولتاژ مانند حالت های قبلی به ازای بارگذاری های سیستم بیش تر از بار نامی شروع می شود. درحالی که حذف بار اجباری تا بارگذاری سیستم ۱۲۷/۵ درصد نامی به تأخیر می افتد. در نتیجه هزینه راهکارهای پیشگیرانه شدیداً

با افزایش بارگذاری سیستم، هزینه راهکارهای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۶: مقدار پاسخ‌گویی بار برحسب پریونیت به ازای بارگذاری‌های مختلف برای محدودیت حداکثر پاسخ‌گویی‌های متفاوت بارها



شکل ۷: هزینه برحسب دلار به ازای بارگذاری‌های مختلف برای توربین‌های با تولید نامی

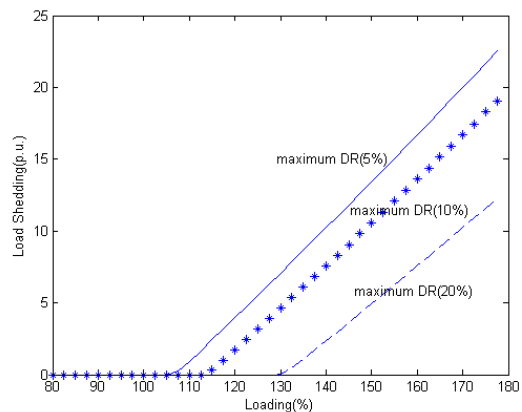
شکل ۸ حذف بار سیستم را با افزایش بارگذاری سیستم نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، حذف بار سیستم تا بارگذاری ۱۲۰ درصد نامی به تعویق می‌افتد. به عبارت بهتر، سیستم تا بارگذاری ۱۲۰ درصد نامی از طریق راهکارهای ارزان‌تر یعنی تغییر نقطه کار منابع تولیدکننده توان اکتیو و راکتیو و پاسخ‌گویی بار قادر به حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب سیستم است.

حالت دوم: سناریوهای تصادفی بر اساس توزیع رابلی برای توربین‌های بادی

در این بخش برای تولید سناریوهای مختلف میزان تولید توربین‌های بادی مفروض از توزیع رابلی استفاده شده است. سناریوهای به صورت تصادفی ایجاد شده است. شکل ۹ هزینه راهکارهای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ را بر اساس افزایش بارگذاری سیستم در این حالت نشان می‌دهد. در این شکل مقدار هزینه در یک بارگذاری مشخص میانگین ۲۰

کاهش پیدا می‌کند. برای حالت دوم، برعکس این حالت اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، در این حالت حذف بار اجباری از بارگذاری سیستم ۱۰۷/۵ درصد نامی شروع می‌شود که باعث افزایش هزینه‌های حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب سیستم می‌شود. شکل‌های ۵ و ۶ نحوه تغییرات پاسخ‌گویی بارها و حذف بار اجباری را برحسب بارگذاری سیستم به ازای محدودیت حداکثر پاسخ‌گویی بارها برابر ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان دریافت که با افزایش پاسخ‌گویی بارها، حذف بار اجباری شدیداً کاهش می‌یابد به طوری که برای پاسخ‌گویی بار برابر ۳۰ درصد مقدار حذف بار برای محدوده بارگذاری موردنظر به صفر می‌رسد. پس می‌توان نتیجه گرفت که اگر پاسخ‌گویی بارها به میزان قابل توجه در حفظ پایداری ولتاژ افزایش یابد حذف بار اجباری برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب به حداقل مقدار خواهد رسید.



شکل ۸: مقدار حذف بار اجباری برحسب پریونیت به ازای بارگذاری‌های مختلف برای محدودیت حداکثر پاسخ‌گویی‌های متفاوت بارها

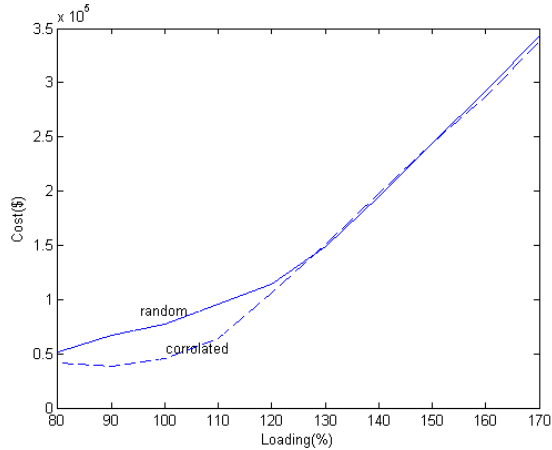
۵-۴- تأثیر عدم قطعیت تولید توربین‌های بادی همبسته به هم

برای ارزیابی عدم قطعیت تولید توربین‌های بادی همبسته به هم سه حالت موردبررسی قرار می‌گیرد. این حالت‌ها عبارت‌اند از: حالت اول: فرض تولید نامی برای توربین‌های بادی حالت دوم: سناریوهای مشخص با تولید تصادفی بر اساس توزیع رابلی حالت سوم: سناریوهای مشخص با تولیدهای همبسته به هم بر اساس ماتریس همبستگی

حالت اول: تولید نامی برای توربین‌های بادی

هدف از منابع تولید پراکنده، تولید توان اکتیو است. بنابراین در این مقاله فرض شده است که توربین‌های باد فقط توان اکتیو تولید می‌کنند. در حالت موردبررسی در این بخش فرض می‌شود توربین‌های بادی توان نامی خود را تولید می‌کنند (هرکدام ۲۵ مگاوات بر اساس مرجع [۴۳]). شکل ۷ هزینه راهکارهای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ را بر اساس افزایش بارگذاری سیستم نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد،

میانگین ۲۰ سناریوی مختلف می‌باشد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد هزینه در دو حالت سناریوهای تصادفی و همبسته به هم نزدیک هم می‌باشند. در حالت سناریوهای همبسته به هم، هزینه‌ها به‌طور ناچیزی پایین‌تر بوده که دلیل آن ضرایب همبستگی زیاد تولید توربین‌های باد در این حالت و در نتیجه افزایش تولید توربین‌ها است.

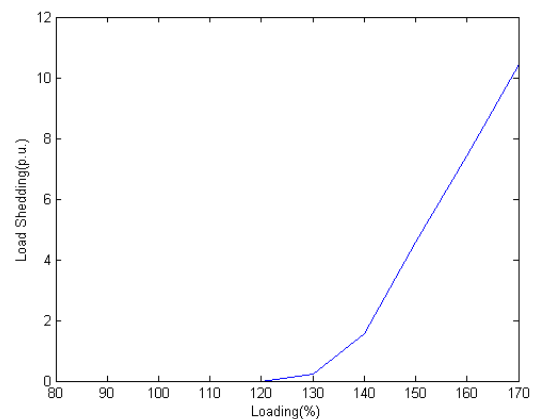


شکل ۱۰: هزینه بر حسب دلار به ازای بارگذاری‌های مختلف برای سناریوهای همبسته به هم توربین‌های بادی

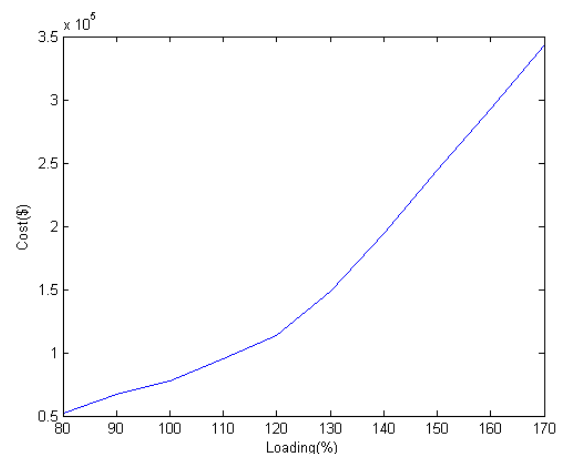
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی نوین برای ارزیابی کامل راهکارهای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب سیستم قدرت ارائه شد. روش موردنظر محدوده وسیعی برای تغییر بارگذاری سیستم در نظر گرفته و نحوه تغییر هر یک از راهکارها را که شامل تغییر نقطه کار منابع توان اکتیو، راکتیو، پاسخ‌گویی و حذف بار می‌باشد، مورد ارزیابی قرار داده است. حذف بار اجباری به‌عنوان پرهزینه‌ترین راهکار مدنظر بوده است. بنابراین همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد مسئله مفروض سعی می‌کند، حتی‌الامکان به کمک راهکارهای دیگر و بدون حذف بار یا با حذف کم‌ترین بار ممکن حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب فراهم کند. مقایسه نتایج مسئله مفروض با حالتی که فقط از راهکار حذف بار اجباری برای حفظ حاشیه پایداری مطلوب استفاده شود، حاکی از حذف بار بسیار کم‌تر در این حالت دارد. همچنین، افزایش پاسخ‌گویی بارها برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب می‌تواند حذف بار اجباری را کاهش داده و حتی باعث حفظ حاشیه پایداری مطلوب بدون حذف بار شود. همچنین روش جدیدی برای مدل کردن عدم قطعیت تولید توربین‌های بادی همبسته به هم، ارائه شده و نتایج آن با تولید تصادفی توربین‌ها بر اساس توزیع رایلی مقایسه شده است. نتایج حاکی از هزینه کم‌تر راهکارهای حفظ حاشیه پایداری مطلوب در حالت تولید توربین‌های بادی همبسته به هم (شرایط نزدیک به واقعیت) است. حداقل کردن تلفات نیز در این مقاله مدنظر بوده و از آن‌جا که تلفات با افزایش بار مصرفی افزایش می‌یابد با در نظر گرفتن آن، مسئله مفروض با توجه به نتایج، بار بیش‌تری را به ازای یک بارگذاری معین سیستم حذف خواهد نمود.

سناریوی مختلف می‌باشد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، هزینه راهکارهای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب سیستم در مقایسه با حالت اول افزایش می‌یابد. این افزایش هزینه به دو دلیل رخ می‌دهد. اولاً مقدار تولید توربین‌های بادی در اکثر سناریوها با توجه به رابطه (۲۳) کم‌تر از مقدار نامی می‌باشد. بنابراین مقدار توان اکتیو تولیدی سیستم نسبت به حالت اول کاهش یافته و مقدار تغییر نقاط منابع تولیدکننده توان اکتیو، راکتیو، پاسخ‌گویی و حذف بار افزایش می‌یابد. ثانیاً به ازای هر بارگذاری مشخص، حداقل یک سناریوی مشخص وجود دارد که برای حفظ حاشیه پایداری مطلوب سیستم نیاز به حذف بار است که این امر میانگین هزینه راهکارهای پیشگیرانه را افزایش می‌دهد.



شکل ۸: مقدار حذف بار بر حسب پریونیت به ازای بارگذاری‌های مختلف برای توربین‌های با تولید نامی



شکل ۹: هزینه بر حسب دلار به ازای بارگذاری‌های مختلف برای سناریوهای تصادفی تولید توربین‌های بادی

حالت سوم: سناریوهای همبسته به هم برای توربین‌های بادی

در این بخش سناریوهای همبسته به هم برای مقدار تولید توربین‌های بادی از روشی که در بخش ۳ مقاله آورده شده، ایجاد شده‌اند. شکل ۱۰ هزینه راهکارهای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ را بر اساس افزایش بارگذاری سیستم در این حالت و حالت دوم نشان می‌دهد. برای سناریوهای همبسته به هم، نیز مقدار هزینه در یک بارگذاری مشخص

مراجع

- Transmission, Distribution and Energy Conversion*, pp. 1-6, 2012.
- [17] A. Teshome, and E. Esiyok, "Distance to voltage collapse through second-order eigenvalue sensitivity technique," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 17, no. 6, pp. 425-431, 1995.
- [18] J. H. Liu, and C. C. Chu, "Wide-area measurement-based voltage stability indicators by modified coupled single-port models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 756-764, 2014.
- [19] R. Sodhi, S. C. Srivastava, and S. N. Singh, "A simple scheme for wide area detection of impending voltage instability," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 818-827, 2012.
- [20] W. Gu, and Q. Wan, "Linearized voltage stability index for wide-area voltage monitoring and control," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 333-336, 2010.
- [21] K. J. Makasa, and G. K. Venayagamoorthy, "On-line voltage stability load index estimation based on PMU measurements," *IEEE PRESS in Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, 2011.
- [22] L. D. Arya, P. Singh, and L. S. Titare, "Differential evolution applied for anticipatory load shedding with voltage stability considerations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 644-652, 2012.
- [23] J. Deng, and J. Liu, "A study on a centralized under-voltage load shedding scheme considering the load characteristics," *International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering*, pp. 481-489, 2012.
- [24] N. Sadati, T. Amraee, and A. M. Ranjbar, "A global particle swarm-based-simulated annealing optimization technique for under-voltage load shedding problem," *Applied Soft Computing*, vol. 9, no. 2, pp. 652-657, 2009.
- [25] T. Amraee, A. M. Ranjbar, B. Mozafari, and N. Sadati, "An enhanced under-voltage load-shedding scheme to provide voltage stability," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 8, pp. 1038-1046, 2007.
- [26] X. Fu, and X. Wang, "Determination of load shedding to provide voltage stability," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 515-521, 2011.
- [27] L. D. Arya, P. Singh, and L. S. Titare, "Optimum load shedding based on sensitivity to enhance static voltage stability using DE," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 6, pp. 25-38, 2012.
- [28] Y. Wang, I. R. Pordanjani, W. Li, W. Xu, and E. Vaahedi, "Strategy to minimise the load shedding amount for voltage collapse prevention," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, no. 3, pp. 307-313, 2011.
- [29] T. Amraee, A. M. Ranjbar, and R. Feuillet, "Adaptive under-voltage load shedding scheme using model predictive control," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1507-1513, 2011.
- [30] L. D. Arya, V. S. Pande, and D. P. Kothari, "A technique for load-shedding based on voltage stability consideration," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 27, no. 7, pp. 506-517, 2005.
- [31] J. Sasikala, and M. Ramaswamy, "Fuzzy based load shedding strategies for avoiding voltage collapse," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 3, pp. 3179-3185, 2011.
- [32] F. M. Echavarren, E. Lobato, and L. Rouco, "A corrective load shedding scheme to mitigate voltage collapse," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 58-64, 2006.
- [33] D. Chattopadhyay, and B. B. Chakrabarti, "A preventive/corrective model for voltage stability incorporating dynamic load-shedding," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 17, no. 6, pp. 425-431, 1995.
- [1] *IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms & Definitions*, Editor: Prabha Kundur, 2002.
- [2] A. Pama, and G. Radman, "A new approach for estimating voltage collapse point based on quadratic approximation of PV-curves," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 4, pp. 653-659, 2009.
- [۳] فرید کربلایی، شهریار عباسی و حسین صابری، «محاسبه سریع و دقیق حاشیه پایداری ولتاژ با تقریب منحنی PV»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۳، صفحات ۳۳-۴۰، ۱۳۹۳.
- [۴] فرهاد نامداری، لیلیا حاتموند و نادر شجاعی، «حفاظت ناحیه گسترده به منظور پیشگیری از فروپاشی ولتاژ به کمک یک شاخص ترکیبی به هنگام جدید»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۳، صفحات ۴۱-۵۱، ۱۳۹۳.
- [5] S. G. Ghiocel, and J. H. Chow, "A power flow method using a new bus type for computing steady-state voltage stability margin," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 958-965, 2014.
- [6] M. F. Echavarren, E. Lobato, L. Rouco, and T. Gómez, "Formulation, computation and improvement of steady state security margins in power systems. part I: theoretical framework," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 340-346, 2011.
- [7] O. O. Obadina, and G. J. Berg, "Determination of voltage stability limit in multimachine power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 1545-1554, 1988.
- [8] X. Fu, and X. Wang, "Unified preventive control approach considering voltage instability and thermal overload," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 1, no. 6, pp. 864-871, 2007.
- [9] Ch. Y. Lee, S. H. Tsai, and Y. K. Wu, "A new approach to the assessment of steady-state voltage stability margins using the P-Q-V curve," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 10, pp. 1091-1098, 2010.
- [10] K. Ramalingam, and C. S. Indulkar, "Determination of steady state voltage stability limit using PQ curves for voltage sensitive loads," *International Conference of Power System Technology*, pp. 1-5, 2008.
- [11] R. Tiwari, K. R. Niazi, and V. Gupta, "Line collapse proximity index for prediction of voltage collapse in power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 41, no. 1, pp. 105-111, 2012.
- [12] S. Corsi, and G. N. Taranto, "A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1271-1279, 2008.
- [13] M. Parniani, and M. Vanouni, "A fast local index for online estimation of closeness to loadability limit," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 584-585, 2010.
- [14] Y. Wang, W. Li, and J. Lu, "A new node voltage stability index based on local voltage phasors," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 1, pp. 265-271, 2009.
- [15] D. H. A. Lee, "Voltage stability assessment using equivalent nodal analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 454-463, 2016.
- [16] S. S. Damodhar, and S. Krishna, "Comparison of participation factor method and selective eigenvalue computation for voltage stability analysis," *8th Mediterranean Conference on Power Generation*,

- Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 755-758, 2008.
- [40] A. Rabiee, A. Soroudi, B. Mohammadi-Ivatloo, and M. Parniani, "Corrective voltage control scheme considering demand response and stochastic wind power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 2965-2973, 2014.
- [41] H. R. Arasteh, M. Parsa Moghaddam, M. K. Sheikh-El-Eslami, and M. Shafie-Khah, "Bidding strategy in demand response exchange market," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 10, no. 2, pp. 1-9, Fall & Winter 2013.
- [۴۲] میثم خجسته و شهرام جدید، «مدل پاسخ بار الکتریکی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی»، *مجله انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران*، جلد ۱۲، شماره ۱، صفحات ۱۳-۲۱، ۱۳۹۴.
- [43] C. S. Saunders, "Point estimate method addressing correlated wind power for probabilistic optimal power flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 1045-1054, 2014.
- [44] H. Li, L. Zhen Zhou, and X. Yuan, "Nataf transformation based point estimate method," *Chinese Science Bulletin*, vol. 53, no. 17, pp. 2586-2592, 2008.
- of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 25, no. 5, pp. 363-376, 2003.
- [34] B. Otomega, M. Glavic, and T. V. Cutsem, "Distributed undervoltage load shedding," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, 2007.
- [35] A. Saffarian, and M. Sanaye-Pasand, "Enhancement of power system stability using adaptive combinational load shedding methods," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1010-1020, 2011.
- [36] G. Verbic, and F. Gubina, "A new concept of protection against voltage collapse based on local phasors," *International Conference on Power System Technology*, pp. 965-970, 2000.
- [37] I. Šmon, M. Pantoš, and F. Gubina, "An improved voltage-collapse protection algorithm based on local phasors," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 3, pp. 434-440, 2008.
- [38] A. Rabiee, M. Parvania, M. Vanouni, M. Parniani, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Comprehensive control framework for ensuring loading margin of power systems considering demand-side participation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 12, pp. 1189-1201, 2012.
- [39] W. Dai, and N. Xiong, "A voltage stability evaluation method for electrical system with load uncertainty," *International*