جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده با در نظر گرفتن ادوات FACTS و عدم قطعیت بار با استفاده از الگوریتم ترکیبی سینوس-کسینوس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (HSCA-PSO)

احسان قناعتی[۱و۳]، حسن براتی*[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، واحدزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، eh_san2000@yahoo.com

۲- دانشیار گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، barati216@gmail.com

۳- کارشناس شرکت سهامی برق منطقه‌ای خوزستان، اهواز، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۰/۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۱

چکیده: استفاده از تولید پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع الکتریکی، فوائد زیادی را به همراه دارد و بنابراین، جایابی و تعیین اندازه این واحدها اهمیت می‌یابد. اغلب تحقیقات در این حوزه از تاثیر شبکه انتقال بر بخش توزیع چشم‌پوشی می‌کنند. همچنین این تحقیقات تاثیر سیستم انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر (FACTS) را نیز نادیده می‌گیرند. این مقاله روشی جدید برای جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده با درنظر گرفتن ادوات FACTS ارائه داده است. در این روش، از مدل معادل تونن برای مدلسازی بخش انتقال شامل ادوات FACTS استفاده شده و نتایج آن با مدل‌های شبکه یکپارچه انتقال-توزیع و شین اسلک مقایسه خواهد شد. برای این منظور، از خازن سری کنترل‌شونده با تریستور (TCSC) و جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو (SVC) استفاده خواهد شد. و عدم قطعیت بار الکتریکی توسط روش درخت سناریو در نظر گرفته می‌شود. مسئله بهینه‌سازی به صورت حداقل‌سازی یک تابع هدف ترکیبی تعریف می‌شود که شامل شاخص‌های تلفات توان، انحراف ولتاژ و پایداری ولتاژ می‌باشد. مسئله بهینه‌سازی توسط الگوریتم ترکیبی سینوس-کسینوس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (HSCA-PSO) حل می‌شود. شبیه‌سازی بر روی شبکه تست انتقال-توزیع ۹ شینه و ۱۶ شینه IEEE در نرم‌افزار MATLAB انجام می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از FACTS در بخش انتقال و DG در بخش توزیع هر دو موجب کاهش تابع هدف و در نتیجه بهبود کارایی شبکه از منظر شاخص‌های تلفات، انحراف ولتاژ و پایداری ولتاژ می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که مدل معادل تونن در مقایسه با مدل شین اسلک، عملکرد بهتری در مدلسازی بخش انتقال و ادوات FACTS دارد. همچنین نتایج نشان‌گر این است که عدم قطعیت‌ها موجب افزایش ظرفیت نصب شده واحدهای DG شده و بنابراین صرف نظر کردن از عدم قطعیت می‌تواند موجب دست‌یابی به پاسخ‌هایی اشتباه گردد.

کلمات کلیدی: تولید پراکنده؛ سیستم انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر؛ مدل معادل تونن؛ روش درخت سناریو؛ الگوریتم ترکیبی سینوس-کسینوس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

۱- مقدمه

برای مدلسازی تاثیر شبکه انتقال بر مسائل شبکه توزیع، دقیق‌ترین راهکار، استفاده از شبکه یکپارچه انتقال و توزیع است. با این وجود در مسائل واقعی سیستم قدرت، به دلیل بزرگ بودن شبکه انتقال، استفاده از شبکه یکپارچه انتقال و توزیع موجب پیچیدگی مسائل شبکه توزیع خواهد شد. در نتیجه از راهکارهایی جایگزین برای این منظور استفاده می‌شود تا تاثیر شبکه انتقال بر شبکه توزیع، به طوری قابل قبول و با دقتی مناسب، مدلسازی شود. در این مقاله برای مدلسازی شبکه انتقال در مسئله تعیین مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع، از مدل معادل تونن استفاده شده است. در مقاله، از دو تجهیز FACTS با نام‌های خازن سری کنترل‌شونده با تریستور (TCSC) و جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو (SVC) در شبکه انتقال استفاده شده است. بار مصرفی شبکه توزیع تابعی از رفتار مشترکین این شبکه است. به دلیل اینکه رفتار مشترکین دارای ماهیتی تصادفی است، پیش‌بینی دقیق آن نیز ممکن نمی‌باشد. در نتیجه پیش‌بینی بار مصرفی مشترکین نیز هیچ‌گاه به طور دقیق ممکن نبوده و همواره میزانی از عدم قطعیت در بار شبکه وجود دارد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021

در مرجع[۱] برای مدلسازی شبکه انتقال در مسئله تعیین مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع، از مدل معادل تونن استفاده شده است. همچنین به منظور بهبود کارایی شبکه انتقال، از دو تجهیز FACTS با نام‌های TCSC و SVC استفاده شده است. در انتها از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای حل مسئله تعیین مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع استفاده شده است. در مرجع[۲] روش بهینه‌سازی جدیدی با نام الگوریتم ترکیبی سینوس-کسینوس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (HSCA-PSO) معرفی شده است. مراجع [۳-۱۳] نقش ادوات FACTS و واحدهای تولید پراکنده را در سیستم‌های قدرت بررسی کرده‌اند. مرجع[۱۴] تاثیر واحدهای تولید پراکنده فتوولتائیک بر پایداری ولتاژ در شبکه فوق-توزیع بررسی شده است. در مرجع[۱۵] مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده در شبکه فوق توزیع مورد مطالعه قرار گرفته است. در[۱۶] تاثیر واحدهای تولید پراکنده بر شبکه توزیع نامتعادل مورد مطالعه قرار گرفته است.مرجع[۱۷] تعیین ظرفیت و مکان بهینه واحدهای تولید پراکنده فتوولتائیک خورشیدی را در شبکه توزیع مورد مطالعه قرار داده است. در [۱۸] مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع شعاعی مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع[۱۹] اقدام به تعیین همزمان مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده (DG) و جبران‌ساز استاتیک توزیع (DSTATCOM) در شبکه توزیع کرده است. در[۲۰] نیز مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده و DSTATCOM در شبکه توزیع مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۲۱] نصب چند واحد تولید پراکنده در شبکه توزیع بررسی شده است. مرجع [۲۲] به بررسی مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده و ذخیره‌ساز الکتریکی در شبکه توزیع در حضور خودروهای الکتریکی پرداخته است. مرجع[۲۳] نصب همزمان DG و DSTATCOM را در شبکه توزیع بررسی کرده است. مرجع[۲۴] به بررسی نصب واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر در شبکه توزیع پرداخته است. مرجع[۲۵] مکان و ظرفیت بهینه واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر را در شبکه توزیع فعال مورد مطالعه قرار داده است. در مرجع[۲۶] نیز مکان و ظرفیت بهینه برای نصب واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر در شبکه توزیع بررسی شده است. مرجع [۲۷] نیز نصب واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر را به همراه نصب بانک‌های خازنی و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و تعویض هادی‌های خطوط در شبکه توزیع مورد مطالعه قرار داده است. مرجع [۲۸] برای نصب واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر در شبکه توزیع، از بهینه‌سازی چندهدفه استفاده کرده است. مرجع [۲۹] نصب واحدهای تولید پراکنده را به همراه بازآرایی شبکه توزیع مورد مطالعه قرار داده است.

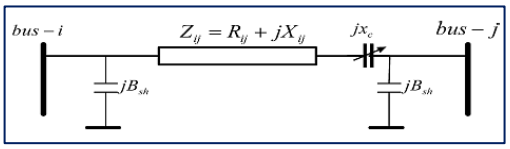
به عنوان نوآوری نسبت به مرجع[۱]، از الگوریتم ترکیبی سینوس-کسینوس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (HSCA-PSO) استفاده خواهد شد. و با توجه به عدم در نظر نگرفتن عدم قطعیت بار مصرفی در مرجع[۱]، عدم قطعیت بار مصرفی از طریق روش درخت سناریو در مدل‌سازی مسئله تعیین مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع استفاده شده است همچنین به منظور بررسی کارایی الگوریتم ترکیبی سینوس-کسینوس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از الگوریتم PSO [۱] مقایسه خواهد شد.

۲- فرمول‌بندی مسئله

در ابتدا، مدلسازی شبکه یکپارچه انتقال-توزیع با در نظر گرفتن ادوات FACTS انجام شده و نحوه محاسبه و استخراج مدار معادل تونن بررسی می‌گردد. سپس با معرفی تابع هدف و قیود مسئله، مدلسازی و فرمول بندی مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در رویکرد قطعی انجام می‌گیرد. در ادامه، نحوه مدلسازی عدم قطعیت بار مصرفی توسط روش درخت سناریو بررسی شده و بر این اساس، مدلسازی مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در رویکرد تصادفی انجام خواهد شد.

۲-۱ مدلسازی TCSC

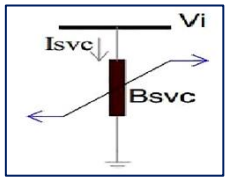
نحوه قرارگیری TCSC در خطوط شبکه، در شکل(۱)نمایش داده شده است.



شکل۱: مدلسازی TCSC به صورت سری در خطوط شبکه[۱]

مدلسازی SVC

نحوه اتصال SVC به شین‌های شبکه در شکل(۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲: مدلسازی SVC به صورت موازی در شین‌های شبکه[۱]

۲-۳ مدارمعادل تونن

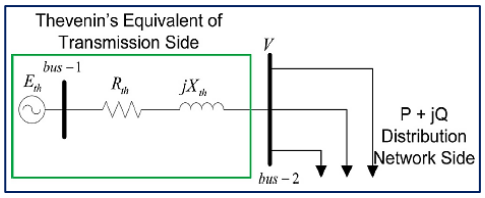
شبکه‌های توزیع از طریق پست‌های توزیع به شبکه‌های انتقال متصل می‌باشند. عموما به منظور مدل‌سازی شبکه انتقال در مطالعات شبکه توزیع، نقطه اتصال به شبکه انتقال به صورت یک منبع ولتاژ ایده‌آل (یک شین اسلک با ولتاژ یک پریونیت) در نظر گرفته می‌شود. مدلسازی شبکه انتقال به صورت یک شین اسلک، اگرچه موجب ساده‌سازی مسائل شبکه توزیع می‌شود، اما دقت مدلسازی این مسائل را کاهش خواهد داد.

برای رفع ایراد فوق و مدلسازی دقیق شبکه انتقال، در حالت ایده‌آل بهتر است شبکه توزیع به صورت یکپارچه با شبکه انتقال در نظر گرفته شده و تحلیل شود. رویکرد شبکه یکپارچه انتقال-توزیع اگرچه دقیق‌ترین حالت ممکن است، اما در مسائل واقعی شبکه قدرت، استفاده از آن ممکن نمی‌باشد. به عبارت دیگر در سیستم‌های قدرت

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

واقعی، شبکه‌های انتقال و توزیع بسیار بزرگ و پیچیده بوده و در نتیجه استفاده از رویکرد شبکه یکپارچه انتقال- توزیع در عمل به دلیل حجم و زمان زیاد محاسبات، ممکن نمی‌باشد. در نتیجه نیاز است از رویکردهایی جایگزین ا ستفاده شود. یکی از این رویکردها، ا ستفاده از مدل معادل تونن می‌باشد. توسط مدل معادل تونن، شبکه انتقال توسط یک منبع ولتاژ و یک امپدانس مدلسازی می شود. ولتاژ تونن لزوما برابر با یک پریونیت نبوده و مقدار دقیق آن از طریق محاسبات خاصی به د ست می‌آید. بنابراین مدلسازی شبکه انتقال تو سط مدار معادل تونن از یک سو موجب ساده سازی حل م سائل شبکه توزیع می‌گردد، زیرا کل شبکه انتقال را با تمامی جزئیات آن، تنها تو سط یک منبع ولتاژ و یک امپدانس مدلسازی می‌کند. از سوی دیگر، مدل معادل تونن قادر است با دقت خوبی شبکه انتقال را مدلسازی کند و بنابراین برخلاف رویکرد شین ا سلک، قادر ا ست تاثیر افت ولتاژ در شبکه انتقال و تاثیر ادوات FACTS را در نظر گیرد [۱].

در یک شبکه یکپارچه انتقال-توزیع، بخش انتقال را می‌توان توسط مدار معادل تونن مطابق شکل(۳) نمایش داد. در این شکل، یک ژنراتور با ولتاژ E_{th} توان الکتریکی را در یک خط انتقال با امپدانس $Z_{th} = R_{th} + X_{th}$ به سمت شبکه توزیع با ولتاژ V در شین نقطه عمومی اتصال، منتقل می‌کند. برای محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن، ابتدا باید ماتریس Z_{bus} برای شبکه انتقال ت شکیل شده و نتایج حاصل از پخش بار در شبکه انتقال به دست آید. سپس امپدانس معادل تونن(Z_{th}) توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود. محاسبه امپدانس معادل بارهای شبکه توزیع (Z_{DN}^{L}) نیز توسط رابطه (۲) صورت می‌گیرد. در انتها نیز ولتاژ معادل تونن (E_{th}) توسط رابطه (۳) محاسبه خواهد شد. پس از محاسبه پارامترهای مدار معادل تونن، از آنها برای مدلسازی تاثیر شبکه انتقال بر شبکه توزیع توسط رابطه (۳) استفاده خواهد شد[۱،۳۱]:



شکل ۳: مدار معادل تونن شبکه انتقال[۱]

$$Z_{th} = \frac{Z_{DN}^{L} * Z_{pcc}}{Z_{DN}^{L} - Z_{pcc}} \quad (۱)$$

$$Z_{DN}^{L} = \frac{{V_{pcc}}^{2}}{P_{DN} - jQ_{DN}} \quad (۲)$$

$$E_{th} = \left(1 + \frac{Z_{th}}{Z_{DN}^{L}}\right) * V_{pcc} \quad (۳)$$

که در آن،

Z_{th}: امپدانس معادل تونن ، Z_{DN}^{L}: امپدانس معادل بارهای شبکه توزیع، Z_{pcc}: المان قطری ماتریس، V_{pcc}: اندازه ولتاژ نقطه عمومی اتصال، P_{DN}: مجموع بار اکتیو مصرفی شبکه توزیع، E_{th}: ولتاژ معادل تونن، Q_{DN}: مجموع بار راکتیو مصرفی شبکه توزیع

۲-۴ مدلسازی مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در رویکرد قطعی

در این بخش مدلسازی مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در رویکرد قطعی انجام می‌شود. برای این منظور، ابتدا تابع هدف مسئله بهینه‌سازی معرفی شده و سپس قیود مسئله بهینه‌سازی بررسی خواهند شد.

۲-۴-۱ تابع هدف مسئله بهینه سازی

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع، برای حداقل‌سازی سه متغیر J_1, J_2, J_3 به صورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$J = \min(J_1, J_2, J_3) \quad (۴)$$

J: تابع هدف مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در شبکه توزی، J_1: شاخص کاهش تلفات، J_2:شاخص کاهش انحراف ولتاژ، J_3:شاخص بهبودپایداری ولتاژ

همانطور که در رابطه فوق مشاهده می‌شود، تابع هدف مسئله بهینه سازی این تحقیق به صورتی تعریف شده که به طور همزمان حداقل سازی تلفات و انحراف ولتاژ و حداکثرسازی پایداری ولتاژ را در نظر بگیرد. به منظور ترکیب سه شاخص فوق و دست‌یابی به یک تابع هدف کلی برای مسئله بهینه‌سازی، از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱]:

$$\min\{J\} = \alpha_1 * J_1 + \alpha_2 * J_2 + \alpha_3 * J_3 \quad (۵)$$

$$\alpha_i = \frac{K - r_i + 1}{\sum_{j=1}^{K} K - r_j + 1} \quad (۶)$$

J: تابع هدف مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع، J_1: شاخص کاهش تلفات، α_1: ضریب بخش اول تابع هدف، J_2: شاخص کاهش انحراف ولتاژ، α_2: ضریب بخش دوم تابع هدف، J_3: شاخص بهبود پایداری ولتاژ، α_3: ضریب بخش سوم تابع هدف، α_i: ضریب بخش شماره i تابع هدف، r_i: رتبه تابع هدف شماره i از منظر اولویت، K: تعداد شاخص‌های مورد استفاده در تابع هدف

مقدار وزن‌های مورد استفاده برای تابع هدف در این تحقیق عبارتند از $\alpha_1 = 0.5$، $\alpha_2 = 0.15$ و $\alpha_3 = 0.35$ [۱]. در ادامه نحوه محاسبه هر یک از سه بخش تابع هدف توضیح داده خواهد شد.

❖ تلفات توان

محاسبه تلفات شبکه توزیع توسط رابطه (۷) انجام می‌گیرد. سپس بخش اول تابع هدف (شاخص کاهش تلفات) توسط رابطه (۸) محاسبه خواهد شد. مقدار شاخص J_1، توسط مقدار پایه آن نرمالیزه (پریونیت) شده است تا از این طریق، با دو شاخص دیگر مورد استفاده در تابع هدف قابل مقایسه شود[۱]:

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

$$P^{loss} = \sum_{k=1}^{nl} g_k\left[{V_i}^2 + {V_j}^2 - 2V_iV_j\cos(\delta_i - \delta_j)\right] \quad (۷)$$

$$J_1 = \frac{P_{DG}^{loss}}{P_{base}^{loss}} \quad (۸)$$

P^{loss}: تلفات توان اکتیو در شبکه توزیع، g_k: کندوکتانس خط شماره k، k: شمارش‌گر خطوط شبکه، nl: تعداد کل خطوط شبکه، i و j: شمارش‌گر شین‌های شبکه، V_i: اندازه ولتاژ در شین شماره i، V_j: اندازه ولتاژ در شین شماره j ، δ_i: زاویه ولتاژ در شین شماره i، δ_j: زاویه ولتاژ در شین شماره j ، J_1: شاخص کاهش تلفات، P_{DG}^{loss}: تلفات شبکه توزیع در حضور واحد DG، P_{base}^{loss}: تلفات شبکه توزیع در حالت پایه (پیش از نصب واحد DG)

❖ انحراف ولتاژ

مقدار شاخص انحراف ولتاژ (V^D) توسط رابطه (۹) محاسبه می‌شود. در این رابطه، شاخص انحراف ولتاژ به صورت مجموع قدرمطلق اختلاف ولتاژ شین‌های شبکه از مقدار نامی (یک پریونیت) به دست می‌آید. در نتیجه هرچه مقدار ولتاژ شین‌های شبکه به مقدار نامی یک پریونیت نزدیک‌تر باشد، شاخص انحراف ولتاژ دارای مقدار کمتری بوده و مطلوب‌تر است. همچنین توسط رابطه (۱۰)، بخش دوم تابع هدف (شاخص کاهش انحراف ولتاژ) محاسبه خواهد شد. مقدار شاخص J_2، توسط مقدار پایه آن نرمالیزه (پریونیت) شده است[۱]:

$$V^D = \sum_{i=1}^{nb} |1 - V_i| \quad (۹)$$

$$J_2 = \frac{V_{DG}^D}{V_{base}^D} \quad (۱۰)$$

V^D: شاخص انحراف ولتاژ، i: شمارش‌گر شین‌های شبکه، nb: تعداد کل شین‌های شبکه، V_i: اندازه ولتاژ در شین شماره i، J_2: شاخص کاهش انحراف ولتاژ ، V_{DG}^D: انحراف ولتاژ شبکه توزیع در حضور واحد DG، V_{base}^D: انحراف ولتاژ شبکه توزیع در حالت پایه (پیش از نصب واحد DG)

❖ پایداری ولتاژ

در این تحقیق از شاخص پایداری ولتاژ خط(LVSI) استفاده می‌شود که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود[۱]:

$$L_{ij} = \frac{4Z^2Q_rX}{{V_s}^2(R * \sin\delta - X * \cos\delta)^2} \quad (۱۱)$$

L_{ij}: شاخص پایداری ولتاژ خط ij ، Z: امپدانس خط، R: مقاومت خط X: راکتانس خط، Q_r: توان راکتیو در انتهای خط (سمت دریافت خط)، V_s: اندازه ولتاژ در ابتدای خط (سمت ارسال خط)، δ: اختلاف زاویه ولتاژ در دو سر خط

شاخص پایداری ولتاژ خط (L_{ij}) توسط رابطه فوق و برای هر یک از خطوط شبکه، به طور جداگانه محاسبه می‌شود. هرچه مقدار L_{ij} کمتر بوده و به صفر نزدیک‌تر باشد، به معنای بالاتر بودن پایداری خط است و هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌گر نزدیکی به نقطه فروپاشی ولتاژ است. حال از رابطه (۱۲)برای محاسبه شاخص پایداری ولتاژ شبکه توزیع استفاده می‌شود. در این رابطه، مقادیر پایداری ولتاژ خطوط شبکه (L_{ij}) با یکدیگر جمع شده و شاخص پایداری ولتاژ شبکه (V^{idx}) را تشکیل می‌دهند. مشابه با L_{ij}، هرچه مقدار V^{idx} کمتر باشد، مطلوب‌تر بوده و به معنای بالاتر بودن پایداری ولتاژ شبکه است. همچنین توسط رابطه(۱۳)، بخش سوم تابع هدف (شاخص بهبود پایداری ولتاژ) محاسبه خواهد شد. مقدار شاخص J_3، توسط مقدار پایه آن نرمالیزه (پریونیت) شده است[۱]:

$$V^{idx} = \sum_{m\in nl} L_m \quad (۱۲)$$

$$J_3 = \frac{V_{DG}^{idx}}{V_{base}^{idx}} \quad (۱۳)$$

V^{idx}: شاخص پایداری ولتاژ شبکه توزیع، m: شمارش‌گر خطوط شبکه، nl: تعداد کل خطوط شبکه، L_m: شاخص پایداری ولتاژ خط شماره m، J_3: شاخص بهبود پایداری ولتاژ (بخش سوم تابع هدف)، V_{DG}^{idx}: شاخص پایداری ولتاژ شبکه توزیع در حضور واحد DG، V_{base}^{idx}: شاخص پایداری ولتاژ شبکه توزیع در حالت پایه (پیش از نصب واحد DG)

۲-۴-۲ قیود مسئله

❖ قیود پخش بار

به منظور حفظ تعادل توان در شین‌های شبکه توزیع و تامین بار مصرفی مشترکین، از قیود پخش بار به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$P_G^i = P_L^i + \sum_{j=1}^{n} V_iV_jY_{ij}sin(\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) \quad (۱۴)$$

$$Q_G^i = Q_L^i + \sum_{j=1}^{n} V_iV_jY_{ij}\cos(\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) \quad (۱۵)$$

P_G^i: توان اکتیو تولیدی در شین شماره i، P_L^i: توان اکتیو مصرفی در شین شماره i i و j: شمارش‌گر شین‌های شبکه، n: تعداد کل شین‌های شبکه، V_i: اندازه ولتاژ در شین شماره i، δ_i: زاویه ولتاژ در شین شماره i، Y_{ij}: اندازه ادمیتانس خط بین شین‌های i و j ، θ_{ij}: زاویه ادمیتانس خط بین شین‌های i و j، Q_L^i: توان راکتیو مصرفی در شین شماره i

به منظور اطمینان از اینکه ولتاژ شین‌های شبکه در محدوده مجاز خود قرار دارند، از قید ولتاژ شین‌های شبکه توسط رابطه زیر استفاده می‌شود[۱]

$$0.9 \le V_i \le 1.1 \quad (۱۶)$$

V_i: اندازه ولتاژ در شین شماره i

❖ قیود واحد تولید پراکنده

ظرفیت نصب شده واحد تولید باید توسط روابط زیر به ۷۵٪ از بار مصرفی شبکه توزیع محدود گردد. بر اساس رابطه (۱۷)، ظرفیت توان اکتیو واحد تولید پراکنده (P_{DG}^{size}) و توسط رابطه (۱۸)، ظرفیت توان راکتیو واحد تولید پراکنده (Q_{DG}^{size}) به مقدار حداکثر خود محدود می‌شوند. بر اساس رابطه(۱۹)، توان اکتیو تولیدی توسط واحد تولید پراکنده (P_G^{DG}) باید بین مقدار صفر و ظرفیت نصب شده توان اکتیو (P_{DG}^{size}) تغییر نماید. بر اساس رابطه(۲۰) نیز توان راکتیو تولیدی توسط واحد تولید پراکنده (Q_G^{DG}) بین مقدار مثبت و منفی ظرفیت نصب شده توان راکتیو (Q_{DG}^{size}) تغییر خواهد کرد.[۱]:

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

$$0 \le P_{DG}^{size} \le 0.75 \times P_{DN} \quad (۱۷)$$

$$0 \le Q_{DG}^{size} \le 0.75 \times Q_{DN} \quad (۱۸)$$

$$0 \le P_{G}^{DG} \le P_{DG}^{size} \quad (۱۹)$$

$$-Q_{DG}^{size} \le Q_{G}^{DG} \le Q_{DG}^{size} \quad (۲۰)$$

P_{DG}^{size}: ظرفیت توان اکتیو واحد تولید پراکنده، P_{DN}: مجموع بار اکتیو مصرفی شبکه توزیع، Q_{DG}^{size}: ظرفیت توان راکتیو واحد تولید پراکنده Q_{DN}: مجموع بار راکتیو مصرفی شبکه توزیع، Q_{DG}^{size} : ظرفیت توان راکتیو واحد تولید پراکنده، P_{DG}^{size}: ظرفیت توان اکتیو واحد تولید پراکنده، P_{G}^{DG}: توان اکتیو تولیدی توسط واحد تولید پراکنده، Q_{G}^{DG}: توان راکتیو تولیدی توسط واحد تولید پراکنده

۲-۵ مدلسازی مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در رویکرد تصادفی

در رویکرد تصادفی عدم قطعیت در بار مصرفی مشترکین شبکه توزیع در مدلسازی مسئله بهینه‌سازی، لحاظ خواهد شد. در این بخش ابتدا نحوه مدلسازی عدم قطعیت بار مصرفی توسط روش درخت سناریو توضیح داده خواهد شد و سپس تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی در حضور عدم قطعیت‌ها بررسی خواهد شد.

۲-۵-۱ مدلسازی عدم قطعیت بارمصرفی توسط روش درخت سناریو

بار مصرفی شبکه توزیع تابعی از رفتار مشترکین است. رفتار مشترکین دارای ماهیتی تصادفی بوده و بنابراین پیش‌بینی دقیق آن ممکن نمی‌باشد. خطای پیش‌بینی خود موجب عدم قطعیت در بار مصرفی شبکه توزیع خواهد شد. این عدم قطعیت بر تمامی مسائل شبکه توزیع از جمله تعیین مکان و ظرفیت بهینه تولید پراکنده تاثیرگذار است. در نظر گرفتن عدم قطعیت بار مصرفی می‌تواند موجب افزایش دقت مدلسازی مسئله شده و نتایج مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده را به شرایط واقعی شبکه نزدیک سازد. مزیت روش درخت سناریو بر سایر روش‌ها در این است که نیازمند تعداد سناریوهای کمتری می‌باشد و به حجم و زمان محاسبات کمتری نیاز دارد.

در روش درخت سناریو، برای هر یک از پارامترهای غیرقطعی مسئله، سه وضعیت در نظر گرفته می‌شود: حد بالا، حد پایین و مقدار میانگین. بر اساس توضیحات ارائه شده در مراجع مختلفی چون [۳۳،۳۲]، بار مصرفی شبکه قدرت از تابع توزیع نرمال پیروی می‌کند. بر اساس روش معرفی شده در مراجع فوق و مشابه با بسیاری تحقیقات دیگر، مقدار میانگین تابع توزیع نرمال(μ)، برابر با مقدار پیش‌بینی شده بار مصرفی قرار داده می‌شود. مقدار انحراف معیار (σ) نیز برابر با ۱۰٪ مقدار میانگین در نظر گرفته می‌شود. مبنای نظری این روش‌ها این است که مطابق اصول آماری، بیش از ۹۹/۷۳٪ از حالات، در فاصله سه انحراف معیار ($\pm 3\sigma$) حول میانگین تابع نرمال (μ) رخ می‌دهد. تابع توزیع نرمال از هر دو طرف تا مثبت و منفی بینهایت ادامه می‌یابد، اما در عمل حدود بالا و پایین تابع توزیع نرمال را، $\mu \pm 3\sigma$ در نظر می‌گیرند. این پدیده را قانون سه سیگما می‌نامند که کاربرد فراوانی در مباحث آماری و مهندسی دارد. برای تشکیل سناریوهای عدم قطعیت بر اساس روش درخت سناریو، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود [۳۴-۳۲]:

- مقدار میانگین پارامتر غیرقطعی (بار مصرفی)، برابر با مقدار پیش‌بینی شده بار مصرفی است. احتمال وقوع مقدار میانگین نیز برابر با ۵۰٪ می‌باشد.
- حد پایین پارامتر غیرقطعی (بار مصرفی)، که بر اساس قانون سه سیگما، برابر با مقدار میانگین منهای سه انحراف معیار ($\mu - 3\sigma$) خواهد بود. احتمال وقوع حد پایین نیز برابر با ۲۵٪ می‌باشد.
- حد بالای پارامتر غیرقطعی (بار مصرفی)، که بر اساس قانون سه سیگما، برابر با مقدار میانگین به علاوه سه انحراف معیار ($\mu + 3\sigma$) خواهد بود. احتمال وقوع مقدار حد بالا نیز برابر با ۲۵٪ می‌باشد.

۲-۵-۲ تابع هدف و قیود مسئله با درنظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در رویکرد قطعی، پیشتر در رابطه (۵) ارائه گردید. در رویکرد تصادفی نیز تابع هدف مسئله مشابه رویکرد قطعی است. با این وجود، نحوه محاسبه بخش‌های مختلف تابع هدف (J_1, J_2, J_3) در رویکرد تصادفی با رویکرد قطعی متفاوت خواهد بود. دلیل این موضوع این است که متغیرهای مورد استفاده در محاسبه تابع هدف (تلفات، انحراف ولتاژ و پایداری ولتاژ)، در هر سناریو مقداری متفاوت خواهند داشت که ناشی از متفاوت بودن بار مصرفی و نتایج پخش بار در هر سناریو می‌باشد. در نتیجه باید مقدار هر یک از شاخص‌های فوق، به صورت ارزش انتظاری محاسبه شود. بنابراین برای محاسبه بخش اول تابع هدف، مشابه با رویکرد قطعی، از تابع هدف ارائه شده در رابطه (۸) استفاده خواهد شد. با این وجود برای محاسبه P_{DG}^{loss}، از رابطه (۲۱) استفاده می‌شود. به همین ترتیب، برای محاسبه بخش دوم تابع هدف (شاخص کاهش انحراف ولتاژ) در رویکرد تصادفی، از رابطه(۱۰) استفاده می‌شود، با این تفاوت که مقدار V_{DG}^{D} طبق رابطه(۲۲) باید به صورت ارزش انتظاری و بر اساس انحراف ولتاژ سناریوهای مختلف($V_{DG,s}^{D}$) محاسبه شود. برای محاسبه V_{DG}^{D} از رابطه (۲۳) استفاده خواهد شد. محاسبه بخش سوم تابع هدف (شاخص بهبود پایداری ولتاژ) نیز توسط رابطه (۱۳) انجام می‌گیرد، با این تفاوت که مقدار V_{DG}^{idx} به صورت ارزش

$$P_{DG}^{loss} = \sum_{s} Pr_s \times P_{DG,s}^{loss} \quad (۲۱)$$

$$V_{DG}^{D} = \sum_{s} Pr_s \times V_{DG,s}^{D} \quad (۲۲)$$

$$V_{DG}^{idx} = \sum_{s} Pr_s \times V_{DG,s}^{idx} \quad (۲۳)$$

انتظاری انتظاری و توسط رابطه (۲۳) به دست می‌آید.

P_{DG}^{loss}: مقدار انتظاری تلفات شبکه توزیع در حضور واحد DG، s: شمارش‌گر سناریوهای عدم قطعیت، Pr_s: احتمال وقوع سناریو شماره s، $P_{DG,s}^{loss}$: تلفات شبکه توزیع در حضور واحد DG در سناریو شماره s، V_{DG}^{D}: مقدار انتظاری انحراف ولتاژ شبکه توزیع در حضور واحد DG، $V_{DG,s}^{D}$: انحراف ولتاژ شبکه توزیع در حضور واحد DG در سناریو

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

شماره s، Pr_s: احتمال وقوع سناریو شماره‌s، V_{DG}^{idx}: مقدار انتظاری شاخص پایداری ولتاژ شبکه توزیع در حضور واحد DG، $V_{DG,s}^{idx}$: شاخص پایداری ولتاژ شبکه توزیع در حضور واحد DG در سناریو شماره s

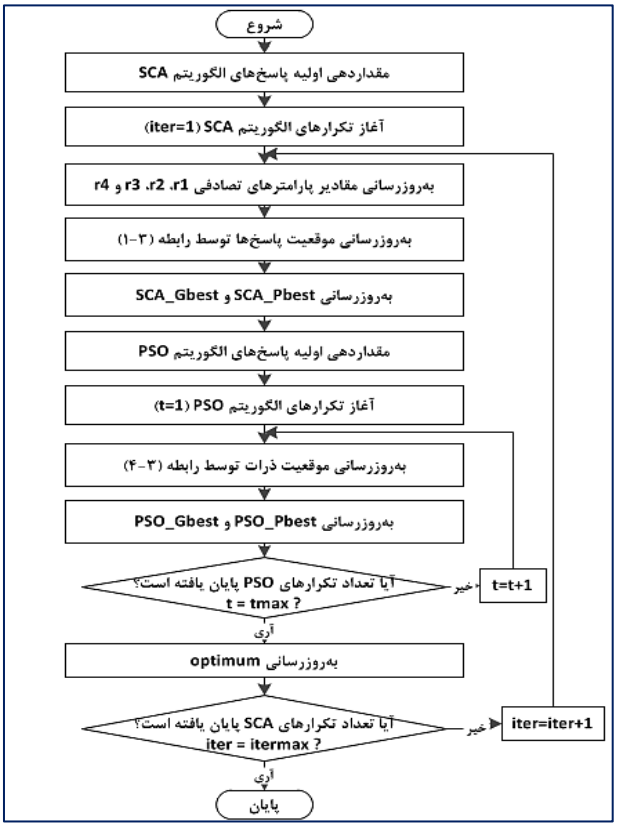
مقدار تابع هدف کلی مسئله (J) توسط رابطه (۵) به دست می‌آید. بنابراین مقدار تابع هدف J نیز به صورت ارزش انتظاری محاسبه شده و در آن وضعیت شبکه در سناریوهای مختلف در نظر گرفته خواهد شد. قیود مسئله بهینه‌سازی در رویکرد تصادفی نیز، مشابه با رویکرد قطعی خواهند بود. تنها تفاوتی که ایجاد می‌شود این است که در رویکرد تصادفی، هر یک از قیود باید برای تمامی سناریوها برقرار باشد.

۳- معرفی الگوریتم HSCA-PSO

به طور کلی تغییرات صورت گرفته در الگوریتم HSCA-PSO نسبت به الگوریتم PSO، شامل موارد زیر است [۲]:

- استفاده از حافظه داخلی مشابه با $P_{best,i}$ در الگوریتم PSO:
- استفاده از توانایی PSO برای جست‌وجوی بیشتر در پاسخ‌های یافت شده توسط الگوریتم SCA: برای این منظور در هر یک از تکرارهای الگوریتم SCA، یک مرتبه الگوریتم PSO اجرا می‌شود.

فلوچارت الگوریتم HSCA-PSO در شکل(۴) نمایش داده شده است[۲]:



شکل(۴): الگوریتم ترکیبی سینوس-کسینوس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (**HSCA-PSO**) [۲]

۳-۱ استفاده از الگوریتم HSCA-PSO برای حل مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده

در این بخش نحوه استفاده از الگوریتم فوق برای حل مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع، بررسی می‌شود.

❖ ساختار پاسخ‌های مسئله بهینه‌سازی

پیش از استفاده از الگوریتم HSCA-PSO برای حل مسئله بهینه‌سازی این تحقیق، نیاز است که ساختار پاسخ‌های مسئله بهینه‌سازی تعیین شود. این پاسخ‌ها در الگوریتم SCA به صورت x_i^t و در الگوریتم PSO به صورت X_i^t نمایش داده می‌شوند. ساختار پاسخ‌ها در الگوریتم‌های فوق، کاملا وابسته به ماهیت مسائل بهینه‌سازی بوده و برای هر مسئله باید به طور جداگانه تعیین شود. برای این منظور، ابتدا باید متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله تعیین شوند. متغیرهای تصمیم‌گیری به آن دسته از متغیرهای مسئله گفته می‌شوند که حل مسئله با هدف یافتن آنها صورت می‌گیرد. متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع، شامل موارد زیر می‌باشند:

- مکان (شماره شین) نصب واحد تولید پراکنده
- ظرفیت توان اکتیو واحد تولید پراکنده
- ظرفیت توان راکتیو واحد تولید پراکنده

سایر متغیرهای مسئله همچون مقادیر بخش‌های مختلف تابع هدف، توان تولیدی واحدهای تولید پراکنده، ولتاژ شین‌ها و غیره بر اساس مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری، محاسبه می‌شوند. دقت شود که در این تحقیق، حل مسئله پخش بار در شبکه توزیع توسط بسته نرم‌افزاری MATPOWER [۳۸] در محیط نرم‌افزار MATLAB صورت می‌گیرد. بر اساس توضیحات فوق، در الگوریتم HSCA-PSO، ساختار پاسخ‌های مسئله بهینه‌سازی (بردار پاسخ‌ها یا ذرات) به صورت زیر خواهد بود:

$$X = \left[B_{DG} \;\; P_{DG}^{size} \;\; Q_{DG}^{size}\right] \qquad (۲۴)$$

X: بردار پاسخ‌ها/ذرات مسئله، B_{DG}: شماره شینی که واحد DG در آن نصب می‌شود، P_{DG}^{size}: ظرفیت توان اکتیو واحد DG، Q_{DG}^{size}: ظرفیت توان راکتیو واحد DG

❖ مقداردهی اولیه پاسخ‌ها

مقدار دهی اولیه پاسخ‌ها باید به گونه‌ای صورت گیرد که قیود مربوط به متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شود. برای این منظور، دو بردار با نام‌های حدود پایین (LB) و حدود بالای متغیرهای مسئله (UB) تعریف می‌شوند. این دو بردار دارای ساختاری

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

مشابه با رابطه (۲۴) بوده و در آنها به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر مجاز برای متغیرهای مسئله ثبت می‌شود:

- در شبکه توزیع، حداقل شماره شینی که واحد DGمی‌تواند در آن نصب شود (B_{DG})، شین شماره ۲ و حداکثر آن، آخرین شین شبکه است. در شین شماره یک که به شبکه انتقال متصل است، واحد DGنصب نمی‌شود.
- مقادیر حداقل و حداکثر مجاز برای ظرفیت توان اکتیو واحد تولید پراکنده (P_{DG}^{size})، توسط قید (۱۷) تعیین شده است.
- مقادیر حداقل و حداکثر مجاز برای ظرفیت توان راکتیو واحد تولید پراکنده (Q_{DG}^{size})، توسط قید (۱۸) تعیین شده است.

استفاده از بردارهای LBو UB موجب اطمینان از این موضوع می‌شود که قیود متغیرهای تصمیم‌گیری، همواره رعایت خواهد شد. بنابراین در تولید تصادفی پاسخ‌های اولیه باید پاسخ‌ها در محدوده بین مقادیر LBو UB تولید شوند تا پاسخ حاصله، پاسخی مجاز باشد. همچنین در تمامی مراحلی که موقعیت پاسخ‌ها/ذرات توسط رابطه (۲۴) در الگوریتم SCA یا توسط رابطه (۲۶) در الگوریتم PSO به‌روزرسانی می‌شوند، باید از مجاز بودن پاسخ‌ها اطمینان حاصل شود. برای این منظور، در صورتیکه مقدار یکی از متغیرهای مسئله از حداقل مجاز (LB) کمتر شد، باید برابر با حداقل مجاز قرار داده شود. به همین صورت اگر مقدار یکی از متغیرهای مسئله از حداکثر مجاز (UB) بیشتر شد، باید برابر با حداکثر مجاز قرار داده شود.

i: شمارش‌گر متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله t: شمارش‌گر تکرارهای الگوریتم، P_i^t: موقعیت متغیر شماره i برای بهترین پاسخ یافت شده تا تکرار شماره t، X_i^t: موقعیت متغیر شماره i در تکرار شماره t، r_2: عدد تصادفی تحت توزیع یکنواخت در بازه [0-2π]، r_3: عدد تصادفی تحت توزیع یکنواخت در بازه [0-2]، r_4: عدد تصادفی تحت توزیع یکنواخت در بازه [0-1]، v_i^t: سرعت ذره شماره i، x_i^t: موقعیت ذره شماره i، w: وزن اینرسی، c_1: ضریب شتاب بهترین تجربه فردی c_2: ضریب شتاب بهترین تجربه سراسری، r_a: یک عددی تصادفی تحت توزیع یکنواخت در بازه [0-1]، r_b: یک عددی تصادفی تحت توزیع یکنواخت در بازه [0-1]، $P_{best,i}$: بهترین تجربه فردی ذره شماره i، G_{best}: بهترین تجربه سراسری ذرات

❖ به‌روزرسانی موقعیت پاسخ‌ها

همانطور که بیان شد، بر اساس رابطه (۲۴)، بردار پاسخ‌ها/ذرات مسئله دارای سه بخش می‌باشد (مکان نصب DG، ظرفیت اکتیو و راکتیو آن). در نتیجه در به‌روزرسانی موقعیت پاسخ‌ها در الگوریتم SCAتوسط رابطه (۲۵)، باید این به‌روزرسانی برای هر یک از سه بخش بردار موقعیت پاسخ‌ها (X_i^t)، به طور جداگانه انجام شود. همچنین در به‌روزرسانی موقعیت ذرات در الگوریتم PSOتوسط رابطه (۲۷) نیز باید این به‌روزرسانی برای هر یک از سه بخش بردار موقعیت ذرات (X_i^t)، جداگانه انجام شود. همچنین در تمامی مراحلی که در الگوریتم‌های SCAو PSO به‌روزرسانی موقعیت ذرات انجام می‌گیرد، موقعیت جدید باید از نظر قیود مسئله توسط بردارهای LBو UB بررسی شده و در صورت تجاوز از حدود مجاز، به مقدار این بردارها محدود گردد.

❖ محاسبه تابع هدف و به‌روزرسانی بهترین تجربه‌های فردی و سراسری

در الگوریتم $\mathrm{HSCA}-\mathrm{PSO}$، بارها لازم است که مقدار تابع هدف برای پاسخ‌ها/ذرات مسئله، محاسبه شود. در ابتدا پس از تولید پاسخ‌های اولیه در بخش‌های SCAیا PSO، نیاز به محاسبه تابع هدف می‌باشد. سپس در طی اجرای الگوریتم‌های فوق نیز پس از هر مرتبه به‌روزرسانی موقعیت پاسخ‌ها/ذرات، نیاز است که مقدار تابع هدف برای پاسخ‌ها/ذرات جدید، مجددا محاسبه شود. در تمامی موارد فوق، مراحل زیر اجرا خواهد شد:

- ابتدا با توجه به مقدار متغیرهای مسئله (مکان نصب DG، ظرفیت توان اکتیو و راکتیو آن)، محاسبات پخش بار در شبکه توزیع توسط بسته نرم‌افزاری MATPOWER اجرا خواهد شد.
- سپس بر اساس نتایج پخش بار، مقدار بخش‌های مختلف تابع هدف (J_1, J_2, J_3) در توسط روابط (۸)، (۱۰) و(۱۳) محاسبه خواهد شد.

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \sin(r_2) \times (r_3 P_i^t - X_i^t); & r_4 < 0.5 \\ X_i^t + r_1 \cos(r_2) \times (r_3 P_i^t - X_i^t); & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (۲۵)$$

$$v_i^{t+1} = w v_i^t + c_1 \times r_a \times \left(P_{best,i} - x_i^t\right) + c_2 \times r_b \times (G_{best} - x_i^t) \quad (۲۶)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (۲۷)$$

- سپس بر اساس مقادیر J_1, J_2, J_3 و توسط رابطه (۵)، تابع هدف مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع (J) در هر دو رویکرد قطعی یا تصادفی، محاسبه خواهد شد.

با توجه به اینکه مسئله بهینه‌سازی این تحقیق از نوع حداقل‌سازی تابع هدف J می‌باشد، پاسخ‌هایی که مقدار تابع هدف کمتری دارند، مطلوب‌تر خواهند بود. بنابراین هرگاه که به‌روزرسانی بهترین تجربه‌های فردی ($\mathrm{SCA_P_{best}}$) و سراسری ($\mathrm{SCA_G_{best}}$) الگوریتم SCA، یا بهترین تجربه‌های فردی ($\mathrm{PSO_P_{best}}$) و سراسری ($\mathrm{PSO_G_{best}}$) الگوریتم PSOیا بهترین پاسخ الگوریتم $\mathrm{HSCA}-\mathrm{PSO}$ (optimum) بررسی می‌شود، مطلوب‌تر بودن پاسخ‌های جدید و جایگزینی آنها با بهترین پاسخ‌های قبلی هنگامی رخ می‌دهد که مقدار تابع هدف J برای پاسخ جدید بهتر از بهترین پاسخ‌های پیشین باشد. در انتها نیز پاسخ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021

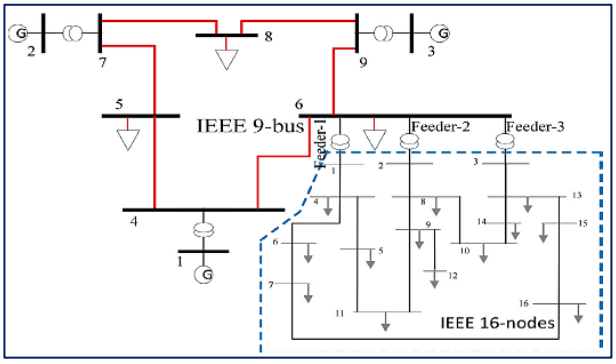
optimumکه دارای کمترین مقدار تابع هدف می‌باشد، به عنوان پاسخ نهایی مسئله بهینه‌سازی انتخاب خواهد شد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش اطلاعات شبکه نمونه ارائه شده و حالات مختلف شبیه‌سازی معرفی می‌شوند. سپس نتایج شبیه‌سازی برای سه مطالعه موردی ارائه می‌گردد. در انتها نیز مقایسه‌ای بین نتایج این تحقیق با نتایج مرجع[۱] انجام خواهد گرفت.

۴-۱ معرفی شبکه نمونه

به منظور شبیه‌سازی روش ارائه شده در این تحقیق، از شبکه یکپارچه انتقال و توزیع نمایش داده شده در شکل(۵) استفاده خواهد شد. در این شبکه یکپارچه، بخش‌های انتقال و توزیع به ترتیب از شبکه‌های تست ۹ شینه و ۱۶ شینه IEEE تشکیل شده‌اند. شبکه توزیع از طریق سه فیدر به شین شماره ۶ در شبکه انتقال متصل شده است. در شبکه انتقال ۹ شینه، ولتاژ نامی (پایه) برابر با ۲۳۰ kV بوده و توان نامی آن، ۱۰۰ MW می‌باشد. مجموع بارهای اکتیو و راکتیو شبکه انتقال به ترتیب برابر با ۳۱۵ MW و ۲۳۵ MVAr می‌باشند. اطلاعات شین‌ها و خطوط شبکه انتقال و همچنین اطلاعات سه واحد نیروگاهی [۳۸] به برنامه داده می‌شوند. حداقل و حداکثر ولتاژ شین‌های شبکه به ترتیب برابر با ۰/۹ و ۱/۱ پریونیت (p.u.) می‌باشد.



شکل۵: دیاگرام شبکه یکپارچه انتقال و توزیع شامل شبکه انتقال ۹ شینه و شبکه توزیع ۱۶ شینه IEEE [۱]

در شبکه توزیع ۱۶ شینه، ولتاژ نامی (پایه) برابر با ۲۳ kV و توان نامی ۱۰۰ MW می‌باشد. مجموع بارهای اکتیو و راکتیو شبکه توزیع به ترتیب برابر با ۲۸/۷ MW و ۱۷/۳ MVAr می‌باشند. اطلاعات شین‌ها و خطوط این شبکه [۳۹] به عنوان ورودی به برنامه داده می شود. حداقل و حداکثر ولتاژ شین‌های شبکه به ترتیب برابر با ۰/۹ و ۱/۱ پریونیت (p.u.) می‌باشد. مطالعه تاثیر نصب واحدهای تولید پراکنده بر شبکه توزیع، با در نظر گرفتن ادوات FACTS در شبکه انتقال انجام می‌گیرد. برای این منظور، تجهیزات زیر در شبکه انتقال نصب خواهد شد [۱]:

- TCSC در خط شماره ۹ (بین شین‌های ۴ و ۵) با ظرفیت p.u. ۰/۰۱۷۰۱۷
- SVC در شین شماره ۵ با ظرفیت ۱۰۷/۹۲۹ MVAr

پارامترهای مدار معادل تونن شبکه انتقال در حالات مختلف به صورت زیر می‌باشند [۱]:

- بدون ادوات FACTS:
  - $E_{th} = 1.0632\angle -6.3169$
  - $Z_{th} = 0.3016 + 0.0685i$
- در حضور TCSC:
  - $E_{th} = 1.0554\angle -6.2883$
  - $Z_{th} = 0.2603 + 0.0615i$
- در حضور SVC:
  - $E_{th} = 1.0822\angle -7.3757$
  - $Z_{th} = 0.2995 + 0.0212i$

مکان و ظرفیت نصب یک واحد تولید پراکنده در شبکه توزیع تعیین خواهد شد. با توجه به اینکه شین‌های شماره ۱ تا ۳ شبکه توزیع به پست توزیع متصل هستند، سایر شین‌های شبکه (شین‌های ۴ تا ۱۶) کاندید نصب واحد تولید پراکنده می‌باشند [۱].

پارامترهای الگوریتم HSCA-PSO به صورت زیر خواهند بود[۲]:

تعداد ذرات برابر ۱۵ تعداد تکرارهای الگوریتم SCA ($iter_{max}$) برابر ۵۰ تعداد تکرارهای الگوریتم PSO (t_{max})برابر ۱۵

پارامتر ثابت a برابر ۲ ضریب شتاب بهترین تجربه فردی (c_1) برابر ۲ ضریب شتاب بهترین تجربه سراسری (c_2) برابر ۲ حداکثر وزن اینرسی (w_{max})برابر ۰/۹ و حداقل وزن اینرسی (w_{min})برابر ۰/۴ می باشد.

بر اساس روش درخت سناریو وبا توجه به اطلاعات شبکه توزیع، میانگین بار اکتیو مصرفی شبکه (μ) برابر با مقدار پیش‌بینی شده (MW ۲۸/۷) است. انحراف معیار بار اکتیو (σ) نیز ۱۰٪ مقدار میانگین است که برابر با ۲/۸۷ MW خواهد بود. در هر یک از سناریوها، مقدار بار هر یک از شین‌ها به نسبت کل بار شبکه تغییر می‌کند. همچنین بار راکتیو نیز به نسبت تغییرات بار اکتیو در هر سناریو، دچار تغییر خواهد شد.

۴-۲ حالات مختلف شبیه سازی

به منظور بررسی تاثیر عوامل مختلف بر نتایج مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده با در نظر گرفتن ادوات FACTS، از سه مدل استفاده می‌شود که هر یک دارای سه حالت شبیه‌سازی می‌باشند. در مدل A، شبکه‌های انتقال و توزیع به صورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شوند. در این مدل، نقطه عمومی اتصال شبکه توزیع به شبکه انتقال، شین شماره ۶ شبکه انتقال است. در مدل B، شبکه انتقال

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

به صورت یک پست توزیع که متصل به شین‌های ۱ تا ۳ شبکه توزیع

		ولتاژ نقطه عمومی اتصال	تلفات توان اکتیو (p.u.)	شاخص انحراف ولتاژ (p.u.)	شاخص پایداری ولتاژ (p.u.)
مدل A	بدون FACTS	0.9668	0.0046	0.7443	0.1084
	TCSC	0.9726	0.0046	0.6497	0.1052
	SVC	0.9927	0.0044	0.3187	0.0958
مدل B	شین ۱	1.0000	0.0048	0.2147	0.1083
	شین ۲	1.0000	0.0049	0.2200	0.1213
	شین ۳	1.0000	0.0048	0.2204	0.1115
مدل C	بدون FACTS	0.9668	0.0046	0.7441	0.1083
	TCSC	0.9726	0.0046	0.6486	0.1052
	SVC	0.9927	0.0044	0.3192	0.0959

است، مدلسازی می‌شود. در سه حالت مختلف، شین‌های ۱ تا ۳ شبکه توزیع به عنوان شین مرجع (اسلک) در نظر گرفته خواهند شد. بنابراین در این مدل، نقطه عمومی اتصال شبکه توزیع به شبکه انتقال، شینی است که پست توزیع در آن قرار داشته و به شین‌های ۱ تا ۳ شبکه توزیع وصل شده است. در مدل C نیز از مدار معادل تونن استفاده می‌شود. بنابراین شبکه انتقال توسط پارامترهای امپدانس تونن و ولتاژ تونن مدلسازی می‌شود. با مقایسه نتایج حالات فوق، تاثیر انواع روش‌های مدلسازی شبکه انتقال به همراه تاثیر ادوات FACTS بر نتایج مسئله جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده روشن خواهد شد. علاوه بر این، باید مشخص گردد که نصب واحد تولید پراکنده و در نظر گرفتن عدم قطعیت بار مصرفی چه تاثیری بر نتایج مسئله دارد. بنابراین به طور کلی، سه مطالعه موردی به صورت زیر تعریف می‌شود. در هر مطالعه، تمامی ۹ حالت فوق مورد بررسی قرار خواهند گرفت:

- مطالعه موردی ۱: پیش از نصب تولید پراکنده
- مطالعه موردی ۲: نصب تولید پراکنده بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت (رویکرد قطعی)
- مطالعه موردی ۳: نصب تولید پراکنده با در نظر گرفتن عدم قطعیت (رویکرد تصادفی)

۴-۳ نتایج مطالعه موردی ۱ (پیش از نصب تولید پراکنده)

در مطالعه موردی اول، وضعیت شبکه توزیع پیش از نصب واحد تولید پراکنده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ابتدای این بخش، نتایج هر ۹ حالت شبیه‌سازی ارائه می‌گردد. سپس دقت مدلسازی شبکه انتقال توسط مدل‌های شبکه یکپارچه، شین اسلک و مدل تونن با یکدیگر مقایسه خواهد شد. در انتها نیز تاثیر ادوات FACTS بر نتایج مسئله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۳-۱ نتایج حالات مختلف شبیه سازی

شاخص‌های شبکه توزیع در حالات مختلف مطالعه موردی اول (پیش از نصب تولید پراکنده) در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس این شاخص‌ها، مقدار توابع هدف مسئله برای حالات مختلف محاسبه شده و در جدول (۲) نمایش داده شده است. دقت شود که برای تمامی توابع هدف فوق (تلفات، انحراف ولتاژ و پایداری ولتاژ)، هرچه مقدار تابع هدف کمتر باشد، مطلوب‌تر است. همچنین بر اساس توابع هدف فوق، مقدار تابع هدف کلی مسئله (J) نیز محاسبه شده و در این جدول ارائه شده است.

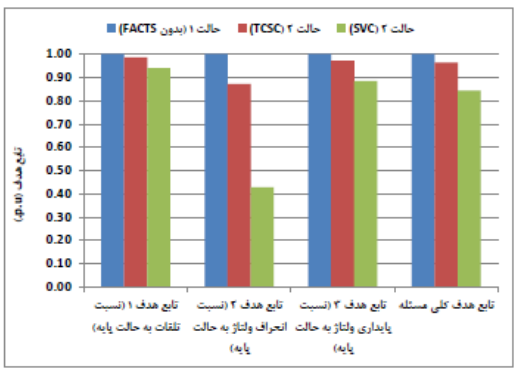
جدول (۱): شاخص‌های شبکه در حالات مختلف مطالعه موردی اول (پیش از نصب تولید پراکنده)

جدول(۲): توابع هدف مسئله در حالات مختلف مطالعه موردی اول (پیش از نصب تولید پراکنده)

		تابع هدف ۱ (p.u.)	تابع هدف ۲ (p.u.)	تابع هدف ۳ (p.u.)	تابع هدف کلی مسئله (p.u.)
مدل A	بدون FACTS	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	TCSC	0.9861	0.8728	0.9712	0.9639
	SVC	0.9399	0.4281	0.8846	0.8438
مدل B	شین ۱	1.0247	0.2884	0.9996	0.9055
	شین ۲	1.0485	0.2956	1.1197	0.9605
	شین ۳	1.0442	0.2961	1.0290	0.9267
مدل C	بدون FACTS	1.0000	0.9997	0.9999	0.9999
	TCSC	0.9859	0.8713	0.9708	0.9635
	SVC	0.9400	0.4288	0.8847	0.8440

۴-۳-۲ تاثیر ادوات FACTS بر نتایج مسئله

نمودار توابع هدف مسئله در حالات مختلف نیز در شکل(۶) رسم شده است. بررسی حالات ۲ و ۳ نشان‌گر این است که نصب ادوات FACTS در شبکه انتقال، عملکرد شبکه توزیع را نیز بهبود بخشیده است. همچنین این نتایج نشان‌گر این است که تاثیر SVC بر بهبود عملکرد شبکه توزیع، بیش از TCSC بوده است.



شکل(۶): نمودار توابع هدف برای حالات مختلف ادوات FACTS در مطالعه موردی اول

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

۴-۴ نتایج مطالعه موردی ۲ (نصب تولید پراکنده در رویکرد قطعی)

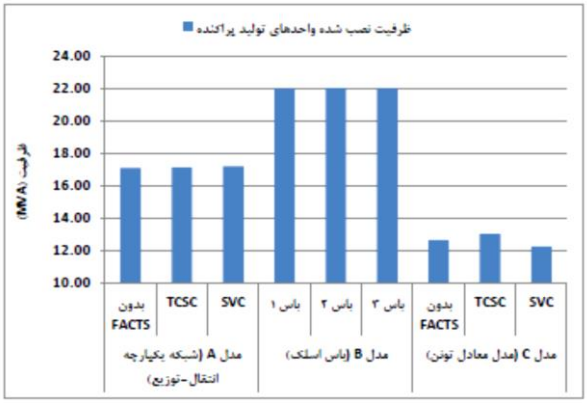
در مطالعه موردی دوم، نتایج حاصل از نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع در رویکرد قطعی (بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت) ارائه و تحلیل خواهد شد. در ابتدا نتایج نصب تولید پراکنده ارائه می شود. سپس تاثیر تولید پراکنده بر شاخص‌های شبکه توزیع و توابع هدف مسئله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۴-۱ نتایج نصب تولید پراکنده

نتایج نصب تولید پراکنده در حالات مختلف مطالعه موردی دوم در جدول(۳) ارائه شده است. در این جدول مقادیر متغیرهای مسئله برای نصب واحد تولید پراکنده در حالات مختلف ارائه شده است. همچنین در ستون آخر این جدول، مقدار ظرفیت کل واحد تولید پراکنده (S_{DG}^{size}) بر حسب MVA ارائه شده است که محاسبه آن توسط رابطه $S_{DG}^{size}=\sqrt{P_{DG}^{size^2}+Q_{DG}^{size^2}}$ صورت گرفته است. نمودار ظرفیت کل واحد تولید پراکنده در حالات مختلف نیز در شکل(۷) رسم شده است. بررسی جدول و شکل مذکور بیان‌گر نکات زیر می‌باشد:

جدول (۳): نتایج نصب تولید پراکنده در حالات مختلف مطالعه موردی دوم

		شماره شین	ظرفیت توان اکتیو (MW)	ظرفیت توان راکتیو (MVAr)	ظرفیت کل (MVA)
مدل A	بدون FACTS	9	17.05	1.62	17.13
	TCSC	9	17.08	1.53	17.15
	SVC	9	17.15	1.50	17.22
مدل B	شین ۱	9	22.00	0.71	22.01
	شین ۲	9	22.00	1.06	22.03
	شین ۳	9	22.00	0.60	22.01
مدل C	بدون FACTS	9	12.60	1.27	12.66
	TCSC	9	12.98	1.28	13.04
	SVC	9	12.23	1.14	12.28



شکل(۷): نمودار ظرفیت نصب شده واحد تولید پراکنده در حالات مختلف مطالعه موردی دوم

۴-۴-۲ تاثیر تولید پراکنده بر شاخص‌های شبکه

شاخص‌های شبکه در حالات مختلف مطالعه موردی دوم (پس از نصب تولید پراکنده) در جدول(۴) ارائه شده است.

جدول(۴): شاخص‌های شبکه در حالات مختلف مطالعه موردی دوم

		ولتاژ نقطه عمومی اتصال	تلفات توان اکتیو	شاخص انحراف ولتاژ	شاخص پایداری ولتاژ
مدل A	بدون FACTS	0.9711	0.0014	0.5506	0.0832
	TCSC	0.9783	0.0014	0.4340	0.0817
	SVC	0.9987	0.0013	0.1039	0.0777
مدل B	شین ۱	1.0000	0.0014	0.1001	0.0850
	شین ۲	1.0000	0.0014	0.0990	0.0873
	شین ۳	1.0000	0.0014	0.1009	0.0840
مدل C	بدون FACTS	1.0116	0.0014	0.0782	0.0753
	TCSC	1.0117	0.0014	0.0830	0.0752
	SVC	1.0331	0.0014	0.4257	0.0715

۴-۴-۳ تاثیر تولید پراکنده بر توابع هدف مسئله

مقادیر به دست آمده برای توابع هدف مسئله در حالات مختلف مطالعه موردی دوم در جدول(۵) ارائه شده است.

جدول(۵): توابع هدف مسئله در حالات مختلف مطالعه موردی دوم

		تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	تابع هدف ۳	تابع هدف کلی
مدل A	بدون FACTS	0.3076	0.7398	0.7683	0.5337
	TCSC	0.3028	0.5831	0.7538	0.5027
	SVC	0.2893	0.1396	0.7175	0.4167
مدل B	شین ۱	0.3063	0.1345	0.7844	0.4479
	شین ۲	0.3070	0.1331	0.8054	0.4553
	شین ۳	0.3088	0.1356	0.7755	0.4461
مدل C	بدون FACTS	0.3090	0.1051	0.6946	0.4134
	TCSC	0.3030	0.1114	0.6944	0.4113
	SVC	0.3012	0.5719	0.6602	0.4675

همانطور که انتظار می‌رود، به دلیل اینکه نصب واحدهای تولید پراکنده موجب کاهش تلفات در شبکه توزیع شده است، نصب این واحدها مقدار هر سه تابع هدف را برای تمامی حالات شبیه‌سازی کاهش داده است.

۴-۵ نتایج مطالعه موردی ۳ (نصب تولید پراکنده در رویکرد تصادفی)

در مطالعه موردی سوم، نتایج حاصل از نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع در رویکرد تصادفی (با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار مصرفی) ارائه و تحلیل خواهد شد. ابتدا نتایج نصب تولید پراکنده ارائه می شود. سپس تاثیر تولید پراکنده بر شاخص‌های شبکه توزیع و توابع هدف مسئله مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در انتها نیز تاثیر عدم قطعیت بر نتایج مسئله بررسی و تحلیل خواهد شد.

۴-۵-۱ نتایج نصب تولید پراکنده

نتایج نصب تولید پراکنده در حالات مختلف مطالعه موردی سوم در جدول(۶) ارائه شده است

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

جدول(۶): نتایج نصب تولید پراکنده در حالات مختلف مطالعه موردی سوم

		ظرفیت توان اکتیو (MW)	شماره شین	ظرفیت توان راکتیو (MVAr)	ظرفیت کل (MVA)
مدل A	بدون FACTS	16.94	9	2.90	17.19
	TCSC	17.45	9	2.86	17.68
	SVC	16.97	9	4.06	17.45
مدل B	شین ۱	22.00	9	1.75	22.07
	شین ۲	22.00	9	1.96	22.09
	شین ۳	22.00	9	1.84	22.08
مدل C	بدون FACTS	15.41	9	2.74	15.65
	TCSC	15.43	9	2.73	15.67
	SVC	14.27	9	2.32	14.46

همانطور که مشاهده می‌شود، در رویکرد تصادفی نیز مشابه با رویکرد قطعی، در تمامی حالات شبیه‌سازی، شین شماره ۹ به عنوان مکان نصب واحد تولید پراکنده انتخاب شده است.

۴-۵-۲ تاثیر تولید پراکنده بر شاخص‌های شبکه

نتایج به دست آمده برای شاخص‌های شبکه توزیع در حالات مختلف مطالعه موردی سوم، برای حالت پس از نصب تولید پراکنده در جدول(۷) ارائه شده است.

جدول(۷): شاخص‌های شبکه در حالات مختلف مطالعه موردی سوم

		ولتاژ نقطه عمومی اتصال	تلفات توان اکتیو	شاخص انحراف ولتاژ	شاخص پایداری ولتاژ
مدل A	بدون FACTS	0.9720	0.0017	0.5307	0.0934
	TCSC	0.9792	0.0016	0.4113	0.0921
	SVC	0.9994	0.0015	0.1142	0.0843
مدل B	شین ۱	1.0000	0.0015	0.0972	0.0905
	شین ۲	1.0000	0.0015	0.0973	0.0923
	شین ۳	1.0000	0.0015	0.0987	0.0901
مدل C	بدون FACTS	1.0204	0.0015	0.4161	0.0832
	TCSC	1.0184	0.0015	0.3642	0.0830
	SVC	1.0390	0.0015	0.5507	0.0793

نصب تولید پراکنده در مدل‌های A و C ولتاژ نقطه عمومی اتصال به شبکه انتقال را بهبود داده است. در مدل B (شین اسلک) به دلیل اینکه ولتاژ شین اسلک همواره برابر با یک پریونیت در نظر گرفته می‌شود، نصب تولید پراکنده بر ولتاژ نقطه عمومی اتصال تاثیری نداشته است.

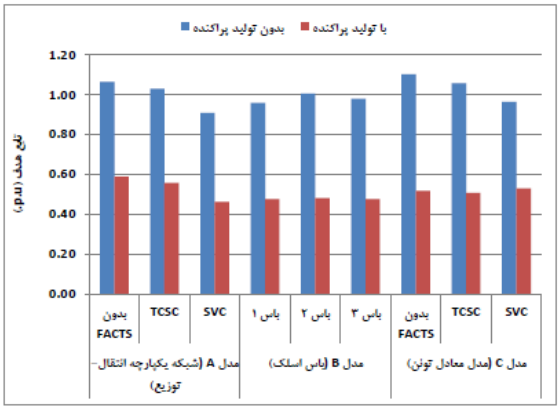
۴-۵-۳ تاثیر تولید پراکنده بر توابع هدف مسئله

نتایج به دست آمده برای توابع هدف مسئله در حالات مختلف مطالعه موردی سوم برای حالت پس از نصب واحدهای تولید پراکنده، در جدول(۸) ارائه شده است. نمودار تابع هدف کلی مسئله نیز برای حالات پیش و پس از نصب تولید پراکنده در شکل(۸) رسم شده است.

جدول(۸): توابع هدف مسئله در حالات مختلف مطالعه موردی سوم

		تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	تابع هدف ۳	تابع هدف کلی
مدل A	بدون FACTS	0.3573	0.7130	0.8622	0.5874
	TCSC	0.3533	0.5526	0.8503	0.5571
	SVC	0.3322	0.1534	0.7776	0.4613
مدل B	شین ۱	0.3249	0.1306	0.8356	0.4745
	شین ۲	0.3266	0.1307	0.8519	0.4810
	شین ۳	0.3282	0.1326	0.8316	0.4751
مدل C	بدون FACTS	0.3296	0.5590	0.7675	0.5173
	TCSC	0.3296	0.4892	0.7661	0.5063
	SVC	0.3241	0.7398	0.7320	0.5292

نصب واحدهای تولید پراکنده تقریبا در تمامی حالات موجب کاهش در مقادیر توابع هدف ۱ تا ۳ شده است. تنها در حالت سوم مدل C به دلیل افزایش ولتاژ نسبت به مقدار نامی، کمی افزایش در تابع هدف دوم رخ داده است.



شکل(۸): نمودار تابع هدف مسئله در حالات مختلف مطالعه موردی سوم

۴-۵-۳ تاثیر عدم قطعیت‌ها بر نتایج مسئله

در جدول(۹)، مقادیر تابع هدف کلی مسئله در رویکردهای قطعی و تصادفی در حضور واحدهای تولید پراکنده ارائه شده است. در ستون انتهایی این جدول نیز با مقایسه نتایج رویکرد تصادفی با رویکرد قطعی، تاثیر در نظر گرفتن عدم قطعیت بار مصرفی بر تابع هدف مسئله مشخص شده است.

جدول(۹): تاثیر در نظر گرفتن عدم قطعیت بر تابع هدف مسئله در حالات مختلف مطالعه موردی سوم

		تابع هدف در رویکرد قطعی	تابع هدف در رویکرد تصادفی	تاثیر عدم قطعیت (٪)
مدل A	بدون FACTS	0.5337	0.5874	10.06%
	TCSC	0.5027	0.5571	10.82%
	SVC	0.4167	0.4613	10.70%
مدل B	شین ۱	0.4479	0.4745	5.95%
	شین ۲	0.4553	0.4810	5.65%
	شین ۳	0.4461	0.4751	6.48%
مدل C	بدون FACTS	0.4134	0.5173	25.13%
	TCSC	0.4113	0.5063	23.11%
	SVC	0.4675	0.5292	13.21%

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

- همانطور که انتظار می‌رود، در تمامی حالات شبیه‌سازی در نظر گرفتن عدم قطعیت بار مصرفی موجب افزایش در تابع هدف مسئله شده است. به طور کلی وجود هرگونه عدم قطعیت، کارایی شبکه قدرت را کاهش می‌دهد بنابراین طبیعی است که در این مسئله، موجب افزایش در شاخص‌های تلفات، انحراف ولتاژ و پایداری ولتاژ شده و مقدار تابع هدف کلی مسئله را افزایش دهد. با این وجود این نتایج نشان می‌دهد که در صورت در نظر نگرفتن عدم قطعیت‌ها، تابع هدف مسئله کمتر از مقدار واقعی ارزیابی می‌شود و نتایجی گمراه‌کننده به همراه خواهد داشت.
- بیشترین افزایش در تابع هدف مسئله در حضور عدم قطعیت بار مصرفی، برای مدل C رخ داده که در آن از مدار معادل تونن استفاده شده است. کمترین افزایش نیز متعلق به مدل B می‌باشد که در آن از شین اسلک استفاده شده است. در مقایسه با حالت A، مشخص می‌شود که مدل C افزایش در تابع هدف مسئله را بیش از حد واقعی ارزیابی کرده و استفاده از مدل B موجب می‌شود تخمین تاثیر عدم قطعیت بر تابع هدف مسئله، کمتر از حد واقعی باشد.
- کمترین مقدار تابع هدف مسئله در رویکرد قطعی برای حالت دوم مدل C به دست آمده که در آن از TCSC استفاده شده است. کمترین مقدار تابع هدف در رویکرد تصادفی نیز متعلق به حالت سوم مدل A است که در آن از SVC استفاده شده است. بنابراین در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ادوات FACTS منجر به دست‌یابی به پاسخ‌هایی بهتر در مقایسه با عدم استفاده از آنها یا استفاده از مدل شین‌های اسلک شده است.

ظرفیت کل واحدهای تولید پراکنده نصب شده در شبکه توزیع در حالات مختلف شبیه‌سازی در دو رویکرد قطعی و تصادفی در جدول(۱۰) ارائه شده است. در ستون آخر این جدول تفاوت نتایج رویکرد تصادفی نسبت به رویکرد قطعی آورده شده است.

جدول(۱۰): تاثیر در نظر گرفتن عدم قطعیت بر ظرفیت نصب شده تولید پراکنده در حالات مختلف مطالعه موردی سوم

		ظرفیت کل در رویکرد قطعی (MVA)	ظرفیت کل در رویکرد تصادفی (MVA)	تاثیر عدم قطعیت (٪)
مدل A	بدون FACTS	17.13	17.19	0.35%
	TCSC	17.15	17.68	3.08%
	SVC	17.22	17.45	1.34%
مدل B	شین ۱	22.01	22.07	0.26%
	شین ۲	22.03	22.09	0.28%
	شین ۳	22.01	22.08	0.31%
مدل C	بدون FACTS	12.66	15.65	23.60%
	TCSC	13.04	15.67	20.16%
	SVC	12.28	14.46	17.71%

در هر دو رویکرد قطعی و تصادفی، کمترین ظرفیت نصب شده تولید پراکنده مربوط به مدل C بوده و بیشترین ظرفیت نصب شده، متعلق به مدل B می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که استفاده از مدل تونن موجب کاهش نیاز به نصب واحدهای تولید پراکنده شده و بنابراین هزینه کمتری را برای شبکه در پی خواهد داشت. از سوی دیگر، استفاده از شین‌های اسلک موجب افزایش نیاز به نصب واحدهای تولید پراکنده شده و از این طریق هزینه‌های بیشتری را به شبکه تحمیل خواهد کرد.

۶-۴ مقایسه نتایج تحقیق با مرجع[۱]

به منظور مقایسه نتایج تاثیر نصب واحد تولید پراکنده بر شبکه نمونه، توسط دو الگوریتم بهینه سازی PSO و HSCA-PSO جداول (۱۱) و (۱۲) ارائه شده اند.

جدول(۱۱) مقایسه نتایج نصب تولید پراکنده در رویکرد قطعی در حالات مختلف تحقیق و مرجع [۱]

		شماره باس محل نصب DG		ولتاژ نقطه عمومی اتصال		ظرفیت توان اکتیوDG (MW)		ظرفیت توان اکتیوDG (MW)	
		مقاله	مرجع ۱	مقاله	مرجع ۱	مقاله	مرجع ۱	مقاله	مرجع ۱
مدل A	بدون FACTS	9	9	0.9711	0.955	17.05	17.2244	1.62	8.92308
	TCSC	9	9	0.9783	0.951	17.08	17.1950	1.53	8.9164
	SVC	9	9	0.9987	0.988	17.15	17.380	1.50	9.0541
مدل B	شین ۱	9	9	1.000	1.000	22.00	1.7650	0.71	10.64461
	شین ۲	9	9	1.000	1.000	22.00	2.4019	1.06	7.26984
	شین ۳	9	9	1.000	1.000	22.00	1.0967	0.60	11.06967
مدل C	بدون FACTS	9	9	1.0116	0.957	12.60	17.3497	1.27	8.98848
	TCSC	9	9	1.0117	0.954	12.98	17.315	1.28	8.9887
	SVC	9	9	1.0331	0.989	12.23	17.7987	1.14	8.99264

- در تمامی حالات شین ۹ به عنوان محل نصب DG درنظر گرفته شده است.
- در نتایج این تحقیق بهترین حالت، استفاده همزمان از مدل C (مدل معادل تونن) و TCSC می باشد.
- در نتایج مرجع[۱] استفاده از SVC عملکرد بهتری در مقایسه با TCSC یا عدم نصب FACTS داشته‌اند.
- در اکثر حالات شاخص های مورد بررسی در تحقیق، دارای کاهش نسبت به مرجع [۱] می باشد.

جدول (۱۲) مقایسه نتایج نصب تولید پراکنده در رویکرد قطعی در حالات مختلف تحقیق و مرجع [۱]

		شاخص تلفات توان اکتیو		شاخص انحراف ولتاژ		شاخص پایداری ولتاژ	
		مقاله	مرجع ۱	مقاله	مرجع ۱	مقاله	مرجع ۱
مدل A	بدون FACTS	0.0014	0.00179	0.5506	0.63623	0.0832	0.18067
	TCSC	0.0014	0.0018	0.4340	0.697	0.0817	0.182
	SVC	0.0013	0.0017	0.1039	0.1057	0.0777	0.1691
مدل B	شین ۱	0.0014	0.00417	0.1001	0.19392	0.0850	0.17366
	شین ۲	0.0014	0.00385	0.0990	0.21013	0.0873	0.17553
	شین ۳	0.0014	0.004262	0.1009	0.19249	0.0840	0.17531
مدل C	بدون FACTS	0.0014	0.00195	0.0782	0.81662	0.0753	0.20128
	TCSC	0.0014	0.002	0.0830	0.8653	0.0752	0.2026
	SVC	0.0014	0.00184	0.4257	0.32971	0.0715	0.18897

۵- نتیجه‌گیری

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

در این مقاله، جایابی و تعیین اندازه بهینه تولید پراکنده با در نظر گرفتن ادوات FACTS و عدم قطعیت بار با استفاده از الگوریتم ترکیبی سینوس-کسینوس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (HSCA-PSO) انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱. نتایج به دست آمده نشان‌گر این است که استفاده از ادوات FACTS شامل TCSC و SVC در شبکه انتقال، در تمامی حالات شبیه‌سازی موجب بهبود وضعیت شبکه توزیع از منظر شاخص‌های تلفات، انحراف ولتاژ و پایداری ولتاژ شده است.

۲. مقایسه مدل‌های مختلف لحاظ کردن شبکه انتقال در مسئله نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع نشان داد که مدل معادل تونن از منظر تابع هدف مسئله، ولتاژ نقطه عمومی اتصال به شبکه انتقال و پروفیل ولتاژ شبکه توزیع، با دقت بالایی قادر به مدلسازی تاثیر شبکه انتقال و ادوات FACTS موجود در آن است. این در حالی است که استفاده از مدل شین اسلک قادر به در نظر گرفتن تاثیرات فوق بر شبکه توزیع نمی‌باشد.

۳. الگوریتم ترکیبی سینوس-کسینوس و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (HSCA-PSO) موفق شده ضمن حفظ قیود مسئله بهینه‌سازی، در تمامی حالات با کاهش تدریجی تابع هدف، به سمت پاسخ بهینه مسئله همگرا شود.

۴. در هر دو رویکرد قطعی و تصادفی، استفاده از مدل معادل تونن موجب دست‌یابی به کمترین ظرفیت تولید پراکنده شده و استفاده از مدل شین اسلک، بیشترین ظرفیت نصب شده تولید پراکنده را در پی داشته است. در نتیجه بکارگیری مدل تونن می‌تواند ضمن دست‌یابی به کارایی مورد نیاز برای شبکه توزیع، هزینه‌های مرتبط با نصب واحدهای تولید پراکنده را کاهش دهد. در این بین، کمترین ظرفیت در حالتی به دست آمده که از SVC در شبکه انتقال استفاده شده است.

۵. در هر دو رویکرد قطعی و تصادفی، نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع موجب بهبود وضعیت شبکه از منظر شاخص‌های تلفات، انحراف ولتاژ، پایداری ولتاژ و پروفیل ولتاژ شبکه شده است.

۶. در هر دو رویکرد قطعی و تصادفی، نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع موجب کاهش تابع هدف مسئله و در نتیجه بهبود کارایی شبکه توزیع شده است. کمترین مقدار تابع هدف در دو رویکرد قطعی و تصادفی به ترتیب در حالات استفاده از TCSC و SVC به دست آمده که نشان‌گر نقش مثبت ادوات FACTS در بهبود کارایی شبکه توزیع در حضور واحدهای DG است.

۷. همانطور که انتظار می‌رود، در نظر گرفتن عدم قطعیت در بار مصرفی توسط روش درخت سناریو، موجب افزایش در تابع هدف مسئله بهینه‌سازی شده و ظرفیت نصب شده واحدهای تولید پراکنده را افزایش داده است. این نتایج نشان‌گر این است که در صورت در نظر نگرفتن عدم قطعیت بار مصرفی، مقدار تابع هدف مسئله و ظرفیت نصب شده واحدهای تولید پراکنده، کمتر از مقدار حقیقی برآورد می‌شود و همین موضوع موجب کاهش کارایی شبکه در مواجهه با عدم قطعیت‌ها خواهد شد. بنابراین عدم قطعیت بار مصرفی تاثیر زیادی بر نتایج مسئله داشته و در نظر گرفتن آن موجب افزایش دقت در مدلسازی مسئله می‌شود.

سپاسگزاری

از حمایت علمی اساتید گرامی دانشگاه آزاد اسلامی دزفول در تدوین این مقاله خصوصاً اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر حسن براتی و جناب آقای دکتر افشین لشکرآرا کمال سپاسگزاری بعمل می‌آید.

مراجع

[1] *A.A.Sadiq, S.S.Adamu, M.Buhari, 2018 ''Optimal distributed generation planning in distribution networks: A comparison of transmission network models with FACTS'', Engineering Science and Technology, an International Journal, In Press, Corrected Proof, Available online 11 October.*

[2] *H. Nenavath, R.K. Jatoth, S. Das, 2018 "A synergy of the sine-cosine algorithm and particle swarm optimizer for improved global optimization and object tracking", Swarm and Evolutionary Computation, Vol. 43, pp. 1-30.*

[3] *B. Singh, V. Mukherjee, P. Tiwari, 2015 "A survey on impact assessment of DG and FACTS controllers in power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 42, pp. 846-882.*

[4] *G. Arcia-Garibaldi, P. Cruz-Romero, A. Gómez-Expósito, 2018 "Future power transmission: Visions, technologies and challenges", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 94, pp. 285-301.*

[5] *F.H. Gandoman, A. Ahmadi, A.M. Sharaf, P. Siano, J. Pou, B. Hredzak, V.G. Agelidis, 2018 "Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, pp. 502-514.*

[6] *C. Amos, J.J. Vandu, D.M. Gyathi, J. Usman, S.Y.Musa, 2018 "Power System Stability and Quality Improvement using FACTS Devices", Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment, Vol. 14, pp. 125-133.*

[7] *N. Singh, P. Agnihotri, 2018 "Power system stability improvement using FACTS devices", International Journal of Advance Research and Development, Vol. 3, pp. 171-176.*

[8] *A.Z. Jordehi, , 2016 "Allocation of distributed generation units in electric power systems: A*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 56, pp. 893-905.

[9] P. Prakash, D.K. Khatod, 2016 "Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 57, pp. 111-130.

[10] L.Mehigan, J.P.Deane, B.P.Ó.Gallachóir, V.Bertsch, 2018 "A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems", Energy, Vol. 163, pp. 822-836.

[11] A.K.Singh, S.K.Parida, 2018 "A review on distributed generation allocation and planning in deregulated electricity market", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, pp. 4132-4141.

[12] M. Pesaran, P.D. Huy, V.K. Ramachandaramurthy, 2017 "A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 75, pp. 293-312.

[13] W.L. Theo, J.S. Lim, W.S. Ho, H. Hashim, C.T. Lee, 2017 "Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 67, pp. 531-573.

[14] S. Kabir, O. Krause, S. Bartlett, 2013 "Impact of large-scale photovoltaic system on short and long term voltage stability in sub transmission network", Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC, pp. 1–6.

[15] H. Musa, B. Usman, S.S. Adamu, 2013 "Improvement of voltage stability index using distributed generation for Northern Nigeria sub-transmission region", Int. Conf. Comput. Electr. Electron. Eng. Improv., pp. 410–412.

[16] S. Dahal, H. Salehfar, 2016 "Impact of distributed generators in the power loss and voltage profile of three phase unbalanced distribution network", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 77, pp. 256–262.

[17] M. Jamil, A.S. Anees, 2016 "Optimal sizing and location of SPV (solar photovoltaic) based MLDG (multiple location distributed generator) in distribution system for loss reduction, voltage profile improvement with economical benefits", Energy, Vol. 103, pp. 231–239.

[18] S.A. Chithra, L. Lakshminarasimman, R. Balamurugan, 2017 "Stud Krill herd Algorithm for multiple DG placement and sizing in a radial distribution system", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 20, pp. 748-759.

[19] Y. Thangaraj, R. Kuppan, 2017 "Multi-objective simultaneous placement of DG and DSTATCOM using novel lightning search algorithm", Journal of Applied Research and Technology, Vol. 15, pp. 477-491.

[20] F. Iqbal, M.T. Khan, A.S. Siddiqui, 2018 "Optimal placement of DG and DSTATCOM for loss reduction and voltage profile improvement", Alexandria Engineering Journal, Vol. 57, pp. 755-765.

[21] D.B. Prakash, C. Lakshminarayana, 2018 "Multiple DG placements in radial distribution system for multi objectives using Whale Optimization Algorithm", Alexandria Engineering Journal, In Press, Corrected Proof, Available online 15 November.

[22] U. Sultana, A.B. Khairuddin, B. Sultana, N. Rasheed, S.H. Qazi, 2018 "Placement and sizing of multiple distributed generation and battery swapping stations using grasshopper optimizer algorithm", Energy, Vol. 165, pp. 408-421.

[23] S. Sannigrahi, P. Acharjee, 2018 "Maximization of System Benefits with the Optimal Placement of DG and DSTATCOM Considering Load Variations", Procedia Computer Science, Vol. 143, pp. 694-701.

[24] D.P. Reddy, V. Reddy, G. Manohar, 2018 "Optimal renewable resources placement in distribution networks by combined power loss index and whale optimization algorithms", Journal of Electrical Systems and Information Technology, Vol. 5, pp. 175-191.

[25] H. Xing, H. Fan, X. Sun, S. Hong, H. Cheng, 2018 "Optimal Siting and Sizing of Distributed Renewable Energy in an Active Distribution Network", CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS, Vol. 4, pp. 380-387,.

[26] H. HassanzadehFard, A. Jalilian, 2018 "Optimal sizing and location of renewable energy based DG units in distribution systems considering load growth", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 101, pp. 356-370.

[27] O.D. Melgar-Dominguez, M. Pourakbari-Kasmaei, J.R.S. Mantovani, 2019 "Adaptive Robust Short-Term Planning of Electrical Distribution Systems Considering Siting and Sizing of Renewable Energy-based DG Units", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 10, pp. 158-169.

[28] M. Abdelazi, M. Moradzadeh, 2019 "Monte-Carlo simulation based multi-objective optimum allocation of renewable distributed generation using OpenCL", Electric Power Systems Research, Vol. 170, pp. 81-91.

[29] E. kianmehr, S. Nikkhah, A. Rabiee, 2019 "Multi-Objective Stochastic Model for Joint Optimal Allocation of DG Units and Network Reconfiguration from DG Owner's and DisCo's Perspectives", Renewable Energy, Vol. 132, pp. 471-485.

[30] S. Kumar, Kamal K. Mandal, N. Chakraborty, 2019 "Optimal DG placement by multi-objective opposition based chaotic differential evolution for techno-economic analysis", Applied Soft Computing Journal, Vol. 78, pp. 70-83.

[31] M.H. Haque, "Novel method of assessing voltage stability of a power system using stability boundary in P/Q plane", Electric Power Systems Research, Vol. 64, pp. 35-40.

[32] A. Rabiee, M. Sadeghi, J. Aghaei, A. Heidari, 2016 "Optimal operation of microgrids through simultaneous scheduling of electrical vehicles and responsive loads considering wind and PV units uncertainties", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 57, pp. 721-739.

[33] Z. Bao, Q. Zhou, Z. Yang, Q. Yang, L. Xu, T. Wu, 2015 "A Multi Time-Scale and Multi Energy-Type Coordinated Microgrid Scheduling Solution—Part I: Model and Methodology", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, pp. 2257-2266.

[34] M.Z. Oskouei, A. Sadeghi-Yazdankhah, 2015 "Scenario-based stochastic optimal operation of wind, photovoltaic, pump-storage hybrid system in

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

frequency- based pricing", Energy Conversion and Management, Vol. 105, pp. 1105-1114.

[35] S. Mirjalili, 2016 "SCA: a Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems", Knowledge-Based Systems, Vol. 96, pp. 120–133.

[36] R. Eberhart, J. Kennedy, 1995 "A new optimizer using particle swarm theory", Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, pp. 39–43.

[37] X. Yu, X. Zhang, 2014 "Unit commitment using Lagrangian relaxation and particle swarm optimization", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 61, pp. 510-522.

[38] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, R. J. Thomas, 2011"MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, pp. 12-19.

[39] P. Subburaj, K. Ramar, L. Ganesan, P. Venkatesh, 2006 "Distribution system reconfiguration for loss reduction using genetic algorithm", Joutnal of Electrical Systems, Vol. 2, pp. 198–207.

رزومه



احسان قناعتی در دزفول متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی در مقطع کارشناسی برق گرایش الکترونیک را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر(۱۳۸۴)و مقطع کارشناسی ارشد برق- قدرت را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۹۹) گذرانده است. زمینه‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان ادوات FACTS، الکترونیک قدرت و بررسی و کنترل توان راکتیو در شبکه‌های انتقال نیرو می‌باشد.



حسن براتی در دزفول متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۷۱)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تبریز (۱۳۷۵)، و دکتری مهندسی برق-قدرت از واحد علوم و تحقیقات تهران (۱۳۸۷)سپری کرده است. فعالیت های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در بهره برداری و قابلیت اطمینان سیستم های قدرت، ریزشبکه ها و شبکه های هوشمند، زمینه ادوات FACTS، و بازار برق است و در حال حاضر دانشیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

Optimal placement and sizing of distributed generation considering FACTS devices and load uncertainty using hybrid sine-cosine algorithm and particle swarm optimization (HSCA-PSO)

Ehsan GHenaati [1,3], Hassan Barati [2,*]

1- MSc student, Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
2- Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
3- Expert of Khuzestan Regional Electricity Company, Ahvaz, Iran

Abstract: **Using Distributed Generation (DG) in electrical distribution networks brings many advantages and thus, optimal placement and sizing of these units become important. Most of the researches in this field neglect the effect of transmission system on distribution section. These researches also ignore the effect of Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS). This thesis proposes a new method for optimal placement and sizing of distributed generation considering FACTS devices. In this method, Thevenin's equivalent model is used to model transmission section include FACTS devices and the results are compare to integrated transmission-distribution network and slack bus models. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) and Static VAR Compensator are used for this goal. As an innovation, uncertainty of electrical load is considered using scenario tree method. Optimisation problem is defined as minimizing a combinatory objective function which includes power loss, voltage deviation and voltage stability indexes. As another innovation, optimization problem is solved using hybrid sine-cosine algorithm and particle swarm optimization (HSCA-PSO) method. Simulation is carried out on IEEE 9 and 16 bus transmission-distribution test system in MATLAB software. Simulation results show that using FACTS in transmission section and DG in distribution section both leads to objective function reduction and therefore improves network performance in the terms of losses, voltage deviation and voltage stability indexes. Results indicate that Thevenin's equivalent model has better performance in the comparison to slack bus model in modeling transmission section and FACTS devices. Results also illustrate that uncertainties increase the installed capacity of DG units and ignoring uncertainty can leads to wrong solutions.**

Keywords: **Distributed Generation; Flexible Alternating Current Transmission Systems; Thevenin's equivalent model; Scenario tree method; hybrid sine-cosine algorithm and particle swarm optimizations.**

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.1.8]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.2 Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]