

طراحی بهینه و مقایسه یک شبکه توزیع AC خالص یا AC/DC ترکیبی: مطالعه موردی برای یک منطقه شهری و یک شهرک صنعتی

رضا خلیلزاده^۱ محمودرضا حقیفام^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران

r.khalilzadeh@modares.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران

haghifam@modares.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی شبکه‌های توزیع ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی به دنبال حصول دو هدف اصلی است: (۱) کمینه‌کردن هزینه‌ی تمام‌شده و (۲) کمینه‌کردن انرژی تأمین‌نشده موردانتظار^۱. در روش پیشنهادی، باس‌ها و فیدرهای شبکه می‌توانند بسته به نتیجه‌ی حاصل از بهینه‌سازی AC یا DC باشند. به منظور مدل کردن تغییرات تصادفی مربوط به تقاضای بار و میزان تولید منابع تولید پراکنده موجود، از شبیه‌سازی مونت کارلو^۲ استفاده شده است. مسئله طراحی موردنظر با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه حل می‌شود و با استفاده از اصل بهینگی پارتو و ایجاد مصالحه بین هزینه‌های تمام‌شده و انرژی تأمین‌نشده موردانتظار، پاسخ بهینه حاصل خواهد شد. روش پیشنهادی، در دو حالت روی یک شبکه ۱۴ باسه متشکل از نقاط بار AC و DC، منابع تولید پراکنده با خروجی AC و DC مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در حالت اول یک منطقه شهری و در حالت دوم، یک شهرک صنعتی مد نظر است که برخی نقاط بار آن هزینه خاموشی بالایی دارند. پس از حل مسئله طراحی به صورت AC خالص و AC/DC ترکیبی، برخی خروجی‌ها مانند هزینه تمام‌شده، انرژی تأمین‌نشده، تلفات و یک شاخص قابلیت اطمینان مانند متوسط زمان خاموشی سالانه هر مشترک در این دو طرح مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

واژه‌های کلیدی: طراحی شبکه توزیع، قابلیت اطمینان، بهینه‌سازی چندهدفه، شبکه‌های توزیع ترکیبی AC/DC، منابع تولید پراکنده، شبکه‌های توزیع هیبرید

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.77

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: محمودرضا حقیفام

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران - بزرگراه جلال آل احمد - دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

طراحی بهینه شبکه‌های توزیع همواره یکی از دغدغه‌های اصلی فعالان دانشگاهی و صنعتی در حوزه برق بوده است [۱]. به دلیل گسترش منابع تولید پراکنده با خروجی DC (مانند سلول‌های خورشیدی و انواع باتری‌ها)، کاهش روزافزون منابع سوخت فسیلی، افزایش گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر و نیز ظهور بیش از پیش بارهایی با تغذیه DC، طراحان شبکه‌های توزیع تمایل ویژه‌ای به استفاده از پیکربندی‌های DC نشان داده‌اند [۲]. به عنوان مثال ظرفیت سلول‌های خورشیدی تحت بهره‌برداری در دنیا در سال ۲۰۲۰ به بیش از ۶۰۰ گیگاوات رسیده است [۳] و [۴] و تعداد خودروهای برقی مورد استفاده در سرتاسر جهان از ۲۰ میلیون نیز تجاوز می‌کند [۵]. یکی دیگر از عوامل مهم تمایل به استفاده از منابع تولید پراکنده DC، سیاست‌گذاری‌های تشویقی در حوزه انرژی است [۶]. به همین دلایل نمی‌توان شبکه‌های توزیع آینده که متشکل از تعداد قابل توجهی بار و منابع تولید پراکنده DC هستند را مانند شبکه‌های توزیع مرسوم فعلی، مطلقاً AC تصور کرد. در همین راستا در این مقاله یک روش جدید برای طراحی یک شبکه توزیع متناسب با منابع تولید پراکنده و بارهای موجود در یک منطقه ارائه شده است.

به طور کلی ادبیات حوزه طراحی شبکه‌های توزیع در دو سطح کلی انجام می‌شود. طراحی‌ها یا برای منطقه‌ای جدید و یا برای گسترش یک شبکه توزیع که از قبل موجود است صورت می‌گیرند. طبق روش پیشنهادی [۷]، یک راه ساده برای مسیریابی بهینه و تعیین ظرفیت فیدرهای فشار متوسط در یک شبکه‌ی توزیع شعاعی، روش برنامه‌ریزی پویا^۳ به کمک روش مارکوف^۴ است. نویسندگان [۸] از الگوریتم ژنتیک چند هدفه به منظور طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی توزیع AC برای یک منطقه‌ی خالی یا توسعه‌ی یک شبکه‌ی توزیع از پیش طراحی شده استفاده کرده‌اند. نویسندگان [۹] با استفاده از روش برنامه‌نویسی غیرخطی، مسئله‌ی طراحی بهینه‌ی یک شبکه‌ی توزیع AC را حل کرده‌اند. در [۱۰]، از یک روش مستقیم مبتنی بر نظریه‌ی بهینگی^۵ به منظور مسیریابی بهینه فیدرهای فشار متوسط AC استفاده شده است.

نویسندگان [۱۱] از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها^۶ به منظور طراحی بهینه‌ی یک شبکه‌ی توزیع فشار متوسط AC استفاده کرده‌اند. این طراحی شامل طراحی شبکه‌ای جدید و یا توسعه‌ی یک شبکه‌ی موجود می‌باشد. نویسندگان [۱۲] از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده^۷ به منظور طراحی بهینه‌ی یک شبکه‌ی توزیع AC استفاده کرده‌اند. در تابع هدف این مقاله با در نظر گرفتن این نکته که موقعیت و ظرفیت پست‌ها از قبل تعیین شده، هزینه‌ی احداث فیدرها و تلفات مدل شده است. در [۱۳]، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات گسسته^۸ به منظور رسیدن به پاسخ بهینه برای تابع هدف استفاده کرده است. در [۱۴] پیشنهادی یکپارچه به منظور توسعه‌ی یک

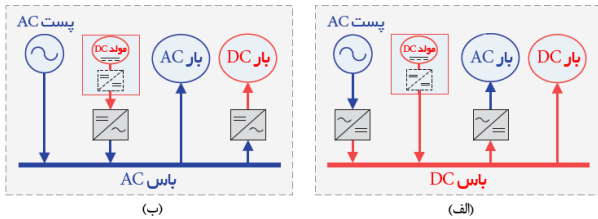
شبکه‌ی توزیع AC ارائه کرده است. این طرح پیشنهادی با کمک الگوریتم ژنتیک اجرا شده و احتمال وجود منابع تولید پراکنده را نیز در نظر گرفته است.

نویسندگان [۱۵] و [۱۶] با هدف توجه به عدم قطعیت مربوط به شهرسازی، نقاط بار را به صورت مستقیم وارد مسئله‌ی مسیریابی فیدرهای فشار متوسط AC نکرده‌اند. به این معنا که در این مقاله، نقاطی با عدم قطعیت پایین و دسترسی به عنوان نقاط پاساژی^۹ در نظر گرفته شده‌اند که نماینده‌ی تعدادی از نقاط بار هستند. در [۱۷]، از یک روش چندمرحله‌ای بهینه‌سازی و ترکیب دو روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات و جهش ترکیبی قورباغه^{۱۰} برای طراحی شبکه توزیع AC استفاده شده است.

نویسندگان [۱۸] و [۱۹] و با استفاده از الگوریتم ژنتیک روی طراحی یک شبکه‌ی توزیع ترکیبی AC/DC که دارای منابع تولید پراکنده و بارهای AC و DC خانگی و تجاری است، در سطح فشار قوی و فشار متوسط کار کرده‌اند. نویسندگان [۲۰]، روی مسیریابی فیدرهای فشار متوسط AC با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تغذیه‌ی باکتریایی^{۱۱} کار کرده‌اند. نویسندگان [۲۱] با فرض این که موقعیت‌یابی و ظرفیت‌یابی پست‌های توزیع و فوق توزیع و پیش‌بینی بار از قبل انجام شده، با استفاده از الگوریتم چند مرحله‌ای رقابت امپریالیستی^{۱۲} و از دو روش به مسیریابی فیدرهای فشار متوسط با توجه به عدم قطعیت پیش‌بینی بار انجام شده، پرداخته‌اند. در [۲۲] از یک روش تصادفی جدید برای طراحی شبکه‌ی توزیع ترکیبی AC/DC استفاده شده است. این روش با در نظر گرفتن احتمال این که هر شین یا خط می‌تواند AC یا DC باشد، پیکربندی بهینه‌ی ترکیبی AC/DC شین‌ها و خطوط را پیدا می‌کند.

نویسندگان [۲۳] و [۲۴] روشی برای طراحی یک شبکه‌ی توزیع هیبرید AC/DC و مقایسه‌ی آن با یک شبکه‌ی توزیع AC مرسوم از نظر هزینه‌ی تمام شده، قابلیت اطمینان و تلفات ارائه کرده‌اند. در این مقاله از روش درخت پوشای مینیم^{۱۳} برای مسیریابی فیدرها استفاده شده است. در [۲۵]، با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده‌ی تجدیدپذیر و معیار امنیتی N-1، یک روش سیستماتیک مبتنی بر MISOPC^{۱۴} برای توسعه‌ی شبکه‌ی توزیع AC/DC پیشنهاد شده است.

نویسندگان [۲۲]، در [۲۶] خلاء تحقیقاتی کار قبلی خودشان را پوشش داده‌اند و روشی پیشنهاد کرده‌اند که علاوه بر کمینه‌کردن هزینه‌ی احداث و بهره‌برداری از شبکه‌ی توزیع ترکیبی AC/DC، امکان بیشینه‌کردن قابلیت اطمینان شبکه نیز در آن فراهم است. در [۲۷] یک روش احتمالی به منظور اجرای پخش بار بهینه روی یک شبکه توزیع AC/DC متشکل از نقاط بار AC و DC، سلول‌های خورشیدی و ایستگاه‌های شارژ خودرو برقی پیشنهاد شده است. نویسندگان [۲۸] علاوه بر پیشنهاد روشی برای اجرای پخش بار بهینه در شبکه‌های توزیع AC/DC به استفاده از آن در کنترل ثانویه شبکه پرداخته‌اند. در [۲۹] به ارائه‌ی یک روش جدید و ابتکاری برای حل



شکل (۱): انواع حالت‌های ممکن برای اتصال نقاط بار و منابع تولید پراکنده به باس‌ها

اگر یکی از درایه‌های آن ۱ باشد به معنی وجود اتصال بین دو باس متناظر و اگر ۰ باشد به معنی عدم اتصال بین دو باس است. در نهایت ماتریس D نیز که هم بعد با U است، نوع اتصال بین دو باس را نشان می‌دهد. اگر یکی از درایه‌های D برابر ۱ باشد، اتصال بین دو باس متناظر از نوع DC و اگر ۰ باشد از نوع AC خواهد بود.

۳- مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی

هدف از حل این مسئله بهینه‌سازی، کمینه‌کردن همزمان هزینه‌ی تمام‌شده طراحی و انرژی تأمین‌نشده موردانتظار در شبکه است. مسئله بهینه‌سازی تعریف‌شده در این مقاله یک مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی چندهدفه عددصحیح ترکیبی^{۱۵} است و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرغالب^{۱۶} حل می‌شود که در بخش ۴ تشریح خواهد شد. از آنجایی که حل چنین مسئله‌ای که عوامل و متغیرهای زیادی روی متغیرهای تصمیم آن اثرگذار هستند با حل یک مسئله بهینه‌سازی امکان‌پذیر نیست، باید مدل‌سازی و حل مسئله به صورت تو در تو انجام شود. به همین منظور در این مقاله یک مسئله اصلی و یک زیرمسئله تعریف شده است. تابع هدف و محدودیت‌های هر یک، در زیربخش‌های آتی ارائه می‌شوند.

۳-۱- مسئله بهینه‌سازی اصلی

۳-۱-۱- تابع هدف

هدف اصلی، کمینه‌کردن ارزش فعلی خالص^{۱۷} سیستم و به طور همزمان کمینه‌کردن مقدار انرژی تأمین‌نشده موردانتظار است. تابع هدف مذکور مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$\min C_{NPV}, EENS \quad (1)$$

که در آن

$$C_{NPV} = C_{INV} + \sum_{t \in T_p} \frac{C_{AOM,t}}{(1+d)^t} \quad (2)$$

$$C_{AOM,t} = 8760 \times (C_{OPF,s,t}) + \beta_m \times C_{INV} \quad (3)$$

نحوه محاسبه C_{INV} و $EENS$ در [۲۴] تشریح شده است.

در این روابط C_{INV} هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات، $C_{AOM,t}$ هزینه بهره‌برداری سالانه از شبکه در هر سال، d نرخ بهره، t مدت زمان برنامه‌ریزی، $C_{OPF,s,t}$ هزینه پخش بار بهینه هر

مسئله بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی شبکه‌های توزیع AC/DC و بهره‌برداری بهینه از آن‌ها پرداخته شده است.

نویسندگان [۳۰] با مدل‌سازی ترانسفورماتورهای حالت جامد (SST) به طراحی بهینه شبکه‌های توزیع AC/DC پرداخته‌اند. همچنین در [۳۰] با شبیه‌سازی واقعی ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت، روشی برای طراحی بهینه شبکه‌های توزیع AC/DC پیشنهاد شده است. [۳۱] با فرض وجود یک شبکه‌ی توزیع AC/DC ترکیبی، به ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه پرداخته است. نویسندگان [۳۲] با ارائه‌ی یک روش پیشنهادی که سرمایه‌گذاری منعطف نامیده‌اند، به توسعه‌ی یک شبکه‌ی توزیع هیبرید AC/DC پرداخته و به میزان قابل قبولی بر عدم قطعیت منابع تولید پراکنده و تقاضا غلبه کرده‌اند.

روش پیشنهادی در این مقاله برای طراحی شبکه به دنبال کاهش هزینه تمام‌شده، کاهش مقدار انرژی تأمین‌نشده و افزایش معیارهای قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن بارها و منابع تولید پراکنده موجود در منطقه تحت طراحی است. ساختار کلی این مقاله به صورت زیر قابل خلاصه‌سازی است: بخش ۲ به نحوه مدل‌کردن پیکربندی شبکه توزیع می‌پردازد. در بخش ۳ مسئله بهینه‌سازی به صورت تو در تو تعریف می‌شود و توابع هدف و محدودیت‌ها معرفی می‌شوند. روش بهینه‌سازی و روندنمای حل مسئله در بخش ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۵، با ارائه چند مورد مطالعاتی، روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نهایتاً در فصل ۶، مقاله جمع‌بندی شده است.

۲- پیکربندی شبکه توزیع

شبکه‌های توزیع شامل انواع مختلف بارهای AC و DC و منابع تولید پراکنده با خروجی‌های AC و DC هستند. به منظور ایجاد پیکربندی بهینه بین این نقاط بار و منابع تولید پراکنده، لازم است تا امکانی فراهم شود که طراحی شبکه توزیع بسته به وضعیت نقاط بار و منابع تولید پراکنده AC، DC یا AC/DC ترکیبی باشد. چنین شبکه‌ای شامل باس‌ها و فیدرها AC یا DC و نیز مبدل‌های AC به DC یا DC به AC خواهد بود. این نکته در شکل (۱) نشان داده شده است.

با توجه به اهداف تعریف‌شده در این مقاله، هدف اصلی از حل مسئله طراحی، یافتن پیکربندی بهینه AC/DC برای شبکه توزیع است. پیکربندی شبکه با سه ماتریس باینری W ، U و D تعریف می‌شود [۲۰] که در حقیقت متغیرهای تصمیم هستند. ماتریس W با ابعاد N_b در ۱ تعیین‌کننده نوع هر باس است. اگر هر درایه از این ماتریس برابر ۱ باشد، نوع باس متناظر DC و در صورتی که برابر ۰ باشد، نوع باس متناظر AC است. ماتریس U با ابعاد N_b در N_b تعیین‌کننده اتصال یا عدم اتصال دو باس به یکدیگر است.

در این روابط، $P_{G_i}^{ac-min}$ و $P_{G_i}^{ac-max}$ حداقل و حداکثر توان اکتیو AC قابل تولید، $P_{G_j}^{dc-min}$ و $P_{G_j}^{dc-max}$ حداکثر توان DC قابل تولید و $Q_{G_i}^{ac-min}$ و $Q_{G_i}^{ac-max}$ حداقل و حداکثر توان راکتیو AC قابل تولید توسط هر منبع توان هستند.

از دیگر محدودیت‌های حائز اهمیت در حل زیرمسئله بهینه‌سازی، موازنه توان اکتیو و راکتیو در هر باس است؛ به این معنا که میزان توان اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرفی در هر باس باید با هم برابر باشند. این قیود به صورت (۱۳) و (۱۴) تعریف می‌شوند:

$$P_n^{inj} = P_n^{cal}, \quad \forall n \in \mathbb{N}_b \quad (13)$$

$$Q_n^{inj} = Q_n^{cal}, \quad \forall n \in \mathbb{N}_b \quad (14)$$

نحوه محاسبه توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی و مصرفی هر باس در [۳۱] تشریح شده است. P_n^{inj} توان اکتیو تزریقی، P_n^{cal} توان اکتیو مصرفی، Q_n^{inj} توان راکتیو تزریقی و Q_n^{cal} توان راکتیو مصرفی در هر باس هستند.

محدودیت‌های دیگری از جمله محدودیت‌های اندازه و زاویه ولتاژ هر باس و همچنین حداکثر ظرفیت مجاز خطوط هستند که به صورت (۱۵) تا (۱۸) تعریف می‌شوند:

$$V_n^{\min} \leq V_n \leq V_n^{\max}, \quad \forall n \in \mathbb{N}_b \quad (15)$$

$$\theta_n^{\min} \leq \theta_n \leq \theta_n^{\max}, \quad \forall n \in \mathbb{N}_b \quad (16)$$

$$S_{nm} \leq S_{nm}^{\max}, \quad \forall n, m \in \mathbb{N}_b \quad (17)$$

$$S_{nm} = \sqrt{P_{nm}^2 + Q_{nm}^2} \quad (18)$$

در این روابط V_n^{\min} و V_n^{\max} حداقل و حداکثر اندازه ولتاژ مجاز هر باس، θ_n^{\min} و θ_n^{\max} حداقل و حداکثر زاویه ولتاژ مجاز هر باس و S_{nm}^{\max} حداکثر توان ظاهری قابل عبور از هر فیدر هستند.

مبدل‌ها نیز محدودیت‌هایی دارند که باید حین حل مسئله به آن‌ها توجه شود. قیود مربوط به مبدل‌ها در (۱۹) تا (۲۱) ارائه شده است:

$$S_c \leq S_c^{\max}, \quad \forall c \in \mathbb{N}_c \quad (19)$$

$$M_{nm}^{\min} \leq M_{nm} \leq M_{nm}^{\max}, \quad \forall n, m \in \mathbb{N}_b \quad (20)$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (21)$$

در روابط مذکور، \mathbb{N}_c مجموعه مبدل‌ها، S_c^{\max} حداکثر توان ظاهری مجاز هر مبدل و M_{nm}^{\min} و M_{nm}^{\max} حداقل و حداکثر اندیس مدولاسیون مجاز هر مبدل هستند.

۳-۳- محاسبه در دسترس نبودن و احتمال خرابی

اجزای شبکه

احتمال خرابی در باس‌های شبکه بر اساس نرخ خرابی تجهیزات موجود در سیستم اعم از فیدرهای AC یا DC، بریکرهای AC یا DC و مبدل‌هاست. در دسترس نبودن و احتمال خرابی برای هر تجهیز

سناریوی مونته‌کارلو در هر سال و β_m ضریب هزینه تعمیر و نگهداشت تجهیزات هستند.

۳-۱-۲- محدودیت‌ها

از آنجایی که ماتریس‌های U ، W و D که تعریف‌کننده‌ی پیکربندی اصلی شبکه هستند و به صورت باینری تعریف می‌شوند، درایه‌های آن‌ها نباید محدودیت‌های (۴) تا (۶) را نقض کند:

$$W_n \in \{0,1\}, \quad \forall n \in \mathbb{N}_b \quad (4)$$

$$U_{nm} \in \{0,1\}, \quad \forall n, m \in \mathbb{N}_b \quad (5)$$

$$D_{nm} \in \{0,1\}, \quad \forall n, m \in \mathbb{N}_b \quad (6)$$

همچنین لازم است به منظور جلوگیری از ایزوله شدن بخشی از شبکه یا خارج شدن آن از حالت شعاعی، محدودیت‌هایی مطابق (۷) و (۸) اعمال شوند:

$$\sum_{m=1}^{N_b} U(n, m) \leq L^{\max}, L^{\min} \leq L^{\max} \leq N_b - 1, \quad \forall n \in \mathbb{N}_b \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^{N_b} U(n, m) \geq L^{\min}, 1 \leq L^{\min} \leq L^{\max}, \quad \forall n \in \mathbb{N}_b \quad (8)$$

انتخاب L^{\max} و L^{\min} به نوع پیکربندی سیستم و سطح قابلیت اطمینان موردنیاز بستگی دارد. در طرح پیشنهادی، به منظور حصول اطمینان از عدم ایزوله شدن بخشی از شبکه و نیز خارج شدن آن از حالت شعاعی، مقدار این دو متغیر به ترتیب برابر ۱ و ۲ انتخاب شده است. در این روابط، \mathbb{N}_b مجموعه باس‌ها و N_b تعداد باس‌ها هستند.

۳-۲- زیرمسئله بهینه‌سازی (مسئله بخش بار بهینه)

۳-۲-۱- تابع هدف

تابع هدف زیرمسئله، کمینه کردن مجموع هزینه‌های تولید انرژی و تأمین بارهاست. این تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{OPF} = \min \left(\sum_{j \in \mathbb{N}_G^{ac}} C_{G_j}^{ac} P_{G_j}^{ac} + \sum_{l \in \mathbb{N}_G^{dc}} C_{G_l}^{dc} P_{G_l}^{dc} \right) \quad (9)$$

در این رابطه، $C_{G_j}^{ac}$ قیمت تولید توان AC، $P_{G_j}^{ac}$ مقدار توان AC تولیدی، $C_{G_l}^{dc}$ قیمت تولید توان DC و $P_{G_l}^{dc}$ نیز مقدار توان DC تولیدی توسط هر منبع توان AC یا DC هستند.

۳-۲-۲- محدودیت‌ها

محدودیت‌های تولید توان اکتیو و راکتیو مولدهای AC و DC موجود در سیستم مطابق با (۱۰) تا (۱۲) تعریف می‌شوند:

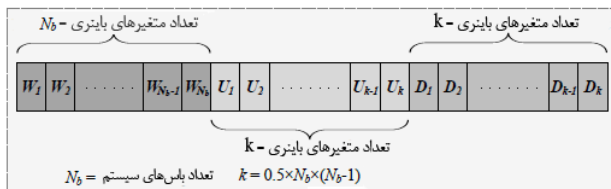
$$P_{G_i}^{ac-min} \leq P_{G_i}^{ac} \leq P_{G_i}^{ac-max} \quad (10)$$

$$P_{G_j}^{dc-min} \leq P_{G_j}^{dc} \leq P_{G_j}^{dc-max} \quad (11)$$

$$Q_{G_i}^{ac-min} \leq Q_{G_i}^{ac} \leq Q_{G_i}^{ac-max} \quad (12)$$



شکل (۲): خلاصه روندنمای نحوه حل مسئله بهینه سازی



شکل (۳): ساختار کروموزوم مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک

پس از محاسبه هزینه ی بهینه ی پخش بار، معیار توقف شبیه سازی مونته کارلو با استفاده از تعداد مشخصی سناریوی مونته کارلوی از پیش تعریف شده، تعیین می شود. در این مطالعه، معیار توقف با سطح اطمینان ۹۵٪ مد نظر است [۲۲]. در صورتی که این معیار توقف حاصل شده باشد، هزینه بهره برداری از پیکربندی متناظر محاسبه می شود و در غیر این صورت با هزینه ای برابر با بی نهایت (عدد بسیار بزرگ) این پیکربندی در دسته ی نامطلوب قرار خواهد گرفت. در صورتی که معیار توقف تعریف شده حاصل نشده باشد، سناریوی مونته کارلوی دیگری انتخاب شده و مجدداً هزینه ی پخش بار در آن محاسبه می شود تا یک بار دیگر معیار توقف مورد بررسی قرار گیرد.

در ادامه هزینه ی سرمایه گذاری تجهیزات و در دسترس نبودن برق در پاسب ها برای هر کروموزوم که هزینه ای غیر از بی نهایت دارد، محاسبه خواهد شد. تمام مراحل فوق برای تمام کروموزوم های جمعیت انتخابی تکرار می شوند.

سپس، برای تمام کروموزوم های نسل فعلی، مقدار ارزش خالص فعلی و انرژی تأمین نشده ی مورد انتظار محاسبه می شوند. در ادامه، تابع هدف و قیود الگوریتم ژنتیک (مسئله ی بهینه سازی اصلی) مورد بررسی قرار می گیرند. در گام بعدی لازم است تا معیار توقف الگوریتم ژنتیک ارزیابی شود. اگر این معیار حاصل نشده باشد، از عملگرهای الگوریتم ژنتیک (مانند تولید مجدد^{۱۸}، تقاطع^{۱۹} و جهش^{۲۰}) برای به روزرسانی نسل استفاده می شود.

موجود در شبکه، به ترتیب با استفاده از (۲۲) و (۲۳) قابل محاسبه است:

$$u_f = \lambda_f \cdot t_f \quad (22)$$

$$Pr_f = \frac{u_f}{8760} \quad (23)$$

احتمال خرابی تعدادی تجهیز که به صورت سری یا موازی به هم متصل شده باشند با کمک (۲۴) و (۲۵) قابل محاسبه است.

$$Pr_f = \sum_{k=1}^{K_f} Pr_{f,k} \quad (24)$$

$$Pr_f = \prod_{k=1}^{K_p} Pr_{f,k} \quad (25)$$

در این معادلات، u_f در دسترس نبودن، λ_f نرخ خرابی و t_f مدت زمان خرابی هر تجهیز را نشان می دهند. همچنین منظور از Pr_f احتمال خرابی یک تجهیز است.

۴- طراحی شبکه توزیع

هدف اصلی مدل پیشنهادی در این مقاله تعیین پیکربندی بهینه شبکه با توجه به ماتریس های W ، U و D است. لازم به ذکر است که پیکربندی ها منعطف هستند و با توجه به نوع و مقدار نقاط بار و منابع تولید پراکنده، قابل تغییرند. پس از تعیین پیکربندی با ماتریس های مذکور، با استفاده از اصلی بهینگی پارتو، بهترین پاسخ انتخاب می شود [۳۲]. به منظور مدل کردن تقاضای بار و میزان تولید منابع تولید پراکنده که تصادفی است، از شبیه سازی مونته کارلو استفاده می شود. تغییرات فصلی متغیرهای تصادفی، اعم از تقاضای بار، مصرف ایستگاه های شارژ خودروهای برقی و خروجی سلول های خورشیدی و توربین های بادی، به صورت مدل های تصادفی مورد استفاده قرار گرفته اند [۲۲].

خلاصه ای از روندنمای نحوه اجرای نکات مذکور برای حل مسئله بهینه سازی در شکل (۲) ارائه شده است.

جزئیات اجرای این روندنما مطابق زیر است:

در ابتدا، کروموزوم های مناسب برای شکل دادن یک جمعیت اولیه انتخاب می شوند. هر کروموزوم متشکل از المان های ماتریس های باینری پیکربندی (W ، U و D) است و یک پیکربندی کاندید برای شبکه ی AC/DC را نشان می دهد. نحوه شکل دهی کروموزوم های جمعیت با توجه به ماتریس های متناظر با پیکربندی شبکه، در شکل (۳) نشان داده شده است. در ادامه، یک سناریوی شبیه سازی مونته کارلو برای کروموزوم انتخابی تولید می شود که شامل مقادیر تصادفی برای نقاط بار و منابع تولید پراکنده است. سپس در سناریوی تحت بررسی، هزینه ی بهینه ی پخش بار با حل زیرمسئله ی بهینه سازی محاسبه خواهد شد.

نرخ خرابی، زمان خراببودن و میزان در دسترس نبودن المان‌های مختلف مورد استفاده در این شبکه در [۲۶] ارائه شده است.

۵-۱- طراحی شبکه در حالت پایه

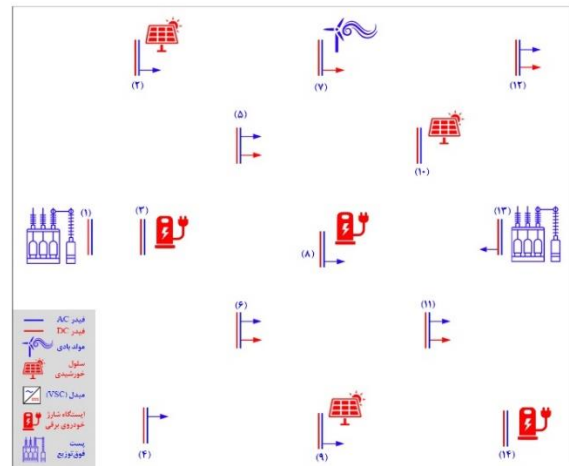
به منظور بررسی روش پیشنهادی، شبکه‌ی تست نشان داده شده در شکل (۴) به دو صورت AC مطلق و ترکیبی AC/DC طراحی شده‌اند.

جدول (۲): پیک تقاضای نقاط بار

نقطه بار	نوع	پیک تقاضای اکتیو (MW)	پیک تقاضای راکتیو (MW)
L2	AC	۵	۲/۵
L3	DC	۱/۲۵	-
L4	AC	۱۰	۴/۵
L5	AC	۷/۵	۳/۵
L5	DC	۰/۷۵	-
L6	AC	۵	۲/۵
L6	DC	۰/۵	-
L7	DC	۰/۸۵	-
L8	AC	۵	۲/۵
L8	DC	۱/۲۵	-
L9	AC	۵	۲/۵
L11	AC	۵	۲/۵
L11	DC	۰/۵	-

جدول (۳): سایر پارامترهای مفروض در شبکه [۲۶]

پارامتر	مقدار
ظرفیت مبنای باس‌ها	۵۰ مگاوات آمپر
ولتاژ مبنای باس‌های AC	۲۰ کیلوولت
ولتاژ مبنای باس‌های DC	۳۰ کیلوولت
حداقل ولتاژ مجاز باس‌ها	۰/۹۵ پریونیت
حداکثر ولتاژ مجاز باس‌ها	۱/۰۵ پریونیت
حداقل زاویه ولتاژ مجاز باس‌ها	$-\pi / 4$
حداکثر زاویه ولتاژ مجاز باس‌ها	$+\pi / 4$
ظرفیت فیدرها	۲۰ مگاوات آمپر
حداقل اندیس مدولاسیون مجاز	۰/۷۷
مبدل‌ها	۱
حداکثر اندیس مدولاسیون مجاز	۱
مبدل‌ها	۱
بازدهی مبدل‌ها	۹۵٪
تعداد سناریوهای مونته کارلو	۵۰۰۰
نوع سیستم DC	تک قطبی
قیمت فیدرها	۲۸۰۰۰ دلار به ازای هر مایل برای هر هادی [۲۲]
قیمت مبدل‌ها	۱۷۰ دلار به ازای هر کیلوولت آمپر [۲۲]
قیمت بریکرها	۲۸۰۰ دلار به ازای واحد
هزینه تعمیر و نگهداشت سالیانه	۵٪ هزینه نصب
دوره برنامه ریزی	۱۵ سال
نرخ بهره سالیانه	۰/۷ درصد



شکل (۳): شبکه آزمون ۱۴ باسه

در صورتی که معیار توقف حاصل نشده باشد، تمام مراحل فوق تکرار می‌شوند تا زمانی که معیار توقف الگوریتم ژنتیک حاصل شود. در انتها نیز از روش‌های تصمیم‌گیری تشریح شده در [۳۴] به منظور تعیین بهترین پیکربندی استفاده می‌شود.

۵- شبکه آزمون

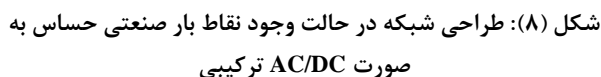
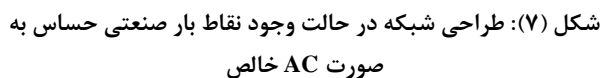
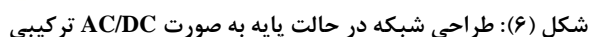
به منظور ارزیابی روش پیشنهادی در فصل سوم، از یک شبکه‌ی ۱۴ باس استفاده می‌شود تا طراحی یک بار به صورت AC مطلق و یک بار به صورت AC/DC ترکیبی برای آن صورت گیرد. این شبکه‌ی تست شامل پست‌های فوق توزیع AC/AC، نقاط بار AC و DC، سلول‌های خورشیدی به عنوان مولدهای DC، توربین بادی به عنوان تولیدکننده‌ی AC و ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به عنوان بار DC است. این موقعیت اجزای این شبکه در شکل (۴) نشان داده شده است. فواصل باس‌ها (کیلومتر) از یکدیگر نیز مطابق [۲۶] است.

مشخصات تقاضای پیک نقاط بار موجود در این شبکه در جدول (۲) نشان داده شده است. این اطلاعات شامل پیک تقاضای اکتیو و راکتیو هر نقطه‌ی بار می‌باشد. همچنین اطلاعات مربوط به حداقل و حداکثر توان قابل تولید توسط منابع تولید پراکنده موجود در شبکه و همچنین پست‌های فوق توزیع و نیز قیمت خرید انرژی تولیدی هر یک از آن‌ها، در جدول (۱) ارائه شده است. سایر اطلاعات و پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی این شبکه نیز در جدول (۳) آمده است.

جدول (۱): حداکثر ظرفیت منابع تولید پراکنده و پست‌های فوق

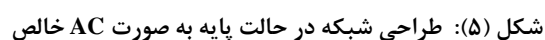
توزیع موجود در شبکه [۲۶]

منبع توان	نوع	حداکثر توان اکتیو قابل تولید (MW)	حداکثر توان راکتیو قابل تولید (MVar)	قیمت انرژی (\$/MWh)
SS1	AC	۱۰۰	۴۸	۹۲/۲
SS13	AC	۲۲/۵	۱۰	۹۲/۲
PV2	DC	۱/۷۵	-	۲۰۹
PV9	DC	۱/۷۵	-	۲۰۹
PV10	DC	۱/۷۵	-	۲۰۹
WT7	AC	۱۰	۰	۱۲۸



۵-۲- طراحی شبکه در حالت وجود نقطه بار صنعتی حساس

پس از استخراج ماتریس‌های پیکربندی شبکه (D و U و W) و همچنین هزینه تمام‌شده نهایی و مقدار انرژی تأمین‌نشده از مسئله شیشه‌سازی، خروجی مطابق شکل (۷) و شکل (۸) خواهد شد.



۵-۳- نتایج

بعد از طراحی شبکه در حالت‌های تشریح شده، بررسی و مقایسه برخی از نتایج حائز اهمیت است. در این بخش، به مقایسه هزینه تمام شده طراحی، مقدار انرژی تأمین نشده، تلفات شبکه و یکی از معیارهای قابلیت اطمینان شبکه تحت عنوان متوسط زمان خاموشی هر مشترک در سال، که با سرواژه‌ی SAIDI شناخته می‌شود، در هر دو حالت معرفی شده پرداخته خواهد شد.

۵-۳-۱- نتایج طراحی شبکه در حالت پایه

با توجه به خروجی الگوریتم بهینه‌سازی مشاهده می‌شود که در حالت پایه هزینه‌ی تمام شده برای شبکه‌ی AC مطلق برابر ۶۱۰/۶۹۰ میلیون دلار و در شبکه‌ی ترکیبی AC/DC برابر ۵۴۹/۳۵۴ میلیون دلار است. در همین حالت، اگر شبکه به صورت AC خالص طراحی شود، ۳۷۵۳ مگاوات ساعت و اگر طراحی به صورت ترکیبی AC/DC باشد، این عدد به ۲۵۵۸ مگاوات ساعت خواهد شد. در شبکه‌ی طراحی شده به صورت AC خالص ۱۴۵ مگاوات و در شبکه‌ی طراحی شده به صورت AC/DC ترکیبی ۱۰۲ مگاوات تلفات ایجاد می‌شود. در نهایت مشاهده می‌شود که اگر طراحی به صورت AC خالص باشد، SAIDI شبکه برابر ۲۳۴ دقیقه به ازای هر مشترک در سال و اگر شبکه به صورت AC/DC ترکیبی طراحی شود، SAIDI شبکه برابر ۲۰۲ دقیقه به ازای هر مشترک در سال خواهد بود.

با توجه به اعداد و ارقام به دست آمده، می‌توان ادعا کرد که اگر طراحی شبکه توزیع برای منطقه‌ای شهری با هزینه خاموشی ۰/۱ دلار به ازای هر مگاوات ساعت برای هر نقطه بار مد نظر باشد، طراحی AC/DC ترکیبی از هر چهار جنبه مورد بررسی، انتخاب بهتری است.

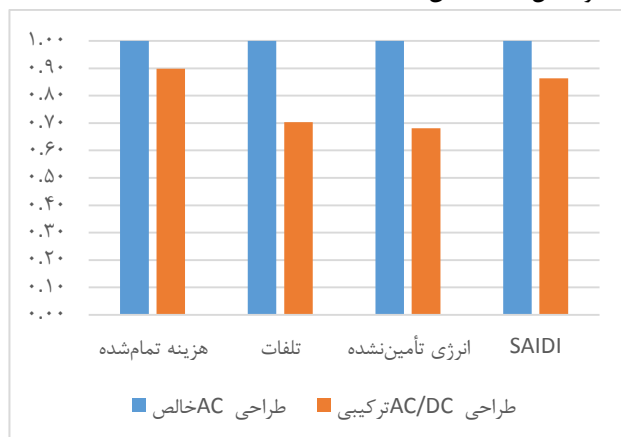
۵-۳-۲- نتایج طراحی شبکه در حالت وجود نقاط بار صنعتی حساس

در حالت وجود نقاط بار صنعتی حساس، به دلیل نیاز به قابلیت اطمینان بیشتر و افزایش تعداد فیدها، مبدل‌ها و بریکرهای مورد نیاز، هزینه‌ی تمام شده برای طراحی به صورت AC خالص ۶۳۱/۴۳۶ میلیون دلار و برای طراحی به صورت ترکیبی AC/DC برابر ۷۰۱/۲۳۲ میلیون دلار خواهد بود. چنانچه طراحی به صورت AC خالص باشد، ۱۹۳۲ مگاوات ساعت و در طراحی AC/DC ترکیبی ۱۲۹۱ مگاوات ساعت انرژی تأمین نشده در شبکه وجود خواهد داشت. در طراحی شبکه به صورت AC خالص تلفات برابر ۱۵۳ مگاوات و در طراحی ترکیبی AC/DC به ۱۸۱ خواهد رسید. همچنین در حالت وجود نقاط بار صنعتی حساس، SAIDI شبکه در طراحی ترکیبی AC/DC از ۱۹۷ دقیقه به ۱۷۴ دقیقه به ازای هر مشترک در سال کاهش می‌یابد.

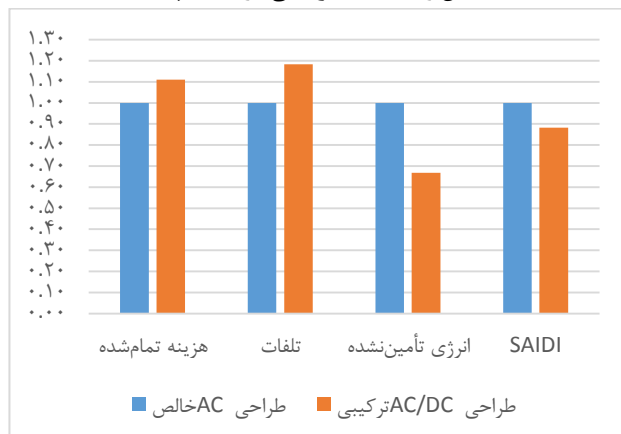
در این حالت با توجه به اعداد و ارقام به دست آمده، می‌توان ادعا کرد که اگر طراحی شبکه توزیع برای منطقه‌ای صنعتی با هزینه

خاموشی ۳۰ دلار به ازای هر مگاوات ساعت برای نقاط بار صنعتی حساس مد نظر باشد، طراحی AC خالص از نظر هزینه تمام شده و تلفات و طراحی AC/DC ترکیبی از نظر انرژی تأمین نشده و شاخص قابلیت اطمینان SAIDI، انتخاب بهتری است.

برای داشتن درک بهتر تفاوت و نحوه تغییر پارامترهای بیان شده در طراحی‌های AC خالص و AC/DC ترکیبی، با فرض این که اعداد و ارقام حاصل از طراحی AC خالص مبنا هستند، اعداد مربوط به طراحی AC/DC ترکیبی به صورت یکه‌ای تبدیل شده و در برای حالت پایه و حالت وجود نقاط بار صنعتی حساس به ترتیب در شکل (۹) و شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند.



شکل (۹): مقایسه یکه‌ای نتایج حاصل از طراحی شبکه به صورت AC خالص و AC/DC ترکیبی در حالت پایه



شکل (۱۰): مقایسه یکه‌ای نتایج حاصل از طراحی شبکه به صورت AC خالص و AC/DC ترکیبی در حالت وجود نقاط بار صنعتی حساس

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش جدید مبتنی بر قابلیت اطمینان و حساس به وضعیت نقاط بار و منابع تولید پراکنده موجود در یک منطقه، به منظور طراحی بهینه شبکه توزیع با قابلیت استفاده از فیدها و باس‌های AC و DC ارائه شد. هدف نهایی روش پیشنهادی، طراحی یک شبکه توزیع ترکیبی با کمترین هزینه و بیشترین قابلیت اطمینان ممکن بود. در این روش پیشنهادی از شبیه‌سازی مونته‌کارلو به منظور پیاده‌سازی

مراجع

- [۱] سلمانی سعید، جدید شهرام، (۱۳۹۵)، بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور منابع انرژی پراکنده، نشریه انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۳، شماره ۳
- [2] (2015). International Renewable Energy Agency (IRENA). Battery storage for renewables: market status and technology outlook. Available: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Battery_Storage_report_2015.pdf
- [3] (2018). Solar Power Europe. Global market outlook for solar power 2018-2020. Available: <http://www.solarpowereurope.org/insights/global-marketoutlook>
- [۴] طاهر سیدعباس، شاهقلیان اکرم، (۱۳۹۳)، جابجایی بهینه منابع تولید پراکنده به همراه SSVR در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم تکاملی ایمنی، نشریه انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۱، شماره ۱
- [5] (2016). International Energy Agency (IEA). Global EV outlook 2016: Beyond one million electric cars. Available: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global_EV_Outlook_2016.pdf
- [6] (2018). Ontario Power Authority. Fit program. Available: <http://fit.powerauthority.on.ca/fit-program>
- [7] N. G. Boulaxis and M. P. Papadopoulos, "Optimal feeder routing in distribution system planning using dynamic programming technique and GIS facilities", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 17, no. 1, pp. 242-247, 2002.
- [8] E. G. Carrano, L. A. E. Soares, R. H. C. Takahashi, R. R. Saldanha, and O. M. Neto, "Electric distribution network multiobjective design using a problem-specific genetic algorithm", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 21, no. 2, pp. 995-1005, 2006.
- [9] R. H. Fletcher and K. Strunz, "Optimal distribution system horizon planning—part I: formulation", IEEE Trans. Power Systems, vol. 22, no. 2, pp. 791-799, 2007.
- [10] A. Samui, S. R. Samantaray, G. Panda, Transmission, and Distribution, "Distribution system planning considering reliable feeder routing", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, no. 6, pp. 503-514, 2012.
- [11] J. F. Gomez, H. M. Khodr, P. M. De Oliveira, L. Ocque, J. M. Yusta, R. Villasana, A. J. Urdaneta "Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits", IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, no. 2, pp. 996-1004, 2004.
- [12] V. Parada, J. A. Ferland, M. Arias, and K. Daniels, "Optimization of electrical distribution feeders using simulated annealing", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 19, no. 3, pp. 1135-1141, 2004.
- [13] I. Ziari, G. Ledwich, and A. Ghosh, "Optimal integrated planning of MV-LV distribution systems using DPSO", Electric Power Systems Research, vol. 81, no. 10, pp. 1905-1914, 2011.
- [14] C. L. T. Borges, V. Martins, "Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 36, no. 1, pp. 107-116, 2012.
- [15] J. Salehi, M. R. Haghifam, "Long term distribution network planning considering urbanity uncertainties",

عدم قطعیت تقاضای بار و مقدار تولیدی منابع تولید پراکنده استفاده شد. سپس با ایجاد مصالحه بین هزینه تمام‌شده و مقدار انرژی تأمین‌نشده خروجی از مسئله بهینه‌سازی تو در تو، پیکربندی بهینه شبکه حاصل شد. در این روش، طراح شبکه می‌تواند بر اساس اهمیت قابلیت اطمینان کلی شبکه یا میزان اهمیت قابلیت اطمینان برای یک باس خاص، درباره نوع پیکربندی شبکه تصمیم‌گیری کند. در ادامه، از یک شبکه ۱۴ باس به منظور ارزیابی روش پیشنهاد استفاده شد. شبکه توزیع ۱۴ باس مذکور در دو سناریو شبیه‌سازی شد. در یکی از سناریوها هزینه خاموشی تمام نقاط بار برابر با هم و در سناریوی دیگر، هزینه خاموشی نقاط بار خاص چندین برابر سایر نقاط بار در نظر گرفته شد.

در نهایت با مقایسه هزینه تمام‌شده، میزان تلفات، مقدار انرژی تأمین‌نشده و مدت زمان متوسط قطعی هر مشترک در سال (SAIDI) در طرح‌های پیشنهادی، نتیجه به این صورت حاصل شد که در صورت وجود تعداد قابل توجهی نقطه بار و منبع تولید پراکنده AC و DC در یک شبکه، استفاده از طراحی ترکیبی AC/DC بسته به موقعیت نقاط بار و منابع تولید پراکنده و همچنین شدت تراکم آن‌ها در یک بخش خاص از منطقه و البته تعداد و میزان تولید و مصرف منابع و نقاط بار می‌تواند نسبت به طراحی AC خالص به صرفه‌تر باشد. این ادعا کاملاً حساس به مورد مطالعاتی است. به عنوان مثال همان‌طور که مشاهده شد، در سناریوی دوم که نقاط بار صنعتی AC سهم بیشتری در شبکه داشتند، طراحی AC خالص از نظر هزینه تمام‌شده و همچنین تلفات نسبت به طراحی ترکیبی AC/DC به صرفه‌تر تمام شد. بدیهی است که اگر با منطقه‌ای طرف باشیم که تماماً از نقاط بار AC تشکیل شده باشد، منطقی نیست حتی بخش کوچکی از شبکه را به صورت DC طراحی کنیم.

از سویی دیگر در صورت استفاده از تجهیزات DC و مبدل‌های مربوطه، به دلیل افزایش تعداد و البته قیمت بیشتر این نوع تجهیزات برای نصب در شبکه نسبت به تجهیزات AC، هزینه سرمایه‌گذاری طرحی که شامل تجهیزات DC باشد، بیشتر از طرح AC خالص خواهد بود، اما در تابع هدف تعریف‌شده برای این مسئله، هدف کمینه‌کردن ارزش خالص فعلی طرح است که این هزینه شامل هزینه ۱۵ سال بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری نیز می‌شود. همین موضوع می‌تواند باعث شود در مواردی خاص مانند مواردی که در پاراگراف قبل تشریح شد، هزینه تمام‌شده طرح AC/DC ترکیبی علی‌رغم بیشتر بودن هزینه اولیه سرمایه‌گذاری، در نهایت کمتر از هزینه تمام‌شده طرح AC خالص شود. در نهایت باز هم تأکید می‌شود که این طراحی کاملاً حساس به مورد مطالعاتی است.

- [31] W. Wei, Y. Zhou, J. Zhu, K. Hou, H. Zhao, Z. Li, T. Xu, "Reliability Assessment for AC/DC Hybrid Distribution Network With High Penetration of Renewable Energy", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 153141-153150, 2019.
- [32] Z. Wu, Q. Sun, W. Gu, Y. Chen, H. Xu, and J. Zhang, "AC/DC Hybrid Distribution System Expansion Planning Under Long-Term Uncertainty Considering Flexible Investment", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 94956-94967, 2020.
- [33] H. M. Ahmed, A. B. Eltantawy, and M. Salama, "A generalized approach to the load flow analysis of AC-DC hybrid distribution systems", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 2117-2127, 2017.
- [34] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
- International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 42, no. 1, pp. 321-333, 2012.
- [۱۶] صالحی، جواد. (۱۳۹۲). برنامه‌ریزی مبتنی بر ریسک شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن برهمکنش‌های مدیریت دارایی در کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس
- [17] A. Samui, S. Singh, T. Ghose, and S. R. Samantaray, "A direct approach to optimal feeder routing for radial distribution system", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 27, no. 1, pp. 253-260, 2011.
- [18] S. Mousavizadeh and M. R. Haghifam, "Integrated AC/DC network planning", 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013) 2013.
- [۱۹] موسوی‌زاده، میرسعید. (۱۳۹۲). طراحی شبکه‌های توزیع AC/DC، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس
- [20] S. Singh, T. Ghose, and S. K. Goswami, "Optimal feeder routing based on the bacterial foraging technique", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 27, no. 1, pp. 70-78, 2011.
- [21] H. Khatami, S. Ravadanegh, "Probabilistic optimal robust multistage feeder routing under load forecasting uncertainty", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 14, pp. 1977-1987, 2015.
- [22] H. M. Ahmed, A. B. Eltantawy, and M. Salama, "A planning approach for the network configuration of AC-DC hybrid distribution systems", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2203-2213, 2016.
- [23] A. Ghadiri, M. R. Haghifam, S. M. Larimi, "Comprehensive approach for hybrid AC/DC distribution network planning using genetic algorithm", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 16, pp. 3892-3902, 2017.
- [۲۴] قدیری، علی. (۱۳۹۳). ارزیابی فنی و اقتصادی ساختارهای مختلف شبکه‌های توزیع AC/DC، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس

زیرنویس‌ها

- ¹ Expected Energy Not Supplied (EENS)
- ² Monte Carlo Simulation (MCS)
- ³ Dynamic Programming
- ⁴ Markovian Property
- ⁵ Optimally Theorem
- ⁶ Ant Colony System
- ⁷ Simulated Annealing
- ⁸ Discrete Particle Swarm Optimization
- ⁹ Embranchment Point
- ¹⁰ Shuffled Frog Leaping
- ¹¹ Bacterial Foraging Algorithm
- ¹² Imperialist Competitive Algorithm
- ¹³ Minimum Spanning Tree
- ¹⁴ Mixed Integer Second Order Conic Programming
- ¹⁵ Mixed Integer Non-Linear Programming
- ¹⁶ Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm
- ¹⁷ Net Present Value
- ¹⁸ Reproduction
- ¹⁹ Crossover
- ²⁰ Mutation

- [25] Z. Wu, P. Liu, W. Gu, H. Huang, and J. Han, "A bi-level planning approach for hybrid AC-DC distribution system considering N-1 security criterion", *Applied Energy*, vol. 230, pp. 417-428, 2018.
- [26] H. M. Ahmed, A. B. Eltantawy, M. Salama, "A reliability-based stochastic planning framework for AC-DC hybrid smart distribution systems", *Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 107, pp. 10-18, 2019.
- [27] R. Zhong, Y. Teng, X. Wang, Y. Zhu, and H. Zhang, "Probabilistic optimal power flow calculation of AC/DC hybrid distribution network with photovoltaic power and electric vehicles", *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2018, pp. 20-27.
- [28] N. Wehring, D. Schema, F. Wöhner, and A. Moser, "A Distributed Optimal Power Flow for Secondary Control of Hybrid AC/DC Networks," *IEEE Milan PowerTech*, 2019, pp. 1-6.
- [29] P. Li, M. Zheng, "Multi-objective optimal operation of hybrid AC/DC microgrid considering source-network-load coordination", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 1229-1240, 2019.
- [30] J. Shi, W. Qiao, F. Xue, L. Ma, W. Yang, and T. Yang, "Planning of Distributed Generation in the Hybrid AC/DC Distribution Network Considering the Solid State Transformer", 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019, pp. 1-6.