

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و ریاتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی

تأثیر حضور تولید پراکنده بر روی کاهش ولتاژ محافظه کارانه با در نظر گرفتن مدل بار

نگارنده:

بهنام عابدینی

اساتید راهنما

دکتر مهدی بانژاد

دکتر امیر حسن‌نیا

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۱۵۳۴
تاریخ: ۹۶/۱۱/۳

باسمه تعالی

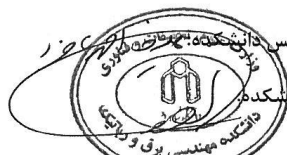


مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای بهنام عابدینی با شماره دانشجویی ۹۳۱۱۵۴۴ رشته مهندسی قدرت گرایش ماشینهای الکتریکی تحت عنوان: تاثیر حضور تولید پراکنده بر روی کاهش ولتاژ محافظه کارانه با در نظر گرفتن مدل بار که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۰۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۷,۴۱ درجه خوب) ☒ / مردود ☐			
نوع تحقیق: نظری ☒ / عملی ☐			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمدی بنیراد	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر ایرمنیاد	استاد	
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدی بنیراد	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر یاسر دایج	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر حبیبی شیری	استاد	



نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمدی بنیراد
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۶/۱۱/۳

✓ تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

پدر و مادرم

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند. آموزگارانی که برایم زندگی و انسان بودن را معنا کردند.

تشکر و قدردانی:

انجام این پروژه را مدیون زحمات اساتید فرزانه‌ام، جناب دکتر بانژاد و جناب دکتر حسن‌نیا می‌باشم که در تمام مدت انجام پروژه، مرا از راهنمایی‌های با ارزش خود بی‌نصیب نگذاشته‌اند. امیدوارم بتوانم ویژگی‌های ارزشمند ایشان همچون مهربانی و صبوری را سرلوحه زندگی خویش قرار دهم. در پایان برای اساتید محترم، طول عمر با عزت و با افتخاری را از درگاه خداوند منان مسألت دارم.

تعهد نامه

اینجانب بهنام عابدینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-قدرت- ماشین های الکتریکی و الکترونیک قدرت دانشکده برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تأثیر حضور تولید پراکنده بر روی کاهش ولتاژ محافظه کارانه با در نظر گرفتن مدل بار تحت راهنمایی دکتر مهدی بانژاد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «**Shahrood University of technology**» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ : ۱۳۹۶/۱۱/۳

امضای دانشجو :

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

امروزه افزایش مصرف برق و ظرفیت محدود نیروگاه‌ها در کنار ملاحظات سرمایه‌گذاری و هزینه برق، منجر به روآوردن به روش‌هایی شده است که بتوان از امکانات موجود نهایت بهره‌برداری را انجام داد. کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه یکی از پدیده‌های نوظهور است که در خصوص کاهش مصرف برق، کاهش تلفات و کاهش بار پیک در سیستم‌های توزیع، از طریق کاهش ولتاژ سیستم توزیع تا پایین‌ترین سطح ممکن محدوده مجاز، مطرح گشته است. تولید پراکنده نیز از موضوعاتی است که دارای مزایای اثبات شده بسیاری از جمله کاهش تلفات توان، آزادسازی ظرفیت شبکه و بهبود کیفی مشخصه ولتاژ است و در سال‌های اخیر مورد اقبال برنامه‌ریزان صنعت برق قرار گرفته است. در مفهوم کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه نهفته است که هر چه مشخصه ولتاژ سیستم توزیع مسطح‌تر باشد، کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه اثربخش‌تر خواهد بود، همچنین ماهیت تولید پراکنده نیز تمایل به شکل‌دهی مشخصه ولتاژی مسطح دارد. ادغام اهداف و نتایج روش کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه و واحدهای تولید پراکنده همپوشانی مثبت در راستای نائل‌آمدن به اهداف بهینه‌سازی و بهبود بهره‌وری سیستم قدرت، ایجاد خواهد نمود. در این پژوهش با در نظر گرفتن مدل ترکیبی بار (ZIP)، جاییابی تولیدات پراکنده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به منظور دستیابی به مقاصد توابع هدف در انواع و ترکیبات مختلف صورت می‌پذیرد و سپس کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه پیاده‌سازی می‌شود. ضرایب مدل ZIP بار، با اندازه‌گیری‌های میدانی و انجام محاسبات، به دست آمده است. به منظور نمایش تأثیر حضور تولید پراکنده بر کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه، فرآیند فوق روی سیستم توزیع نمونه ۳۳ باسه اجرا می‌شود و نتایج به دست آمده در حالات مختلف، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

کلید واژه ها : کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه، تولید پراکنده، مدل بار ZIP ، کاهش تلفات، کاهش مصرف، کاهش تقاضای پیک

فهرست

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱ بیان مسئله ۲
- ۲-۱ اهداف پایان نامه ۴
- ۳-۱ ساختار پایان نامه ۵

فصل دوم: تشریح مفاهیم و مروری بر روش‌های مورد استفاده

- ۱-۲ مقدمه ۸
- ۲-۲ مفهوم کاهش و لتاژ محافظه کارانه ۸
- ۱-۲-۲ انواع پیاده‌سازی کاهش و لتاژ محافظه کارانه ۱۰
- ۲-۲-۲ اثرات کاهش و لتاژ محافظه کارانه ۱۱
- ۱-۲-۲-۲ کاهش مصرف ۱۲
- ۲-۲-۲-۲ کاهش تلفات ۱۴
- ۳-۲-۲-۲ کاهش بار پیک ۱۵
- ۳-۲-۲ روش‌های ارزیابی کاهش و لتاژ محافظه کارانه ۱۶
- ۴-۲-۲ روش‌های پیاده‌سازی کاهش و لتاژ محافظه کارانه ۱۹
- ۵-۲-۲ اثر فصل‌ها بر کاهش و لتاژ محافظه کارانه ۲۲
- ۳-۲ مروری بر تولید پراکنده ۲۳
- ۱-۳-۲ انواع منابع تولید پراکنده ۲۴
- ۲-۳-۲ مزایای استفاده از تولید پراکنده ۲۶
- ۱-۲-۳-۲ کاهش تلفات ۲۶

عنوان صفحه

۲۷	۲-۲-۳-۲ بهبود مشخصه ولتاژ
۲۸	۳-۲-۳-۲ افزایش قابلیت اطمینان
۲۹	۳-۳-۲ جابجایی منابع تولید پراکنده
۳۰	۴-۲ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات
۳۵	۵-۲ روش پخش بار پسر-پیشرو
۳۹	۶-۲ مدل بار
۴۲	۷-۲ مروری بر مطالعات گذشته در زمینه CVR و DG
۴۶	۸-۲ جمع‌بندی

فصل سوم: ادغام یکپارچه کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه و تولیدات پراکنده

۴۸	۱-۳ مقدمه
۴۸	۲-۳ تشریح طرح مورد استفاده در این پژوهش
۵۱	۳-۳ توابع هدف
۵۱	۱-۳-۳ تابع هدف کاهش انحرافات ولتاژ
۵۱	۲-۳-۳ تابع هدف کاهش تلفات
۵۲	۳-۳-۳ تابع هدف کاهش توان دریافتی شبکه
۵۳	۴-۳-۳ تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ
۵۴	۴-۳ مقادیر و پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات
۵۷	۵-۳ تعیین ضرایب مدل بار ZIP
۶۲	۶-۳ انتخاب روش پخش بار پسر-پیشرو
۶۴	۷-۳ جمع‌بندی

عنوان صفحه

فصل چهارم: شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

۱-۴ مقدمه	۶۶
۲-۴ معرفی سیستم توزیع مورد مطالعه	۶۷
۳-۴ تعیین نحوه مناسب استفاده از تولیدات پراکنده	۷۱
۴-۴ بررسی رفتار مدل بار شبکه	۷۶
۵-۴ تعیین تابع هدف مطلوب	۷۸
۶-۴ نتایج	۸۷
۷-۴ جمع‌بندی	۹۵

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۵ نتیجه‌گیری	۹۸
۲-۵ پیشنهادات	۱۰۰

پیوست‌ها

پیوست ۱	۱۰۲
مراجع	۱۰۴

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲): تأثیر CVR بر ولتاژ سیستم توزیع	۹
شکل (۲-۲): اثر CVR روی کاهش تقاضای پیک و کاهش انرژی ۲۴ ساعته	۱۱
شکل (۳-۲): فلوچارت الگوریتم PSO	۳۵
شکل (۴-۲): شبکه مقاومتی نمونه	۳۶
شکل (۱-۳): روش های به کار گیری CVR و DG	۵۰
شکل (۱-۴): ساختار شبکه مورد مطالعه	۶۸
شکل (۲-۴): مصرف توان اکتیو باس های شبکه در حالت عادی	۶۹
شکل (۳-۴): مصرف توان راکتیو باس های شبکه در حالت عادی	۷۰
شکل (۴-۴): اطلاعات توان تزریقی و تلفات شبکه در حالت عادی	۷۰
شکل (۵-۴): مشخصه ولتاژ شبکه در حالت عادی	۷۱
شکل (۶-۴): مشخصه ولتاژ سناریوهای استفاده از DG با هدف کاهش انحراف معیار مشخصه ولتاژ	۷۳
شکل (۷-۴): مشخصه ولتاژ سناریوهای استفاده از DG با هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ	۷۴
شکل (۸-۴): تأثیر ولتاژ بر مصرف توان ظاهری گروه های مصرفی	۷۷
شکل (۹-۴): تأثیر ولتاژ بر مصرف توان اکتیو گروه های مصرفی	۷۷
شکل (۱۰-۴): تأثیر ولتاژ بر مصرف توان راکتیو گروه های مصرفی	۷۸
شکل (۱۱-۴): مشخصه ولتاژ شبکه پس از ادغام DG و CVR بلندمدت	۸۰
شکل (۱۲-۴): مشخصه ولتاژ شبکه پس از ادغام DG و CVR کوتاه مدت	۸۵
شکل (۱۳-۴): نمودار توان راه کارهای حمایتی مختلف شبکه	۸۸
شکل (۱۴-۴): نمودار تلفات برای راه کارهای مختلف حمایتی شبکه	۸۸
شکل (۱۵-۴): مشخصه ولتاژ حاصل از راه کارهای حمایتی شبکه	۸۹
شکل (۱۶-۴): مشخصه ولتاژ شبکه در وضعیت عادی و حمایت شده	۹۰
شکل (۱۷-۴): نمودار توان وضعیت عادی و حمایت شده شبکه	۹۱
شکل (۱۸-۴): نمودار تلفات وضعیت عادی و حمایت شده شبکه	۹۱

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲) : مقایسه روش‌های ارزیابی CVR	۱۸
جدول (۲-۲) : روش‌های اجرای CVR	۲۲
جدول (۳-۲) : ضرایب CVR فصل‌های مختلف	۲۳
جدول (۱-۳) : مقادیر توابع برازندگی جزئی	۵۶
جدول (۲-۳) : مقادیر مورد نیاز و پارامترهای الگوریتم PSO	۵۶
جدول (۳-۳) : اطلاعات اجزا گروه مصرفی مسکونی	۵۹
جدول (۴-۳) : ضرایب ZIP مدل بار گروه مسکونی	۶۰
جدول (۵-۳) : اطلاعات اجزا گروه مصرفی تجاری	۶۰
جدول (۶-۳) : ضرایب ZIP مدل بار گروه تجاری	۶۰
جدول (۷-۳) : اطلاعات اجزا گروه مصرفی صنعتی	۶۱
جدول (۸-۳) : ضرایب ZIP مدل بار گروه صنعتی	۶۱
جدول (۹-۳) : اطلاعات اجزا گروه مصرفی معابر	۶۱
جدول (۱۰-۳) : ضرایب ZIP مدل بار گروه معابر	۶۱
جدول (۱۱-۳) : ضرایب ZIP مدل بار ترکیبی	۶۲
جدول (۱-۴) : نتایج جایابی DG با هدف کاهش انحراف معیار مشخصه ولتاژ	۷۲
جدول (۲-۴) : نتایج جایابی DG با هدف کاهش تلفات	۷۳

عنوان صفحه

جدول (۳-۴): نتایج جایابی DG با هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ ۷۴

جدول (۴-۴): نتایج جایابی DG با هدف کاهش توان تزریقی ۷۵

جدول (۵-۴): نتایج جایابی DG همراه با CVR بلندمدت با هدف کاهش توان دریافتی شبکه ۸۰

جدول (۶-۴): نتایج جایابی DG با توابع هدف مختلف و بدون اعمال CVR ۸۲

جدول (۷-۴): وضعیت شبکه با حضور DG و CVR در حالات مختلف ۸۳

جدول (۸-۴): نتایج ادغام عملکرد DG و CVR کوتاه‌مدت برای ۴ تابع هدف ۸۶

جدول (۹-۴): نتایج راه‌کارهای حمایتی شبکه نمونه ۸۷

جدول (۱۰-۴): نتایج پخش بار شبکه در وضعیت عادی و حمایت شده ۹۰

جدول (۱۱-۴): ضرایب ZIP حاصل از اعمال تغییرات کمتر از سه درصد ۹۳

جدول (۱۲-۴): ضرایب ZIP حاصل از اعمال تغییرات بیشتر از سه درصد ۹۳

جدول (۱۳-۴): نتایج جایابی DG با استفاده از ضرایب ZIP نمونه ۹۴

جدول (پ-۱): اطلاعات بار سیستم توزیع ۳۳ باسه IEEE ۱۰۲

جدول (پ-۲): اطلاعات امپدانس خطوط سیستم توزیع ۳۳ باسه IEEE ۱۰۳

علائم و اصطلاحات

Symbols

علائم اختصاری

PU : Perunit	پریونیت
ZIP : Constant Impedance, Current, and Power load	بار ترکیبی امپدانس ثابت، جریان ثابت، توان ثابت
KWh : KiloWatt-hour	کیلو وات ساعت
CVR_f : Conservation Voltage Reduction Factor	ضریب کاهش ولتاژ محافظه کارانه
Z_p : Constant impedance load factor	ضریب بار امپدانس ثابت
I_p : Constant current load factor	ضریب بار جریان ثابت
P_p : Constant impedance load factor	ضریب بار توان ثابت
LTC : Load Tap Changer	تغییر دهنده تپ تحت بار
LDC : Line Drop Compensation	جبران افت خط
HVR : Home Voltage Regulator	تنظیم کننده ولتاژ خانگی
nb : Number of buses	تعداد باس ها
V_n : Nominal Voltage	ولتاژ نامی
P_{Load} : Network active power	توان اکتیو مصرفی بار شبکه
Q_{Load} : Network reactive power	توان راکتیو مصرفی بار شبکه
P_{loss} : Loss power	تلفات توان
G_{best} : Global best	بهترین راه حل سراسری
L_{best} : Local best	بهترین راه حل محلی
V_{avr} : Average Voltage	میانگین ولتاژ شبکه
$P-V$: Active Power-Voltage curve	منحنی توان اکتیو-ولتاژ
$Q-V$: Reactive Power-Voltage curve	منحنی توان راکتیو-ولتاژ
MVA : MegaVolt Ampere	مگا ولت آمپر
KVA : KiloVolt Ampere	کیلو ولت آمپر

فصل اول

مقدمه

۱-۱- بیان مسئله

پس از انقلاب صنعتی، درخواست روزافزون انسان‌ها از صنایع برای تولید هر چه بیشتر وسایل مدرن زندگی باعث شد تا انرژی محور اصلی زندگی دنیای مدرن بشود، اما این مدرن شدن دنیا هزینه‌های سنگینی را نیز بر دوش کشورها تحمیل می‌کند که باید با راه‌کارهای بهینه‌سازی به کاهش آنها پرداخت. انرژی الکتریکی به عنوان یکی از انرژی‌های مفید و در دسترس انسان با رشد فزاینده‌ای تولید شد تا بتواند پاسخ‌گوی نیاز صنعتی، بخش خانگی و کشاورزی باشد، این رشد فزاینده با در نظر گرفتن منابع محدود انرژی در جهان و حجم بالای سرمایه‌گذاری در طرح‌های توسعه تولید و انتقال نیرو موجب شده است که استفاده از روش‌های جدید حل مسئله در برنامه‌ریزی تولید، انتقال و توزیع اجتناب‌ناپذیر به نظر برسد. در سالیان اخیر متخصصان حوزه انرژی الکتریکی با تحلیل وضع مصرف برق، توانستند به روش‌های منطقی برای تولید و مصرف برق دست یابند. بهینه‌سازی و افزایش بهره‌وری در تولید برق، افزایش کیفیت انرژی، کاهش تلفات و کاهش مصرف انرژی از مهم‌ترین حوزه‌های بهینه‌سازی انرژی می‌باشند. یکی از مسائل مهم در حوزه بهینه‌سازی مسئله هزینه‌های مالی است، بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی در شرایط آزمایشگاهی قابلیت کارکرد دارند اما اجرای آنها در سطح کلان نیازمند بودجه مالی هنگفتی است. از این رو؛ باید روش‌های بهینه‌سازی مورد تحقیق و پژوهش قرار بگیرند که علاوه بر دستیابی به شرایط کارکرد بهینه، بار مالی و سرمایه‌گذاری چندانی به پروژه تحمیل نکنند. این پژوهش به بررسی تأثیر حضور تولید پراکنده^۱ بر روی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه^۲ و تحلیل فعل و انفعالات بین این دو روش شناخته شده در زمینه بهبود بهره‌وری سیستم‌های انرژی الکتریکی می‌پردازد.

یکی از مهم‌ترین و مقرون به‌صرفه‌ترین راهکارها در حوزه کاهش مصرف، کاهش تلفات و کاهش بار پیک استفاده از روش جدید کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه می‌باشد. در روش CVR، ضمن رعایت

^۱ Distributed Generation (DG)

^۲ Conservation Voltage Reduction (CVR)

استانداردهای نظارتی در خصوص محدوده ولتاژ عرضه شده به مشتریان (۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت^۱ پریونیت مقدار نامی ولتاژ)، سطح ولتاژ سیستم توزیع کاهش پیدا می کند و این امر موجب صرفه جویی در انرژی شامل کاهش مصرف و کاهش تلفات، خواهد شد. مطالعات اخیر نشان می دهد که استقرار CVR روی همه ی فیدرهای توزیع، ایالات متحده آمریکا می تواند ۳/۰۴ درصد کاهش در مصرف انرژی سالانه ملی آن کشور فراهم آورد. هم چنین CVR به طور گسترده در کشورهای دیگر مانند استرالیا و ایرلند نیز مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج نشان داد که ۲/۵ درصد کاهش ولتاژ منجر به ۱ درصد صرفه جویی انرژی در شبکه های مسکونی استرالیا و در کشور ایرلند منجر به ۱/۷ درصد کاهش مصرف انرژی را به دنبال داشته است [۳]-[۱].

تولیدات پراکنده، منابع تولید انرژی الکتریکی هستند که به شبکه توزیع متصل می گردند و وظیفه تأمین توان اکتیو در شبکه در سطح های کوچکتر از نیروگاه های تولید برق را بر عهده دارند. از مزایای استفاده از تولید پراکنده که متولیان صنعت برق را به استفاده از آنها ترغیب نموده است می توان به کاهش آلودگی های زیست محیطی، بالا بودن بازدهی این منابع نسبت به نیروگاه های معمولی، بالا بردن کیفیت برق رسانی به مشترکین، کاهش تلفات در شبکه های توزیع و آزادسازی ظرفیت شبکه اشاره نمود. از آن جا که تحقیقات، بیشترین انرژی تلف شده در صنعت برق را در سیستم انتقال نشان می دهد؛ نزدیک شدن مراکز تولید به مراکز مصرف که به معنای حذف سیستم انتقال انرژی الکتریکی می باشد، یکی از مهم ترین مزایای DG یعنی کاهش تلفات را رقم می زند. کاهش تلفات حاصل از به کار گیری سیستم تولید پراکنده، باعث کاهش هزینه های تحمیلی به مصرف کنندگان و تولید کنندگان خواهد شد.

روش کاهش ولتاژ محافظه کارانه برای اثربخشی بیشینه، نیاز به مشخصه ولتاژی هر چه مسطح تر دارد، چرا که بتواند کاهش عمیق تری در ولتاژ سیستم توزیع اعمال نماید و در نتیجه صرفه جویی بیشتری در انرژی حاصل گردد؛ استفاده از تولید پراکنده علاوه بر مزایای متعددی که برای سیستم

^۱ Per Unit (PU)

توزیع به همراه دارد می‌تواند مشخصه ولتاژ مسطح مورد نیاز برای کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه را نیز تأمین نماید. همچنین از هر دو روش می‌توان برای صرفه‌جویی در انرژی و کاهش تقاضای پیک بار استفاده کرد. لذا با نگاهی اجمالی به اهداف قابل دسترسی از طریق پیاده‌سازی روش کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه و جایگذاری تولید پراکنده دریافت می‌شود که این اهداف هم‌پوشانی نسبی با یکدیگر دارند و همچنین نحوه‌ی عملکرد دو روش مکمل و بهبود دهنده اثرات یکدیگر می‌باشد. باید توجه شود که محل و اندازه واحدهای DG به منظور امکان استفاده مفید از DG و محدود کردن اثرات منفی آن بر عملکرد سیستم، باید به دقت انتخاب شود. به طور خلاصه اتصال DG به شبکه، بهره‌وری انرژی در سمت تولید را افزایش می‌دهد در حالی که اعمال CVR باعث صرفه‌جویی انرژی در سمت تقاضا می‌شود [۴]. در این پژوهش اثرات DG روی CVR با هدف کاهش تلفات و کاهش تقاضای انرژی الکتریکی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۲- اهداف پایان‌نامه

در این پایان‌نامه هدف آن است که استفاده یکپارچه از دو مورد از روش‌های نوین بهبود بهره‌وری سیستم‌های توزیع مورد مطالعه قرار گیرد. کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه و تولیدات پراکنده روش‌هایی هستند که به طور مجزا مزایایی را برای سیستم توزیع به همراه دارند. با توجه به شرایطی که DG می‌تواند برای اجرای هر چه بیشتر CVR فراهم نماید، هدف آن است که به کارگیری همزمان و هماهنگ این دو روش مورد بررسی قرار گیرد و تأثیراتی که تولیدات پراکنده می‌توانند بر روی اجرای CVR داشته باشند، شناسایی و تجزیه و تحلیل گردد.

باعنایت به تأثیری که استفاده از DG روی کاهش تلفات سیستم توزیع خواهد داشت و با توجه به تأثیراتی که اجرای CVR بر روی کاهش مصرف بارهای سیستم توزیع خواهد داشت، هدف آن است که بهترین روش ادغام DG و CVR به منظور کاهش تلفات و تقاضای توان بارها، شناسایی گردد تا در

نهایت با تزریق کمترین توان ظاهری به شبکه، سیستم توزیع بتواند برق‌رسانی به مشترکین را در محدوده استاندارد و قابل قبول انجام دهد.

در مطالعات CVR؛ مدل وابسته به ولتاژ برای بار در نظر گرفته می‌شود، در این پژوهش نیز مدل بار ZIP^۱ برای نمایش رفتار مصرفی بار انتخاب گردیده است، تعیین ضرایب مدل بار از دیگر اهداف این پژوهش به شمار می‌آید. همچنین با توجه به ماهیت متغیر بار نسبت به تغییرات ولتاژ، جهت دستیابی هر چه بیشتر به اهداف برنامه‌ریزی، انتخاب تابع هدف مناسب برای جابجایی DG از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد، لذا بر روی توابع هدف مختلف مطالعه صورت خواهد گرفت تا از به کار گیری یکپارچه DG و CVR بهترین نتایج حاصل گردد.

در مطالعه موردی به منظور انجام شبیه‌سازی‌ها، سیستم توزیع نمونه‌ای در نظر گرفته خواهد شد که قرار است بار آن افزایش یابد، ولیکن به دلیل افت ولتاژ شدیدی که در شبکه ایجاد می‌گردد، مقرر گردیده تا حداکثر ۲۰ درصد توان مورد نیاز شبکه توسط DG تأمین گردد. هدف آن است که با استفاده هماهنگ از DG و CVR شرایطی فراهم گردد که علاوه بر آن که سیستم توزیع در محدوده استاندارد عمل نماید؛ کمترین تقاضای توان ظاهری را نیز داشته باشد.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم این پژوهش، ابتدا روش‌های کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه و سیستم‌های تولید پراکنده معرفی خواهند شد و پس از آن مبانی تئوری ابزارهای مورد استفاده در شبیه‌سازی از قبیل مدل بار، روش پخش بار و الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده، تشریح خواهد شد، در انتها نیز مروری بر روی تحقیقات گذشته مرتبط با این پژوهش صورت می‌گیرد و نتایج مهم آنها بیان می‌شود. در فصل سوم

^۱ Constant Impedance, Constant Current, and Constant Power load

ابتدا پژوهش انجام شده، تشریح خواهد گردید و سپس به تعریف مسئله و فرمول‌سازی آن از طریق تعیین ضرایب مدل بار و تعیین توابع هدف مورد نظر پرداخته خواهد شد و پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده تعیین خواهد گردید. در ادامه در فصل چهارم ابتدا سیستم نمونه مورد مطالعه معرفی خواهد گردید و سپس با انجام شبیه‌سازی و پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه نمونه ۳۳‌باسه، تأثیر حضور تولید پراکنده بر روی کاهش ولتاژ محافظه کارانه بررسی خواهد شد و همچنین میزان دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی در سناریوهای مختلف تولید شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل پنجم نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات در خصوص پژوهش‌های آتی پرداخته خواهد شد.

فصل دوم

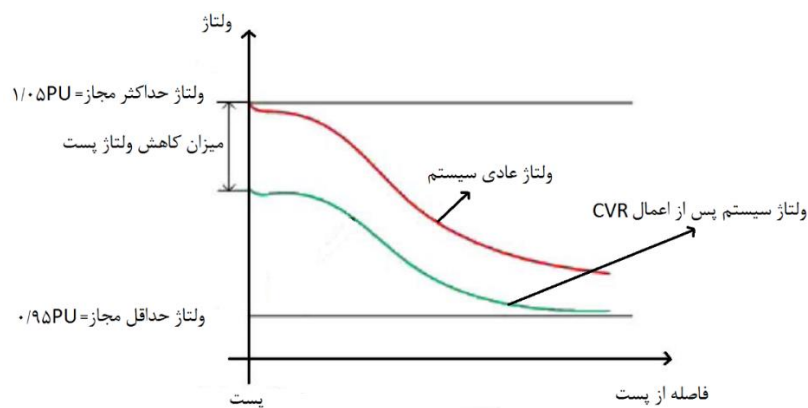
تشریح مفاهیم و مروری بر روش‌های مورد استفاده

شناخت هر چه بیشتر مباحث تئوری هر پژوهش، به دستیابی به اهداف پژوهش کمک شایانی خواهد کرد. در این بخش بر اساس مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته در گذشته، مفاهیم و روش‌هایی که شاکله اصلی پژوهش حاضر بر روی آن‌ها بنا شده است، تشریح می‌گردد. در قسمت اول؛ تعریف CVR، مزایا و روش‌های پیاده‌سازی و ارزیابی آن بیان شده است، پس از آن؛ تولیدات پراکنده و انواع آن تعریف و مزایای DG ذکر می‌گردد. در قسمت‌های بعدی مبانی شبیه‌سازی‌ها از قبیل الگوریتم بهینه‌سازی، پخش بار و مدل بار توصیف و معادلات مربوط به آن‌ها آورده شده است، در انتها مروری بر مطالعات گذشته در زمینه‌های مورد بحث در این بخش، صورت پذیرفته است.

۲-۲- مفهوم کاهش ولتاژ محافظه کارانه

کاهش ولتاژ محافظه کارانه ایده‌ای اثبات شده و یکی از مقرون به صرفه‌ترین راه‌ها با هدف دستیابی به کاهش مصرف برق از طریق کاهش سطح ولتاژ تغذیه و ارائه پایین‌ترین سطح ممکن ولتاژ سازگار با مقادیر نامی تجهیزات و سطوح مقرر شده توسط سازمان‌های نظارتی در محل مشترکین می‌باشد [۵]. در عصر شبکه هوشمند، CVR یکی از ارزان‌ترین فناوری‌هاست که می‌تواند به منظور فراهم نمودن استفاده بهتر از دارایی‌ها، کاهش تقاضا و بهبود بهره‌وری استفاده شود. با کاهش ولتاژ در سیستم توزیع به شیوه‌ای کنترل شده، CVR می‌تواند تقاضای ماکزیمم و تلفات را کاهش دهد و بارهای وابسته به ولتاژ را ملزم به مصرف انرژی کمتری نماید. در نتیجه اجرای CVR، در حالی که حداقل ولتاژ مصرفی استاندارد مشتری مطابق با سطح تعیین شده توسط آژانس‌های نظارتی رعایت شده است، امکان صرفه‌جویی بیشتری در انرژی نیز فراهم می‌گردد. از سوی دیگر، نه تنها کاهش ولتاژ سیستم توزیع خلی در عملکرد دستگاه‌های مصرفی ایجاد نخواهد نمود بلکه در اکثر مواقع موجب طولانی‌تر شدن عمر دستگاه‌های مصرف‌کننده نیز خواهد شد [۶] و [۷]. محدوده ولتاژ استاندارد قابل قبول که

تولیدکنندگان موظف هستند در اختیار مشترکین قرار دهند توسط استاندارد C84.1 موسسه استاندارد ملی آمریکا^۱ به میزان ۵ درصد مقدار نامی یعنی محدوده ۰/۹۵ PU تا ۱/۰۵ PU تعیین شده است و ایده عملیاتی CVR در اصل این است که باند ولتاژ سیستم، به راحتی و ارزان بدون ایجاد هیچ گونه آسیبی به وسایل مصرفی، نزدیک حد پایین اداره شود [۸]. نحوه تأثیر روش CVR بر روی ولتاژ سیستم توزیع به منظور دستیابی به اهداف بیان شده در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۲- تأثیر CVR بر ولتاژ سیستم توزیع [۴]

با توجه به اینکه یکی از اهداف قابل دستیابی توسط CVR کاهش مصرف مشترکین می باشد، لذا میان ایده کاهش ولتاژ محافظه کارانه و نوع و ترکیب بارهای متصل به شبکه توزیع ارتباط تنگاتنگی وجود دارد. مشخص شده است که بسیاری از بارها وابسته به ولتاژ هستند و زمانی که ولتاژ عرضه شده کاهش می یابد، مصرف برق این گونه بارها نیز کاهش می یابد [۹]. وابستگی بارهای امپدانس ثابت، جریان ثابت و توان ثابت به ولتاژ متغیر می باشد و در نتیجه میزان اثربخشی کاهش ولتاژ محافظه کارانه که با ایده تغییر ولتاژ توزیع شکل گرفته است نیز برای هر کدام از آنها متفاوت خواهد بود. به منظور بررسی اثربخشی برنامه CVR، به دست آوردن یک مدل که رفتار بارهای متصل به شبکه را به خوبی توصیف کند ضروری است. پژوهش های انجام شده در گذشته میزان اثربخشی های متفاوتی را در خصوص پیاده سازی کاهش ولتاژ محافظه کارانه گزارش نموده اند که به سبب همان تفاوت در نوع و ترکیب بارهایی

^۱ American National Standard Institute (ANSI)

می باشد که به شبکه های توزیع مورد مطالعه در گزارش های مختلف متصل بوده اند، بررسی و جمع بندی گزارش های منتشر شده معمولاً ۰/۳ تا ۱ درصد کاهش مصرف توان اکتیو به ازای هر ۱ درصد کاهش ولتاژ را نشان می دهد [۱۰]. طبق بررسی ای که بر روی شبکه های توزیع شهر نیویورک صورت گرفته است، بدون سرمایه گذاری در زیر ساخت ها، کاهش ولتاژ تا سقف ۴ درصد می تواند در اکثر شبکه های شهر نیویورک با اطمینان پیاده سازی شود [۱۱].

به منظور ارزیابی اثرات کاهش ولتاژ محافظه کارانه و ایجاد معیاری برای سنجش و مقایسه اثربخشی CVR در شرایط مختلف در یک شبکه و همچنین منفعت سنجی پیاده سازی کاهش ولتاژ محافظه کارانه در یک شبکه و در نهایت انتخاب شبکه نامزد به منظور پیاده سازی CVR، شاخصی به نام ضریب کاهش ولتاژ محافظه کارانه^۱ (CVR_f) تعریف شده است که از طریق تقسیم درصد صرفه جویی در توان اکتیو بر درصد کاهش ولتاژ محاسبه می شود. ضریب مشابه ای نیز می توان برای توان راکتیو تعریف کرد ($CVRQ_f$) که از تقسیم درصد کاهش توان راکتیو بر درصد کاهش ولتاژ محاسبه می شود. ضرایب معرفی شده به ترتیب به صورت معادلات ۱-۲ و ۲-۲ نمایش داده می شود [۱۲]:

$$CVR_f = \frac{\%KWh\ savings}{Voltage\ reduction} = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\% \Delta E}{\% \Delta V} \quad (1-2)$$

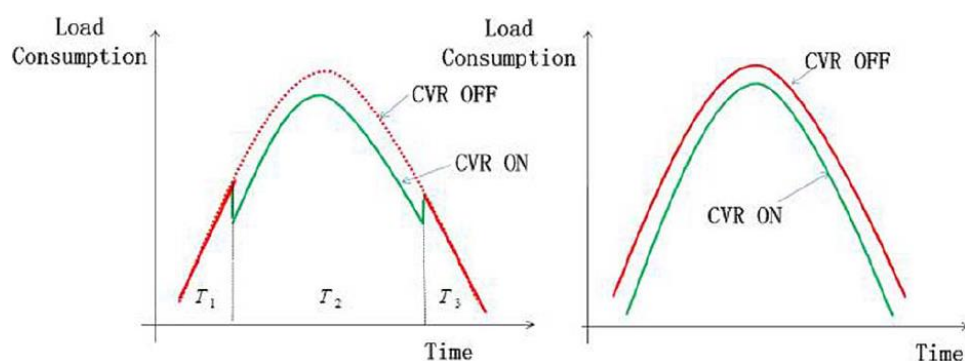
$$CVRQ_f = \frac{\%KVAR\ savings}{Voltage\ reduction} = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (2-2)$$

۱-۲-۲ انواع پیاده سازی کاهش ولتاژ محافظه کارانه

دو نوع پیاده سازی برای کاهش ولتاژ محافظه کارانه وجود دارد که هر یک از آن ها تعدادی از اهداف CVR را محقق می سازند و تفاوت آن ها در مدت زمان اعمال ایده CVR می باشد. تولیدکنندگان بر اساس وضعیت شبکه، نیازمندی ها و ملاحظات امنیتی، اقتصادی و عملیاتی، نوع CVR برای پیاده سازی در سیستم ها را انتخاب می کنند. نوع اول به عنوان کاهش تقاضای توان کوتاه مدت یا CVR کوتاه مدت

^۱ Conservation Voltage Reduction Factor

و نوع دوم به عنوان کاهش انرژی بلندمدت یا CVR بلندمدت نام‌گذاری شده‌اند. هدف از پیاده‌سازی CVR کوتاه‌مدت؛ کاهش بار ماکزیمم شبکه در وضعیت‌هایی که سیستم تحت محدودیت‌های ناگهانی قرار گرفته است، می‌باشد و لذا کاهش ولتاژ توزیع در طول ساعات اوج مصرف به منظور کاهش تقاضای پیک اعمال می‌گردد. در CVR کوتاه‌مدت، اولویت‌هایی مانند خروج از شرایط بحرانی، افزایش حاشیه پایداری سیستم، حفظ سلامت قطعات شبکه و عدم قطعی در شبکه مدنظر قرار می‌گیرند. در CVR بلندمدت اهداف کاهش مصرف و کاهش تلفات دنبال می‌شود و اولویت‌هایی مانند به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری‌های جدید و افزایش بهره‌وری شبکه مدنظر می‌باشد و لذا ولتاژ به طور دائم به منظور صرفه‌جویی در انرژی کاهش می‌یابد. نحوه عملکرد انواع پیاده‌سازی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۲- اثر CVR. (چپ) کاهش تقاضای پیک. (راست) کاهش انرژی ۲۴ ساعته [۱۰].

۲-۲-۲- اثرات کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه

همان‌طور که قبلاً ذکر شد؛ می‌توان از کاهش مصرف توان، کاهش تلفات و کاهش بار اوج به عنوان سه دست‌آورد برای کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه نام برد. یک مطالعه نشان می‌دهد؛ زمانی که کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه در یک سیستم نمونه پیاده‌سازی شده است، ۱۰ تا ۴۰ درصد صرفه‌جویی در انرژی ناشی از کاهش تلفات سیستم توزیع و مابقی به‌خاطر کاهش مصرف تجهیزات خانگی و تجاری بوده است که در ولتاژ پایین‌تری کار کرده‌اند [۱۳]. در ادامه به تشریح و چرایی شکل‌گیری اثرات کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه پرداخته شده است.

۲-۲-۱- کاهش مصرف

درصد کاهش ولتاژ تجربه شده توسط یک مشتری خاص شبکه و تأثیر کلی بر روی شبکه به طور عمده توسط دو عامل ترکیب بار کل شبکه و ساختار شبکه مشخص می شود. بارها در شبکه های توزیع عمدتاً وابسته به ولتاژ هستند، بارهای شبکه توزیع شامل سه نوع توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت می باشند و هریک دارای وابستگی متفاوتی نسبت به ولتاژ تغذیه هستند [۱۱]. همان طور که از معادله ۳-۲ می توان دریافت؛ توان مصرفی بارهای توان ثابت در زمان کاهش ولتاژ تغییری نخواهد کرد و جریان این نوع بارها متناسب با میزان کاهش ولتاژ، افزایش می یابد. در خصوص بارهای جریان ثابت از معادله ۳-۲ می توان دریافت که وقتی ولتاژ تغذیه کاهش می یابد، به دلیل ثابت بودن جریان، توانی که توسط بار از شبکه کشیده می شود نیز متناسب با میزان کاهش ولتاژ، کاهش خواهد یافت. در مورد بارهای امپدانس ثابت از معادله ۴-۲ می توان دریافت که وقتی کاهش ولتاژ تغذیه رخ می دهد، توانی که توسط بار از شبکه کشیده می شود، متناسب با مربع میزان کاهش ولتاژ، کاهش خواهد یافت.

$$P = V * I \quad (3-2)$$

$$P = \frac{V^2}{Z} \quad (4-2)$$

با توجه به توضیحات فوق می توان نتیجه گرفت؛ ترکیب بار شبکه در تعیین میزان کاهش مصرفی که توسط پیاده سازی کاهش ولتاژ محافظه کارانه ایجاد می شود نقش تعیین کننده ای دارد و به همین خاطر یکی از مهم ترین موضوعات در جهت شناسایی شبکه های مناسب به منظور پیاده سازی CVR، ترکیب بار شبکه است. این ترکیب بار توسط مدلی که به مدل ZIP معروف است، نشان داده می شود و بیان گر درصد حضور هر یک از انواع بارها در بار کلی شبکه است. همان طور که در معادلات ۲-۵ و ۲-۶ نمایش داده شده است؛ از مدل ZIP می توان به منظور نمایش ترکیب بار شبکه با توجه به ضرایب ZIP هر شبکه استفاده کرد و به میزان تأثیر اجرای CVR بر روی کاهش مصرف بار دستیافت و پیاده سازی CVR بر روی شبکه مورد نظر را منفعت سنجی کرد [۱۱].

$$P = P_0 \left[Z_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_p \frac{V}{V_0} + P_p \right] \quad (5-2)$$

$$Q = Q_0 \left[Z_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_q \frac{V}{V_0} + P_q \right] \quad (6-2)$$

هر چه بخش بیشتری از ترکیب بار سیستم توزیع را بارهای امپدانس ثابت یعنی بارهایی با ویژگی عمدتاً مقاومتی تشکیل دهد، اثر بخشی CVR در زمینه کاهش مصرف توان بارهای سیستم توزیع بیشتر خواهد بود. رایج‌ترین انواع بارهای امپدانس ثابت، بارهای روشنایی هستند، به عنوان مثال هنگامی که ولتاژ ارائه شده به لامپ‌های رشته‌ای کاهش می‌یابد، جریان درون رشته نیز کاهش خواهد یافت و در نتیجه انرژی مورد استفاده در لامپ نیز کاهش خواهد یافت [۱۴].

برای بارهای حلقه باز یعنی بارهای بدون فیدبک^۱، هیچ برنامه کنترلی که برای جبران کاهش ولتاژ ورودی، عملکرد بار را تغییر دهد وجود ندارد، لذا شبکه‌هایی که بخش عمده ترکیب بار آن‌ها را بارهای حلقه باز تشکیل می‌دهند به منظور پیاده‌سازی CVR بسیار مناسب هستند، در حالی که این برنامه کنترلی برای بارهای حلقه بسته وجود دارد و لذا این‌گونه بارها هدف کاهش مصرف توسط کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه را محقق نخواهند ساخت. بارهای حلقه باز معمولی شامل لامپ‌های روشنایی (مانند لامپ‌های رشته‌ای، لامپ‌های فلورسنت) و موتورهای غیر قابل تنظیم (مانند موتورهای تهویه) هستند. لامپ‌های رشته‌ای و لامپ‌های فلورسنت در ولتاژ تغذیه پایین‌تر، تمایل به جذب انرژی کمتری دارند. یکی دیگر از اثرات جانبی سودمند CVR، این است که کاهش حرارت می‌تواند باعث افزایش طول عمر مفید لامپ شود. میزان تغییر مصرف انرژی موتورهای غیرقابل تنظیم با وجود CVR بستگی به عوامل متعددی از جمله نوع، اندازه، بار و سرعت موتور دارد. اگر یک موتور در بار کمتر از کامل کار کند، CVR می‌تواند تلفات را کاهش دهد و باعث افزایش بهره‌وری شود. بارهای حلقه بسته معمولی شامل موتور درایو، بارهای با چرخه‌های حرارتی (مانند آبگرم‌کن برقی)، بارهای تنظیم شده توان ثابت (مانند کوره) هستند، برای این نوع بارها هیچ‌گونه آثار کاهش انرژی مشاهده نشده است [۱۶] و [۱۵] و [۳] و [۲].

^۱ Feedback

۲-۲-۲-۲- کاهش تلفات

تلفات شبکه به طور عمده از تلفات کابل ها و تلفات ترانسفورماتورها در هسته و سیم پیچ ها ایجاد می شود. تلفات در کابل ها و سیم پیچ های ترانسفورماتور متناسب با مربع جریان است در حالی که تلفات در هسته ترانسفورماتور متناسب با مربع ولتاژ است. وقتی ولتاژ کاهش می یابد، در بارهای توان ثابت، جریان افزایش خواهد یافت و در نتیجه بر اساس معادله ۲-۷ تلفات سری افزایش می یابد، البته این موضوع در خصوص بارهای امپدانس ثابت و جریان ثابت صادق نیست [۱۰]. از طرف دیگر، وقتی ولتاژ کاهش می یابد، تلفات در هسته ترانسفورماتور کاهش خواهد یافت و در نتیجه تلفات موازی کاهش می یابد. این دو نوع از تلفات در برابر کاهش ولتاژ رفتاری مخالف یکدیگر نمایش می دهند [۱۱].

از آنجا که کاهش ولتاژ محافظه کارانه بر روی شبکه هایی پیاده سازی می شود که ترکیب بار مطلوبی داشته باشند لذا افزایش تلفاتی که به سبب وجود درصدی از بارهای توان ثابت در شبکه ایجاد خواهد شد، نگران کننده نخواهد بود، چرا که ترانسفورماتورها به طور گسترده در تجهیزات الکتریکی سیستم های قدرت مستقر هستند و استفاده از CVR می تواند بر اساس معادلات ۲-۸ و ۲-۹ تلفات هسته از جمله تلفات جریان گردابی و تلفات هیستریزیس^۱ در ترانسفورماتور را کاهش دهد [۱۸] و [۱۷] و [۱۵] و [۱]. در معادله ۲-۷، R_{line} مقاومت خط، I_{line} جریان جاری در خط و $P_{loss, line}$ تلفات توان اکتیو ناشی از عبور جریان از خط می باشد. در معادله ۲-۸، P_f تلفات جریان گردابی ترانسفورماتور، k'_f ضریب ثابت و V مقدار مؤثر ولتاژ می باشد. در معادله ۲-۹، P_h تلفات هیستریزیس ترانسفورماتور، K'_H ضریب ثابت، V مقدار مؤثر ولتاژ، f فرکانس و n عددی بین ۱/۵ و ۲/۵ می باشد.

$$P_{loss, line} = R_{line} I_{line}^2 \quad (۷-۲)$$

$$P_f = k'_f V^2 \quad (۸-۲)$$

$$P_h = K'_H V^n f^{1-n} \quad (۹-۲)$$

^۱ Hysteresis loss

مطالعه‌ای بر روی دو شبکه توزیع در شهر نیویورک صورت گرفته است و نتایج نشان می‌دهد؛ در طی شرایط عادی ۸۵ درصد تلفات مربوط به ترانسفورماتورها می‌باشد، به عبارت دیگر اجرای CVR منجر به کاهش در تلفات خالص این دو شبکه خواهد شد [۱۱]. همچنین با توجه به مطالعات صورت گرفته در مرجع [۱] هنگامی که تلفات ترانسفورماتور در نظر گرفته شده است، CVR می‌تواند تلفات خالص سیستم را کاهش دهد. با بررسی مطالعات گذشته در خصوص میزان و نحوه تأثیر CVR بر روی تلفات شبکه می‌توان دریافت که رفتار تلفات از شبکه‌ای به شبکه دیگر متفاوت است، چرا که تلفات به عوامل مختلفی مانند اندازه، بار و ساختار شبکه وابسته است، ولی در اکثر مواقع پیاده‌سازی کاهش ولتاژ محافظه کارانه نقش مثبتی در کاهش تلفات کل سیستم ایجاد نموده است.

۲-۲-۳- کاهش بار پیک

با توجه به عواملی مانند روند روبه رشد مصرف برق و وجود محدودیت در امکانات، قوانین و مقررات سازمان‌های نظارتی در خصوص قابلیت اطمینان و پایداری سیستم‌ها، و ملاحظات اقتصادی امروزه بیش از پیش کاهش تقاضای اوج شبکه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. مکان‌های زیادی وجود دارد که توان تولید شده، تقریباً مساوی تقاضا مصرفی است، اگر بار کاهش پیدا نکند، مشتریان ممکن است ولتاژی کمتر از سطح قابل قبول دریافت کنند و یا ممکن است با قطعی روبرو شوند چرا که شبکه باید بار را در سطح پایدار نگه دارد.

برای بسیاری از شبکه‌ها و مصرف‌کنندگان هزینه توان الکتریکی مصرف شده با توجه به میزان اوج مصرف محاسبه می‌شود، کاهش بار اوج توسط کاهش ولتاژ محافظه کارانه می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های پرداختی بابت مصرف برق نیز گردد که صرفه‌جویی اقتصادی برای مشترکین را به همراه خواهد داشت و از آن طرف برای تولیدکنندگان، تاخیر در سرمایه‌گذاری‌های جدید، رعایت پایداری و قابلیت اطمینان قابل قبول شبکه و کاهش تلفات شبکه را به همراه خواهد داشت.

۲-۳- روش‌های ارزیابی اثرات کاهش ولتاژ محافظه کارانه

با توجه به این که کاهش ولتاژ محافظه کارانه ایده‌ای در راستای بهبود بهره‌وری شبکه‌های سازگار با آن است و تقریباً نیاز به نصب دستگاه‌های جدید در شبکه‌ها ندارد و با تجهیزات موجود در شبکه‌ها قابل پیاده‌سازی است، ارزیابی عملکرد کاهش ولتاژ محافظه کارانه روی مدار شبکه‌ها، همواره یک مسئله حیاتی در تصمیم‌گیری‌های مربوط به پیاده‌سازی CVR، انتخاب شبکه‌های هدف به منظور اجرای CVR و انجام بررسی‌های سود و هزینه به شمار می‌آید. نکته اساسی در تعیین میزان اثرات CVR، تمیز دادن میزان صرفه‌جویی انرژی حاصل از CVR از سایر عوامل مؤثر است. روش‌های ارزیابی اثرات CVR مبتنی بر مقایسه، رگرسیون^۱، تجزیه^۲ و شبیه‌سازی هستند که در ادامه به ترتیب تشریح می‌گردند.

در روش اول یعنی روش مبتنی بر مقایسه، با در نظر گرفتن یک شبکه در دو دوره عملکردی مشابه و یا دو شبکه مشابه در یک دوره عملکردی، دو گروه عادی و کاهش ولتاژ یافته ایجاد می‌گردد. منظور از شرایط مشابه در خصوص دو دوره عملکردی، از نظر وضعیت آب‌وهوایی و مدت زمان عملیاتی می‌باشد و منظور از شرایط مشابه در خصوص دو شبکه، از نظر ساختار، تنظیمات، مصرف بار، ترکیب بار و در یک موقعیت مکانی قرار داشتن دو شبکه می‌باشد. سپس اندازه‌گیری‌های مورد نظر را برای گروه عادی بدون اعمال CVR و برای گروه کاهش ولتاژ یافته با اعمال CVR انجام می‌دهد و در نهایت با به دست آوردن میزان صرفه‌جویی انرژی هر گروه و مقایسه آن‌ها، تأثیر کاهش ولتاژ محافظه کارانه و میزان صرفه‌جویی به دست آمده از آن را محاسبه می‌نماید. البته از آنجا که هیچ دو فیدر مشابه و یا هیچ دو روز مشابه‌ای از لحاظ عملیاتی وجود ندارد، مقایسه به صورت کاملاً دقیق نخواهد بود و خطاهایی نیز وجود خواهد داشت.

روش بعدی که معرفی خواهد گردید، روش مبتنی بر رگرسیون می‌باشد. روش‌های مبتنی بر رگرسیون بر اساس مدل‌های رگرسیون خطی هستند که بار را معمولاً به اجزای پایه و وابسته به دما

^۱ Regression

^۲ Synthesis

تجزیه می‌کنند. در روش رگرسیون؛ کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه روی شبکه مورد نظر اعمال و مقادیر مورد نیاز، به عنوان گروه کاهش ولتاژ یافته اندازه‌گیری می‌شوند، ولیکن برای محاسبه میزان بار مصرفی گروه عادی یعنی وضعیت معمولی شبکه که CVR اعمال نشده است، بار به صورت تابعی از عوامل مؤثر بر آن مدل می‌شود و سپس از یک معادله رگرسیون خطی به منظور پیش‌بینی میزان مصرف بار در شرایط عادی استفاده می‌شود. در نهایت با مقایسه مقادیر محاسبه شده گروه عادی و مقادیر اندازه‌گیری شده گروه کاهش ولتاژ یافته، میزان تأثیرگذاری CVR به دست می‌آید. البته از آن‌جا که مدل خطی آنقدر دقیق نیست که رفتارهای غیرخطی را نمایش دهد، لذا این روش نیز با خطاهایی همراه است.

روش سوم، روش مبتنی بر تجزیه می‌باشد. در این روش، بار کل شبکه را به اجزا کوچک‌تر تقسیم می‌کند و وابستگی هر جزء به ولتاژ^۱ را جمع‌آوری می‌کند و در نهایت با استفاده از سهم هر جزء در بار کل و میزان وابستگی هر جزء به ولتاژ، مقدار انرژی مصرف‌شده در ولتاژ معین را تعیین می‌نماید. لذا به منظور محاسبه تأثیر کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه بر روی شبکه، ابتدا توسط روش تجزیه، میزان مصرف بار کل شبکه را در ولتاژ گروه عادی و ولتاژ گروه کاهش ولتاژ یافته به دست آورده و با مقایسه این دو مقدار اثربخشی CVR محاسبه می‌گردد. روش مبتنی بر تجزیه می‌تواند برای به دست آوردن تخمین سریع اثرات CVR قبل از اجرای آن استفاده شود، هرچند که جمع‌آوری سهم هر جزء از بار کل و محاسبه وابستگی هر جزء نسبت به ولتاژ کار دشواری است. لازم به ذکر است که در روش تجزیه، اثرات CVR روی هر جزء از بار، ثابت فرض شده است که می‌تواند از معایب این روش به شمار آید [۱۹].

آخرین روش، روش مبتنی بر شبیه‌سازی می‌باشد. روش‌های شبیه‌سازی مبتنی بر مدل‌سازی سیستم و محاسبات پخش توان می‌باشند. کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه روی شبکه موردنظر پیاده‌سازی و اندازه‌گیری‌های مورد نیاز برای گروه کاهش ولتاژ یافته انجام می‌پذیرد، سپس از شبیه‌سازی کمک گرفته می‌شود و خروجی‌های پخش توان، مقادیر مصرف توان گروه عادی را تعیین می‌نمایند و در نهایت با مقایسه مقادیر گروه کاهش ولتاژ یافته و گروه عادی، اثربخشی CVR و میزان صرفه‌جویی در انرژی

^۱ Load-To-Voltage (LTV)

محاسبه می‌گردد. اگر مدل‌سازی‌ها با دقت مناسبی همراه باشند، روش مبتنی بر شبیه‌سازی از دقت و اعتبار بالایی برخوردار خواهد بود. مدل‌سازی بار شبکه در این روش از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد، مدل‌های سنتی بار مانند مدل‌های نمایی و ZIP می‌توانند برای نشان دادن دستگاه‌های حلقه باز استفاده شوند، برای بارهای حلقه بسته مانند سیستم‌های گرم کننده و تهویه و تهویه مطبوع، مدل پارامتر حرارتی معادل^۱ باید استفاده شود [۲۱] و [۲۰].

هر یک از روش‌های ارزیابی CVR دارای محاسن و معایبی می‌باشند، در جدول ۱-۲ مقایسه‌ای بین ویژگی‌های روش‌های ارزیابی CVR انجام پذیرفته است.

جدول (۱-۲) : مقایسه روش‌های ارزیابی CVR ، (+): ویژگی مثبت، (-): ویژگی منفی [۱۰].

شبکه	روش	ویژگی‌ها	CVR_f
Snohomish	مقایسه	(+) ساده و سرراست، (-) وابسته به گروه کنترل،	۰/۵۰
NU	مقایسه	(-) دقت پایین	۱/۰۰
AEP	رگرسیون	(+) دارای معنای فیزیکی واضح، (+) دارای قابلیت پیش‌بینی اثرات CVR، (-) خطای رگرسیون، (-) مدل بار خطی	۰/۶۲
California	رگرسیون		۱/۰۰
NEEA	رگرسیون		۰/۶۱
Avista	رگرسیون		۰/۸۴
BC Hydro	رگرسیون		۰/۷۰
SCE	رگرسیون		۱/۰۰
BPA	تجزیه	(+) تخمین و پیش‌بینی سریع اثرات CVR، (-) جمع‌آوری اطلاعات دقیق بار مشکل است	۰/۹۹
Australia	تجزیه		۰/۴۰
EPRI	شبیه‌سازی	(+) ممکن است دقیق باشد، (-) مدل‌سازی دقیق بار دشوار است، (-) مدل بار غیر متغیر با زمان است	۰/۷۰
Taipower	شبیه‌سازی		۰/۵۷

روش‌های مبتنی بر مقایسه به دلیل عدم دقت، زیاد محبوب نیستند. روش‌های مبتنی بر تجزیه به اطلاعات سهم بار نیاز دارند که تعیین آن‌ها دشوار است. روش‌های مبتنی بر رگرسیون به طور گسترده ای برای ارزیابی اثرات CVR استفاده می‌شوند. اگر بتوان رفتار بار را با دقت مدل‌سازی کرد، روش‌های شبیه‌سازی دارای این پتانسیل هستند که برای اعتبارسنجی و ارزیابی CVR استفاده شوند [۱۰]. در

^۱ Equivalent Thermal Parameter (ETP)

این پژوهش با توجه به امکانات، از روش مبتنی بر شبیه‌سازی به منظور ارزیابی اثرات کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه و محاسبه ضریب CVR استفاده شده است.

۲-۲-۴- روش‌های پیاده‌سازی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه

رایج‌ترین روش به منظور پیاده‌سازی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه استفاده از ترانسفورماتورهای دارای تغییردهنده تپ می‌باشد که در نیروگاه‌ها، پست‌های انتقال و پست‌های توزیع قرار دارند و با تغییر موقعیت تپ آن‌ها می‌توان سبب تغییر در ولتاژ شبکه شد، این روش به تغییردهنده تپ تحت بار^۱ معروف است. روش LTC ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش پیاده‌سازی CVR محسوب می‌شود، چرا که به طور معمول برای کنترل ولتاژ ثانویه پست مورد استفاده قرار می‌گیرد و تقریباً در تمام پست‌ها ترانسفورماتورهای دارای تپ تغییردهنده موجود می‌باشد که بدین معنی است که هیچ هزینه اضافی برای بهبود وضعیت سیستم وجود ندارد. از آن‌جا که روش LTC تنها به کاهش ولتاژ شبکه می‌پردازد و در بسیاری از شبکه‌ها عمق کاهش ولتاژ مجاز محدود است؛ لذا روش‌های دیگری معرفی گردیده است که علاوه بر پیاده‌سازی CVR، افزایش اثرات آن و اصلاح مشخصه ولتاژ به منظور امکان اعمال کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه بیشتر را نیز در نظر داشته باشند.

برای شبکه با افت ولتاژ بزرگ، عمق کاهش ولتاژ محدود است، لذا روش جبران افت خط^۲، یکی از روش‌هایی است که با کاهش افت ولتاژ موجود در شبکه، به پیاده‌سازی مؤثرتر CVR کمک می‌نماید [۲۲]. روش LDC شامل تنظیمات کنترل روی تنظیم‌کننده ولتاژ یا ترانسفورماتورها می‌باشد که به منظور حفظ ولتاژ بخش‌های دور دست‌تر مدار در سطوح ولتاژ حداقلی قابل قبول، درحالی که بقیه ولتاژ مدار اجازه دارد متفاوت از شرایط بار باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه LDC یک راه آسان برای کنترل ولتاژ است، ولیکن دارای برخی اشکالات نیز است؛ مشخص کردن تنظیمات LDC دشوار است و نمی‌تواند با ذات دینامیکی بارهای توزیع و تغییرات پیکربندی شبکه انطباق بیابد [۱۰].

^۱ Load Tap Changer (LTC)

^۲ Line Drop Compensation (LDC)

روش دیگری که در کنار LTC می‌تواند به پیاده‌سازی CVR کمک نماید، استفاده از بانک‌های خازنی^۱ در طول شبکه است. خازن‌ها می‌توانند جبران‌سازی توان راکتیو و در نتیجه شرایطی مساعدتر برای پیاده‌سازی CVR فراهم نمایند. خازن‌ها را می‌توان با روش‌های کنترل ولتاژ برای انجام کنترل ولت-وار برای اجرای CVR هماهنگ کرد. برای یک شبکه با ضریب CVR خاص، کاهش ولتاژ عمیق‌تر در محدوده مجاز می‌تواند منجر به صرفه‌جویی انرژی بیشتر شود. عمق کاهش ولتاژ برای مدارهایی که افت ولتاژ قابل توجهی را تجربه کرده‌اند محدود است. همواره مشخصه ولتاژ نسبتاً مسطح برای شبکه به منظور دستیابی به اجرای مؤثر CVR ترجیح داده می‌شود. با قراردادن خازن در مکان‌های مناسب، می‌توان مشخصه ولتاژ مسطح را فراهم کرد، تصحیح ضریب توان برای رسیدن به مقدار واحد را عملیاتی کرد و تلفات توان را کاهش داد. مرجع [۲۳] الگوریتم بهینه‌سازی دو مرحله‌ای کنترل ولت-وار برای CVR پیشنهاد می‌کند، مرحله اول به منظور مأموریت بانک خازنی برای اصلاح ضریب توان و مسطح‌سازی مشخصه ولتاژ می‌باشد، مرحله دوم این است که تپ LTC نسبت به کاهش ولتاژ مجاز به دست آمده تغییر یابد. همچنین نشان داده شده است؛ برای شبکه‌های بدون LTC یا تنظیم‌کننده ولتاژ، بانک‌های خازنی می‌توانند برای کاهش ولتاژ مستقیم استفاده شوند، که می‌توانند ۱٪ ولتاژ شبکه را کاهش دهند [۲۴].

روش دیگری که در آن ایده کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه پیاده‌سازی می‌شود، تنظیم ولتاژ در محل کنتور مشترکین است که تنظیم‌کننده ولتاژ خانگی^۲ نامیده می‌شود [۲۵]. دستگاه HVR در کنتور مشتری نصب می‌شود و برای تنظیم ولتاژ در پایین‌ترین سطح مجاز در محل مصرف‌کننده به کار می‌رود. در مطالعه‌ای که در گذشته انجام پذیرفته است، در ۳۹۵ منزل مسکونی دستگاه‌های HVR نصب شده است، و امکان کاهش ولتاژ ۳/۵ تا ۵/۲ درصدی مشاهده شده است. معایب HVR این است که برای نصب تجهیزات در محل و پرداخت هزینه سرمایه‌گذاری به مشتریان وابسته است. علاوه بر این،

^۱ Capacitor Bank (CB)

^۲ Home Voltage Regulator (HVR)

HVR هیچ سودی برای کمتر شدن تلفات سیستم توزیع ندارد، از این رو HVR به طور گسترده استفاده و اجرا نمی‌شود [۱].

روش‌های اولیه برای کاهش ولتاژ مانند تغییر دهنده تپ تحت بار، جبران افت خط، کاهش مبتنی بر خازن و کاهش ولتاژ خانگی، حلقه باز و بدون فیدبک ولتاژ هستند. از آن جا که کاهش ولتاژ محافظه کارانه به منظور اثربخشی بیشتر نیازمند مشخصه ولتاژ مسطح می‌باشد و با توجه به این که پیاده‌سازی CVR منجر به کاهش ولتاژ سیستم توزیع می‌گردد، لذا ممکن است عملکرد کاهش ولتاژ محافظه کارانه در تداخل با سایر تنظیم کننده‌های ولتاژ حاضر در شبکه که مبادرت به افزایش ولتاژ سیستم توزیع می‌نمایند باشد. با پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه صنعت برق، مفهومی به نام کنترل ولت-وار ظهور پیدا کرده است، از این رو به منظور پیاده‌سازی مطلوب‌تر کاهش ولتاژ محافظه کارانه، از روش کنترل ولت-وار استفاده می‌شود تا تداخل‌های عملکردی احتمالی میان اجزا شبکه با کاهش ولتاژ محافظه کارانه را به حداقل برساند و بین آن‌ها هماهنگی ایجاد نماید. در این روش در حالی که همه یا چندهدف از اهداف کنترلی مانند کاهش تلفات، بهبود ضریب توان، کاهش انحرافات ولتاژ در نظر گرفته می‌شود، کاهش ولتاژ محافظه کارانه نیز به عنوان یک حالت عملیاتی در این کنترل ولت-وارهای حلقه بسته به شمار می‌آید [۱۰].

به طور کلی، کاهش ولتاژ حلقه باز راهی مناسب و مقرون به صرفه برای اجرای کاهش ولتاژ محافظه کارانه است. با این حال؛ عمق کاهش ولتاژ محدود و عدم تطبیق با تغییرات دینامیکی سیستم توزیع از اشکالات این روش‌ها به حساب می‌آید. از طرف دیگر در مقایسه با روش‌های حلقه باز، کنترل ولت-وار حلقه بسته دارای محاسنی از قبیل؛ کاهش ولتاژ بهینه سازمان یافته، اثر صرفه‌جویی در انرژی بیشتر و انطباق با تغییرات دینامیکی سیستم می‌باشد [۱۰]. هر یک از روش‌های اعمال کاهش ولتاژ محافظه کارانه دارای محاسن و معایبی می‌باشند، در جدول ۲-۲ مقایسه‌ای بین ویژگی‌های روش‌های اجرای کاهش ولتاژ محافظه کارانه انجام پذیرفته است، با توجه به نیازمندی‌ها و امکانات موجود، متولیان صنعت برق می‌توانند هر یک از این روش‌ها را انتخاب نمایند.

جدول (۲-۲) : روش های اجرای CVR ، (+): ویژگی مثبت، (-): ویژگی منفی [۱۰].

کاهش ولتاژ	ویژگی ها	روش	شبکه
٪ ۲/۵	(+) ساده و اقتصادی (-) کاهش ولتاژ کم (-) بدون فیدبک ولتاژ، ممکن است در ولتاژهای پایین جواب دهد	LTC	California
٪ ۲-۳/۹	(+) ولتاژ انتها خط کنترل می شود	LDC	NEEA
٪ ۳	(+) کاهش ولتاژ بزرگ تر نسبت به LTC (-) تنظیمات پیچیده	LDC	California
٪ ۲/۵	(-) بدون فیدبک ولتاژ	LDC	CPUC
٪ ۲	(-) عدم تطبیق با تغییرات دینامیکی	LDC	Duke
٪ ۲/۱	(+) ولتاژ انتها خط کنترل می شود (+) کاهش ولتاژ بزرگ تر نسبت به LTC	LDC,CB	Snohomish
٪ ۴/۶	(+) تلفات توان کمتر، مشخصه ولتاژ مسطح تر، بهبود ضریب توان (-) جایگذاری خازن پیچیده است	LDC,CB	BPA
٪ ۳	(-) بدون فیدبک ولتاژ (-) عدم هماهنگی بین LTC و CB	LDC,CB	NU
٪ ۴/۱	(-) عدم تطبیق با تغییرات دینامیکی، (-) هزینه بالا	LDC,CB	GPC
٪ ۳	(+) کاهش ولتاژ بزرگ تر	VVC	BS Hydro
٪ ۲/۳	(+) مطمئن تر به دلیل وجود فیدبک ولتاژ	VVC	Avista
٪ ۴	(+) تطبیق با تغییرات دینامیکی (-) پیچیده و با هزینه بالا	VVC	Dominion

۲-۲-۵- اثر فصل ها بر کاهش ولتاژ محافظه کارانه

به دلیل تغییرات در آب و هوا و الگو مصرف مشترکین، ضرایب CVR در فصول مختلف متفاوت می باشد. مطالعات مختلفی اثرات CVR در فصل های مختلف را مورد بررسی قرار داده اند که در جدول ۲-۳ نتایج آن ها نمایش داده شده است. در حالت کلی، بارها را می توان به سه نوع مسکونی، تجاری و صنعتی طبقه بندی کرد که در جدول ۲-۳ ضرایب CVR هر طبقه از بارها به طور جداگانه آورده شده است. در جدول ۲-۳ منظور از نوع بار ترکیبی، بارهایی هستند که شامل هر سه نوع مسکونی، تجاری و صنعتی می باشند. با توجه به این جدول، می توان نتیجه گرفت که در فصل ها و روزهای گرم تر ضرایب

CVR بالاتر و فصل‌ها و روزهای سردتر دارای ضرایب CVR پایین‌تر هستند، علت این موضوع نیز به‌خاطر ترکیب بار مصرفی مشترکین و تفاوت تأثیر CVR بر بارهای مختلف است. برای مثال در تابستان سیستم‌های سرمایشی مانند سیستم‌های تهویه مطبوع سهم قابل توجه‌ای در بار مصرفی مشترکین دارند که CVR روی آن‌ها تأثیر بالایی دارد و در فصل زمستان سیستم‌های گرمایشی با چرخه حرارتی سهم زیادی در بار مصرفی مشترکین دارند که CVR روی مصرف توان آنها تأثیر قابل توجهی ندارد. جدول ۲-۳ ضرایب به دست آمده در خصوص ضرایب CVR فصل‌های مختلف را نمایش می‌دهد.

جدول (۲-۳): ضرایب CVR فصل‌های مختلف [۱۰].

مرجع	زمستان	پائیز	تابستان	بهار	نوع
AEP	۰/۸۷	۰/۴۵	۰/۷۹	۰/۷۹	مسکونی
	۰/۸۲	۰/۶۴	۱/۰۱	۰/۹۱	تجاری
	۰/۵۳	۰/۳۳	۰/۸۳	۰/۸۹	صنعتی
NEEA	۰/۵۱	۰/۶۰	۰/۷۸	۰/۵۷	ترکیبی
HQ	۰/۱۲	-	۰/۶۷	-	مسکونی
	۰/۸۰	-	۰/۹۷	-	تجاری
	۰/۱۰	-	۰/۱۰	-	صنعتی
BC Hydro	-	-	۰/۷۷	۰/۶۰	ترکیبی

۲-۳- مروری بر تولید پراکنده

با پیشرفت روزافزون صنعت برق تحولات عمده‌ای در آن رخ می‌دهد که تحت عنوان کلی تجدید ساختار^۱ صنعت برق مطرح می‌گردند. یکی از تکنولوژی‌های جدیدی که با هدف کاهش آلودگی محیط زیست، بهبود مشخصه ولتاژ، به تأخیر انداختن سرمایه‌گذاری‌های کلان جدید در صنعت برق، بالا بردن

کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم، کاهش تلفات، توان آماده به کار در دسترس، اصلاح بار اوج، حمایت از پایداری دینامیکی سیستم و آزادسازی ظرفیت شبکه ظهور پیدا کرده است، تولید پراکنده نام دارد. تولید پراکنده رویکردی برای تأمین برق در قلب سیستم قدرت می باشد، تولیدات پراکنده منابع تولید انرژی الکتریکی هستند که به شبکه توزیع متصل می گردند. این منابع در مقایسه با ژنراتورهای بزرگ و نیروگاه ها، حجم و ظرفیت تولید کمتری داشته و با هزینه های پایین تری راه اندازی می شوند، لذا به جای استفاده از واحدهای تولید متمرکز سنتی با اندازه هایی بین مگاوات تا گیگاوات از تولیدات پراکنده با اندازه کیلووات تا مگاوات در سمت مصرف استفاده می شود. در گذشته معمولاً DG تنها برای تولید توان اکتیو مورد استفاده قرار می گرفت، اما با افزایش کاربردهای آن، طرح هایی در حال ظهور است به نحوی که DG می تواند هر دو توان اکتیو و راکتیو را فراهم سازد [۲۶]. با توجه به این امکان، واحدهای DG می توانند به عنوان متغیرهای قابل کنترل در کنترل ولت-وار ادغام شوند و همچنین در مزایای استفاده از DG بهبود ایجاد نمایند.

اخیراً، ادغام DG در فیدرهای توزیع به سرعت در حال افزایش است، محل و اندازه واحدهای DG به منظور امکان استفاده مفید از DG و محدود کردن اثرات منفی آن بر عملکرد سیستم توزیع، باید به دقت انتخاب شود، عموماً منابع تولید پراکنده در نزدیکی مصرف کنندگان سیستم توزیع نصب می شود و ظرفیت تولید واحدهای تولید پراکنده نیز متناسب با توان مصرفی بار شبکه های توزیع تعیین می گردد. برخی اهداف استفاده از تولید پراکنده مانند کاهش تلفات [۲۶]، بهبود ولتاژ [۲۷]، بهبود قابلیت اطمینان [۲۸]، افزایش پایداری [۲۹] و ملاحظات اقتصادی [۴] در مقالات مختلف بررسی شده است.

۲-۳-۱- انواع منابع تولید پراکنده

تولیدات پراکنده در انواع و ظرفیت های مختلف یافت می شوند. توربین های بادی، مبدل های خورشیدی، نیروگاه های زمین گرمایی، میکروتوربین ها، توربین های احتراقی و پیل های سوختی از انواع منابع تولید پراکنده هستند.

در توربین‌های بادی از انرژی باد استفاده می‌شود، این توربین‌ها با توجه به موقعیت مکانی و سرعت باد دارای ۲ یا ۳ پره می‌باشند و به دلیل کمتر بودن اغتشاشات هوا در ارتفاعات بالا، ارتفاع این توربین‌ها تقریباً به ۳۰ متر می‌رسد. توربین‌های بادی با چرخاندن ژنراتور سنکرون یا آسنکرون انرژی الکتریکی تولید می‌نمایند. اگر از ژنراتور سنکرون استفاده شود، برق تولیدی به دلیل متغیر بودن فرکانس آن، ابتدا توسط یکسوکننده DC شده و در مرحله بعد به وسیله یک مبدل DC به DC سطح ولتاژ آن افزایش می‌یابد، سپس خروجی مبدل به یک اینورتر ارسال خواهد شد تا برقی به صورت AC با فرکانس مطلوب در اختیار مصرف‌کننده قرار گیرد.

در مبدل‌های خورشیدی با استفاده از یک سری مواد نیمه هادی تحت عنوان سلول‌های خورشیدی^۱ یا سلول‌های فتوولتائیک، انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. سلول‌های PV در واقع مشابه یک دیود p-n عمل می‌کنند، انرژی ذخیره شده از فوتون‌های نور خورشید در قسمت نوع p نیمه هادی سیلیکونی به حامل‌های الکترونی موجود در قسمت n منتقل می‌شود، در نتیجه فوتون دریافتی از نور خورشید به حرکت حامل‌هایی چون الکترون و حفره نیمه‌هادی منجر شده و جریان الکتریکی تولید خواهد شد. در مبدل‌های خورشیدی، میزان نور خورشید جذب شده و فناوری سلول خورشیدی که دائماً در حال پیشرفت است، دو عاملی هستند که در میزان انرژی الکتریکی تولیدشده نقش تعیین‌کننده دارند [۳۰].

در نیروگاه‌های زمین‌گرمایی از حرارت استخراجی از زمین به منظور تولید بخار به کار گرفته شده در توربین‌ها استفاده می‌شود. این نیروگاه‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های معمولی ساختار کوچک‌تری دارند و می‌توانند به طور شبانه‌روزی بدون نیاز به هزینه سوخت مورد استفاده قرار گیرند. اولین نیروگاه زمین‌گرمایی در سال ۱۹۶۰ با ظرفیت تولید ۱۱ مگاوات در آمریکا راه‌اندازی شده است [۳۱].

^۱ Photovoltaic (PV)

میکروتوربین‌ها مولدهای کوچک تولید برق هستند که کمپرسور، توربین و ژنراتور روی یک شفت قرار گرفته و با سرعت مساوی می‌چرخند، این مولدها با تمامی انواع سوخت‌های فسیلی قابلیت کارکرد دارند. مبدل قدرت این نوع مولدها اینورتر می‌باشد و از گاز طبیعی، هیدروژن، دیزل و پروپان به عنوان سوخت مصرفی این مولدها می‌تواند استفاده شود. این مولدها دارای مقدار نامی ۲۵ تا ۵۰۰ کیلووات و بازده ۲۰ تا ۳۰ درصد هستند.

پیل‌های سوختی یکی از مدرن‌ترین نوع منابع تولید پراکنده هستند و با استفاده از ترکیب هیدروژن گاز متان و اکسیژن هوا، قابلیت تولید انرژی الکتریکی با درصد آلاینده‌گی صفر را دارا هستند. بازده این روش بیش از ۵۰ درصد خواهد بود، ولیکن به دلیل گران‌قیمت بودن، استفاده از آن‌ها در حال حاضر مقرون به صرفه نمی‌باشد و دارای کاربردهای خاص مانند استفاده در ماهواره‌های فضایی دارند [۳۲].

۲-۳-۲- مزایای استفاده از تولید پراکنده

یکی از مطالب مهم، میزان توان تزریقی توسط DG به شبکه می‌باشد که برای نمایش این میزان، از مفهوم سطح نفوذ DG استفاده می‌شود. سطح نفوذ DG را می‌توان به صورت تقسیم تولید کل DG بر بار پیک سیستم تعریف کرد. تأثیر DG در سیستم توزیع متناسب با سطح نفوذ آن متفاوت است و در صورت جابجایی و مقداریابی صحیح، می‌تواند اثرات مثبتی بر روی مشخصه ولتاژ، تلفات الکتریکی، کیفیت توان، قابلیت اطمینان، پایداری و آزادسازی ظرفیت سیستم، داشته باشد [۳۳] و [۱۲].

۲-۳-۲-۱- کاهش تلفات

با توجه به این که قسمت عمده تلفات در شبکه قدرت در بخش توزیع رخ می‌دهد، واحدهای تولید پراکنده در صورتی که با انجام محاسبات و برآوردهای لازم، به طور بهینه در محل مناسب و با میزان

بهینه مورد بهره‌برداری قرار گیرند، علاوه بر تامین بار محلی، موجب کاهش تلفات شبکه توزیع می‌گردند. استفاده از DG در سیستم‌های توزیع، باعث کاهش جریان جاری شده از تولیدکننده‌های بزرگ به سوی ترانسفورماتورها و خطوط انتقال و توزیع می‌گردد. از آنجایی که تلفات در خطوط و سایر تجهیزات متناسب با مجذور جریان است، لذا کاهش جریان ناشی از استفاده DG، منجر به کاهش تلفات شبکه می‌گردد، این کاهش تلفات در مواقع اوج مصرف مشهودتر است [۳۴].

۲-۳-۲- بهبود مشخصه ولتاژ

اصلی‌ترین مسئله‌ای که در مطالعات کیفیت توان مطرح می‌باشد، کیفیت و اندازه ولتاژ است. ولتاژ و توان راکتیو یک شبکه قدرت می‌بایست در یک محدوده مجاز حفظ و کنترل شوند تا از افزایش ولتاژ در هنگام کاهش مصرف و افت ولتاژ در مواقع اوج مصرف جلوگیری شود. استفاده از منابع تولید پراکنده در پست‌های توزیع باعث کاهش بار مصرفی شبکه از دید سیستم تأمین برق می‌گردد و همچنین به طور غیرمستقیم منجر به کاهش افت ولتاژ در خطوط انتقال می‌شود. این مزیت به‌خصوص در دوره‌های اوج مصرف که بروز افت ولتاژ شدید می‌تواند حتی باعث قطعی در شبکه شود، بسیار قابل توجه باشد.

یکی از شاخص‌های مهم در زمینه کیفیت توان مشخصه ولتاژ می‌باشد. به طور کلی افزودن DG به شبکه، باعث بهبود ولتاژ در نقاط مختلف شبکه می‌شود، زیرا DG با تزریق توان اکتیو و بعضاً راکتیو به شبکه، جریان جاری شده از ابتدای فیدر اصلی ترانسفورماتور متصل به پست را کاهش می‌دهد [۳۵]. فرآیند طی‌شده در خصوص کاهش افت ولتاژ؛ به کاهش انحرافات ولتاژ و در نتیجه نزدیکی اندازه ولتاژ ابتدا و انتها خط، یعنی مشخصه ولتاژی مسطح‌تر منجر می‌شود که عمق کاهش ولتاژ بزرگ‌تری در اختیار کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه قرار خواهد داد و اثرات CVR افزایش می‌یابد.

با استفاده از تولید انرژی توسط منابع تولید پراکنده قابل کنترل، می‌توان میزان بارگذاری بین پست‌های شبکه را تنظیم نمود و به این ترتیب باعث بهبود پخش بار و تعادل خطوط در شبکه گردید.

همچنین تولیدات پراکنده تک فاز قادر هستند عدم تعادل موجود در فازهای سیستم سه فاز را نیز برطرف نمایند تا تعادل ولتاژ ایجاد گردد.

۳-۲-۳-۲- افزایش قابلیت اطمینان

پشتیبانی ظرفیت شبکه در حال حاضر به عنوان مهم ترین دلیل استفاده از تولیدات پراکنده به حساب می آید. شرکت های برق موظف به تأمین توان مورد نیاز مصرف کنندگان در تمامی نقاط شبکه می باشند. با تولید توان در واحدهای DG و تزریق توان به شین های مصرف کنندگان در بخش توزیع بار، از میزان بار مصرفی شبکه کاسته خواهد شد و بارگذاری بر روی سیستم های انتقال کاهش خواهد یافت و در نتیجه ظرفیت شبکه آزاد خواهد شد. این مزیت برای سیستم های انتقال و توزیعی که نزدیک مقادیر نامی کار می کنند، بسیار کارآمد خواهد بود و تضمینی جهت تأمین توان مورد نیاز مصرف کنندگان به شمار می آید.

همچنین تولید پراکنده توان در بخش توزیع شبکه می تواند؛ در برخی مواقعی که یکی از بخش های شبکه دچار مشکل شده است، به طور اضطراری بار مورد نیاز برخی مصرف کنندگان را تأمین نماید و تعداد مصرف کننده هایی که در حالت قطعی و اختلال در شبکه از مدار خارج می شوند را کاهش دهد.

در مطالعات قابلیت اطمینان، روی دو موضوع کفایت و امنیت سیستم بحث می شود. کفایت سیستم به وجود امکانات مناسب و کافی و توانایی سیستم به منظور تأمین توان مورد نیاز مصرف کنندگان در شرایط کار عادی اشاره دارد و امنیت سیستم به توانایی سیستم در زمینه حفظ عملکرد و تأمین توان برای مصرف کنندگان بدون اختلال و قطعی برق در شرایط بحرانی، یعنی پاسخ مناسب به اغتشاشات رخ داده در سیستم، اشاره دارد. همان طور که در بالا توضیح داده شد، استفاده از DG موجب بهبود در هر دو شاخص مطرح شده در خصوص قابلیت اطمینان خواهد شد [۳۶].

۲-۳-۳- جایابی منابع تولید پراکنده

به دلیل اهمیت موضوع جایابی در به دست آوردن حداکثر منافع از نصب DG در سیستم قدرت، مقالات متعددی پیرامون این موضوع منتشر شده است. محل و اندازه واحدهای DG به منظور امکان استفاده مفید از DG و محدود کردن اثرات منفی آن بر عملکرد سیستم، باید به دقت انتخاب شود. در تعیین مکان بهینه DG پارامترهای گوناگونی از قبیل کاهش تلفات، بهبود مشخصه ولتاژ، حداقل سازی هزینه‌های بهره‌برداری، حداقل سازی تغییر آرایش رله‌گذاری، حداقل سازی تغییر در تنظیمات رله‌های موجود در شبکه و حداقل سازی تغییر آرایش کلیدها در نظر گرفته می‌شوند. انتخاب هر کدام از اهداف فوق می‌تواند بر فرآیند مکان‌یابی تولیدات پراکنده تأثیرات متفاوتی بگذارد. روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه یا چند هدفه ابزارهایی هستند که برای تعیین محل و اندازه‌ی واحدهای DG در سیستم توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. طیف گسترده‌ای از روش‌ها برای جایگذاری DG مطرح شده است که می‌توان آن‌ها را به سه دسته؛ آنالیز حساسیت [۳۷] و [۲۹]، روش‌های تحلیلی [۳۹] و [۳۸]، الگوریتم‌های هوش^۱ [۴۲]-[۴۰] تقسیم‌بندی نمود. نویسندگان مرجع [۲۹] دائماً از پخش توان برای شناسایی حساسیت ولتاژ هر باس و سپس اختصاص DG در باس حساس‌تر، به منظور بهبود حاشیه امنیت ولتاژ و کاهش تلفات توان استفاده می‌کنند. مطالعه انجام شده در مرجع [۳۸] رویکردی تحلیلی به منظور شناسایی محل مطلوب برای DG به منظور به حداقل رساندن تلفات توان ارائه می‌دهد. الگوریتم‌های هوشمند یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای تعیین اندازه و مکان DG هستند. در آثار [۴۰] و [۴۱] ادعا شده است که الگوریتم‌های هوشمند برای مسائل چندهدفه مناسب هستند و می‌توانند تقریباً منجر به دست‌یابی به یک راه‌حل مطلوب شوند. در این پژوهش نیز از الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ به منظور جایابی DG استفاده شده است.

^۱ Intelligence Algorithm

^۲ Particle Swarm Optimization (PSO)

۲-۴- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم تکاملی PSO یک روش بهینه‌سازی است که می‌تواند برای حل انواع مختلفی از مسائل بهینه‌سازی به کار گرفته شود. آقایان ابره‌ه‌ارت و کندی در سال ۱۹۹۵، الگوریتم PSO را به عنوان یک روش اکتشافی جدید پیشنهاد نمودند. PSO از رفتارهای گروهی پرندگان و یا فعالیت گروه ماهی‌ها در حال جستن غذای‌شان الهام گرفته است، به عبارت دیگر، این الگوریتم از مفهوم اثر متقابل اجتماعی برای حل کردن مسئله استفاده می‌نماید. در تعاریفی که به منظور درک ملموس‌تری از نحوه عملکرد PSO مطرح شده، آمده است: یک گروه از پرندگان به طور تصادفی در حال جستجوی غذا در یک ناحیه می‌باشند و تنها یک قطعه غذا در ناحیه مورد جستجو قرار دارد و هیچ‌یک از پرندگان اطلاعی از مکان غذا ندارند، اما می‌دانند که در هر مرحله چه فاصله‌ای از غذا دارند. در واقع مسئله در اینجا یافتن بهترین راه برای پیدا کردن غذا می‌باشد. یک روش مؤثر دنبال کردن پرندگانی می‌باشد که کمترین فاصله را با غذا دارند.

الگوریتم PSO توسط تعداد معینی از ذرات که به صورت تصادفی مقدار اولیه می‌گیرند، تشکیل می‌شود. برای هر ذره، دو مقدار موقعیت و سرعت تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت، مدل می‌شوند. این ذرات در تکرارهای متعدد، در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا راه‌حل‌های ممکن جدید را جستجو کنند. ملاک جستجو، محاسبه مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش و یا به عبارت دیگر؛ تابع برازندگی استخراج شده از توابع هدف مسئله می‌باشد. پارامترهای موجود در تابع موردنظر برای بهینه‌سازی، بعد فضای مسئله را تعیین می‌کنند. یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت پیش‌آمده در میان گروه ذرات، اختصاص می‌یابد. چگونگی حرکت ذرات در تکرار بعدی، توسط تجربه حاصل از این دو حافظه تعیین می‌گردد. در هر بار تکرار، همه ذرات در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند و تلاش می‌کنند به نقطه بهینه نزدیک‌تر شوند، تا در نهایت نقطه بهینه نهایی حاصل شود. همچنین سرعت و موقعیت

ذرات در هر بار تکرار، برحسب بهترین جواب‌های محلی و سراسری به روز می‌گردد، به این صورت که الگوریتم PSO، بردار سرعت هر ذره را به روز کرده و سپس مقدار سرعت جدید را به موقعیت و یا مقدار ذره اضافه می‌نماید. بهترین جواب محلی و بهترین جواب سراسری، بهترین جواب‌هایی هستند که تا لحظه جاری اجرای الگوریتم، به ترتیب توسط یک ذره و کل ذرات به دست آمده‌اند.

موضوع قابل اهمیت دیگر در تشریح الگوریتم PSO، چگونگی ایجاد همسایگی میان ذرات می‌باشد. سه روش ستاره، دایره و وان نیومن^۱، به عنوان روش‌های همسایگی PSO معرفی گردیده است. در روش ستاره، یک ذره به عنوان مرکز انتخاب می‌شود و دیگر ذره‌های گروه به هسته مرکزی متصل می‌شوند. در روش دایره، چندین ذره به صورت یک حلقه به یکدیگر متصل می‌شوند و لذا هر ذره، تعدادی ذره دیگر در سمت چپ و راست در همسایگی خود دارد. در روش وان نیومن، یک ذره نقش مرکزیت را بر عهده می‌گیرد و چهار ذره دیگر در بالا، پایین، چپ و راست ذره مرکزی قرار می‌گیرند.

توجه به روش‌های همسایگی PSO از آن جهت قابل اهمیت است که انتخاب هر روش تأثیر زیادی بر روی انتشار بهترین راه‌حل پیدا شده توسط گروه، دارد. با استفاده از روش ستاره، انتشار سریع‌تری خواهیم داشت. استفاده از روش‌های دایره و وان نیومن، سرعت همگرایی پایینی را دارد، این انتشار کند قادر خواهد بود ذره‌هایی را در مناطق مختلف مورد جستجو، استخراج کند.

مسائل بهینه سازی به صورت معادله ۲-۱۰ و محدودیت‌های ۲-۱۱ تعریف می‌شوند که در آن $f(x)$

تابع هدف مسئله است، $h_i(x)$ بیان گر قیود مساوی و $g_j(x)$ قیود نامساوی را نمایش می‌دهد.

$$\text{Min } f(x) \quad (10-2)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{s. t.} & \\ h_i(x) = 0 & \forall i \\ g_j(x) \leq 0 & \forall j \end{array} \right. \quad (11-2)$$

الگوریتم PSO با استفاده از روابط دارای وابستگی ۲-۱۲ و ۲-۱۳، اقدام به حل مسئله بهینه‌سازی

می‌نماید. سرعت جدید هر ذره توسط سه مؤلفه معادله ۲-۱۳ تعیین می‌گردد.

^۱ Von Neumann

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (12-2)$$

$$V_{ij}(t+1) = w(t)V_{ij}(t) + C_1 r_{1j} (Y_{ij}(t) - X_{ij}(t)) + C_2 r_{2j} (\hat{Y}_j(t) - X_{ij}(t)) \quad (13-2)$$

که در معادله ۱۲-۲، $X_i(t+1)$ موقعیت جدید ذره i ، $X_i(t)$ موقعیت قبلی ذره i ، $V_i(t+1)$ سرعت جدید ذره i می‌باشد. در معادله ۱۳-۲، اندیس j نشان‌دهنده بعد فضای مسئله می‌باشد، $V_{ij}(t)$ سرعت قبلی ذره i در بعد j ، $Y_{ij}(t)$ بهترین تجربه ذره i در بعد j تا زمان جاری مسئله، $\hat{Y}_j(t)$ بهترین تجربه گروه ذرات در بعد j تا زمان جاری مسئله را نمایش می‌دهد. w ضریب اینرسی^۱، r_{1j} و r_{2j} اعدادی تصادفی در بازه $[0, 1]$ می‌باشند و همچنین C_1, C_2 ضرایب یادگیری هستند. همچنین معادلات ۱۲-۲ و ۱۳-۲ را می‌توان به صورت ماتریسی در نظر گرفت و ابعاد مسئله را در ماتریس خلاصه نمود.

نسبت C_1 و C_2 در تنظیم آن‌ها مهم است، اگر C_1 بزرگ‌تر از C_2 باشد، وزن بیشتری به جستجو می‌دهیم و اگر C_2 بزرگ‌تر انتخاب شود، وزن بهره‌برداری از اطلاعات بیشتر می‌شود. تنظیم پارامترهای C_1 و C_2 می‌تواند بر اساس معادله ۱۴-۲ و ۱۵-۲ صورت بپذیرد، به نحوی که با گذشت زمان و عبور از تکرارهای پایین‌تر به تکرارهای بالاتر، مقادیر C_1 و C_2 نیز تغییر نماید. در این روش اغلب بر اساس تجربه C حداکثر برای هر دو مورد $2/5$ و C حداقل برای هر دو مورد $0/5$ در نظر گرفته می‌شود، t_n نیز بیان‌گر حداکثر تعداد تکرار می‌باشد، t شماره تکرار را نمایش می‌دهد.

$$C_1(t) = (C_1^{min} - C_1^{max}) \frac{t}{t_n} + C_1^{max} \quad (14-2)$$

$$C_2(t) = (C_2^{max} - C_2^{min}) \frac{t}{t_n} + C_2^{min} \quad (15-2)$$

دو مدل $Gbest$ و $Lbest$ برای PSO تعریف شده است، در مدل $Gbest$ بهترین تجربه تمامی ذرات موجود به عنوان $\hat{Y}_j(t)$ در نظر گرفته می‌شود و در مدل $Lbest$ بهترین تجربه همسایگی ذره بیان‌گر $\hat{Y}_j(t)$ خواهد بود.

^۱ Inertia Weight

به وسیله تابع برازندگی^۱ بهترین ذرات از نگاه اهداف برنامه شناسایی خواهند شد، تابع برازندگی مسئله بهینه سازی با استفاده از معادله ۱۶-۲ شکل می گیرد، این معادله ضمن دستیابی به تابع هدف، محدودیت های بهینه سازی را در نظر گرفته و حرکت ذرات در فضای ممکن مسئله را تضمین می نماید. در رابطه ۱۶-۲، $h_i(x)$ و $G_j(x)$ به ترتیب نشان دهنده قیود مساوی و نامساوی مسئله بهینه سازی می باشند، α_i و β_j به ترتیب ضرایب وزنی قیود مساوی و نامساوی، $f(x)$ تابع هدف مسئله و FF تابع برازندگی الگوریتم بهینه سازی را نمایش می دهند.

$$FF = f(x) - \sum_i \alpha_i h_i(x)^2 - \sum_j \beta_j G_j(x) \quad (16-2)$$

سرعت ذرات، تعیین کننده میزان توجه ذره به انجام عملیات جستجو^۲ و بهره برداری^۳ است. سرعت پایین ذره بیان گر توجه بیشتر ذره به عملیات بهره برداری نسبت به عملیات جستجو است. هر چه سرعت ذره بیشتر باشد، ذره عملیات جستجو را نسبت به عملیات بهره برداری قابل اهمیت تر می داند. در ابتدا اجرا الگوریتم، با توجه به اطلاعات کم، باید سرعت ذرات بیشتر و در نتیجه جستجو بیشتری صورت بپذیرد، هر چه الگوریتم به پیش می رود، می بایست سرعت ذرات کمتر و در نتیجه توجه به بهره برداری از اطلاعات بیشتر از کسب اطلاعات شود. با استفاده از ضریب اینرسی می توان میزان بهره برداری و جستجو الگوریتم بهینه سازی را با گذر زمان کنترل کرد، برای محاسبه ضریب اینرسی متغیر با زمان می توان از معادله خطی ۱۷-۲ استفاده نمود. در این معادله؛ $w(n_t)$ ضریب اینرسی انتهایی و $w(0)$ ضریب اینرسی اولیه الگوریتم بهینه سازی را نمایش می دهند، t شماره تکرار و n_t حداکثر تکرار مسئله را نشان می دهند.

$$w(t) = [w(0) - w(n_t)] \frac{n_t - t}{n_t} + w(n_t) \quad (17-2)$$

^۱ Fitness Function

^۲ Explore

^۳ Exploit

تجربه نشان داده است که بهتر است ضریب اینرسی بر اساس معادله ۱۸-۲ تعیین گردد و در معادله ۱۷-۲ مقادیر $w(0) = 0.9$ و $w(n_t) = 0.4$ ، برای محاسبه ضریب اینرسی در نظر گرفته شود.

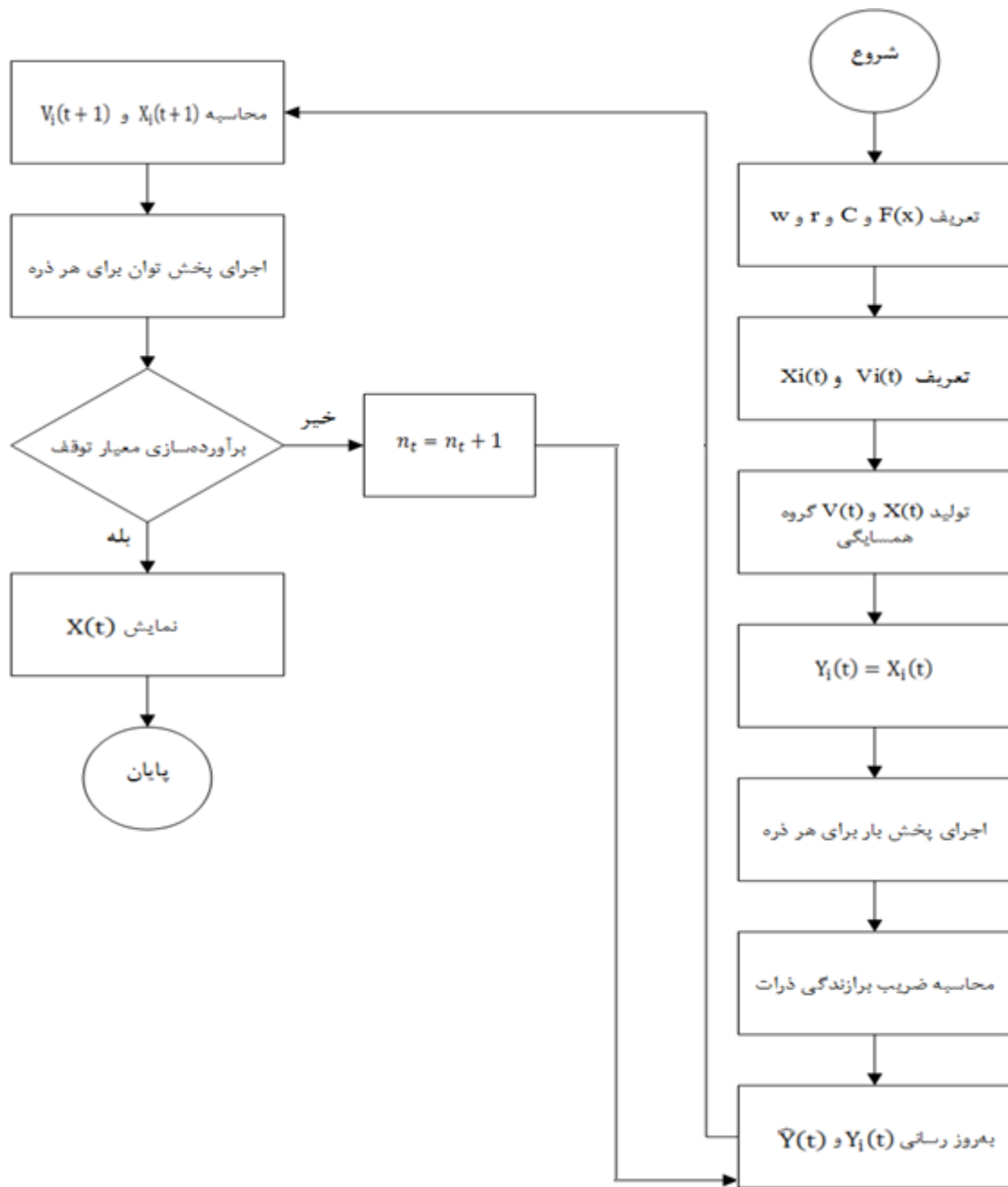
$$w > \frac{1}{2}(c_1 + c_2) - 1 \quad (18-2)$$

روش انقباضی^۱ یکی از روش‌های پرکاربرد اجرای PSO به شمار می‌آید که موجب قدرتمند شدن الگوریتم می‌شود، فرمول‌های تغییر ساختار یافته روش انقباضی در معادلات ۱۹-۲ و ۲۰-۲ نشان داده شده است. در این معادلات، w ضریب انقباضی نام دارد که عددی بین ۰ و ۱ می‌باشد و می‌تواند وظایف ضریب اینرسی را نیز انجام دهد. در معادله ۱۹-۲، اندیس j نشان‌دهنده بعد فضای مسئله می‌باشد، $V_i(t+1)$ سرعت جدید ذره i ، $V_{ij}(t)$ سرعت قبلی ذره i در بعد j ، $Y_{ij}(t)$ بهترین تجربه ذره i در بعد j تا زمان جاری مسئله، $\hat{Y}_j(t)$ بهترین تجربه گروه ذرات در بعد j تا زمان جاری مسئله را نمایش می‌دهد. w ضریب انقباضی، r_{1j} و r_{2j} اعدادی تصادفی در بازه $[0, 1]$ می‌باشند و همچنین C_2, C_1 ضرایب یادگیری هستند. معمولاً در معادله ۲۰-۲، C_1 و C_2 را به گونه ای انتخاب می‌کنند که $\varphi = 4.1$ شود. در معادله ۲۰-۲ نیز، K در نزدیکی ۱ انتخاب می‌شود.

$$V_{ij}(t+1) = w(V_{ij}(t) + C_1 r_{1j} (Y_{ij}(t) - X_{ij}(t))) + C_2 r_{2j} (\hat{Y}_j(t) - X_{ij}(t)) \quad (19-2)$$

$$w = \frac{2K}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (20-2)$$

الگوریتم PSO به صورت گام‌های پی در پی طی خواهد شد تا زمانی که نزدیک‌ترین وضعیت به مقدار بهینه تابع برازندگی تعریف شده را محقق سازد. فلوچارت الگوریتم PSO در شکل ۳-۲ نمایش داده شده است.



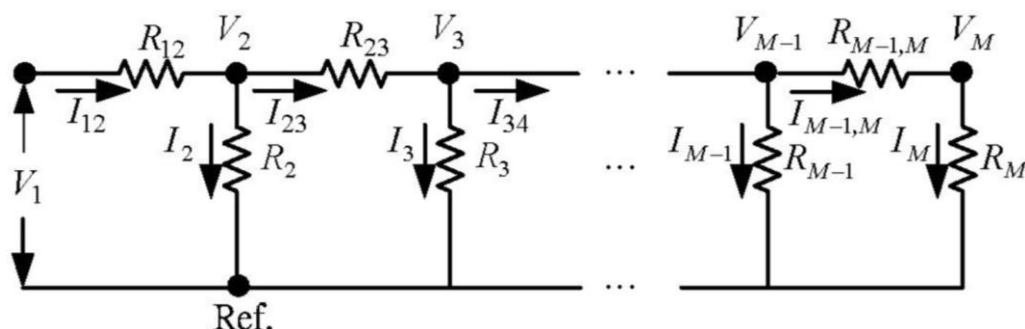
شکل (۳-۲): فلوچارت الگوریتم PSO [۴۳]

۲-۵- روش پخش بار پسرو-پیشرو

امروزه شبکه‌های توزیع به صورت شبکه‌های شعاعی بهره‌برداری می‌شوند و استفاده از شبکه‌های حلقوی برای مراکز حساس مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل استفاده از شبکه‌های شعاعی در سیستم توزیع، بهره‌برداری آسان از این شبکه‌هاست. یکی از ساده‌ترین روش‌های پخش بار در سیستم توزیع

روش پیشرو- پسرو می‌باشد، این روش دارای دو گام اساسی رو به جلو و رو به عقب می‌باشد. در گام پیشرو، تمام طول شبکه از شین مرجع که همان پست توزیع می‌باشد، تا انتهای فیدر طی می‌شود و معمولاً یکی از پارامترهای شبکه در این مرحله به روز رسانی می‌شود. بطور کلی در این گام پارامتری به روز می‌شود که ماهیت تغییرات آن از ابتدای فیدر به سمت انتهای آن می‌باشد، بارزترین نمونه آن ولتاژ شین‌ها می‌باشد. در گام پسرو، از انتهای فیدر به سمت ابتدای آن، حرکت می‌شود و معمولاً یکی از پارامترهای مرتبط با پارامتر گام پیشرو، در این گام به روز می‌شود. لذا یک روند سازماندهی مراحل برای توالی محاسبات در این روش باید انجام شود، چرا که سیستم‌های شعاعی به شاخه‌های متعددی تقسیم می‌شوند، هر شاخه زمانی فراخوانده می‌شود که محاسبات روی شاخه‌های بالاتر از آن انجام شده باشد. در پخش بار به روش پسرو-پیشرو ترانسفورماتورها به صورت یک امپدانس سری و یک ادمیتانس موازی مدل می‌شوند. تولیدات پراکنده، به باس‌های PV و PQ تقسیم‌بندی می‌شوند، اگر به عنوان باس PQ مدل شوند، توسط یک بار توان ثابت منفی نشان داده خواهند شد و اگر به عنوان یک باس PV در شبکه مدل شده باشند، رفتارشان مشابه یک حلقه خواهد بود.

پخش بار پیشرو- پسرو بر اساس ولتاژ و جریان، یک کاربرد مستقیم از قوانین مداری شامل قانون ولتاژ کیرشهف^۱ و قانون جریان کیرشهف^۲ می‌باشد. شکل ۲-۴ شبکه مقاومتی‌ای را با M باس نمایش می‌دهد.



شکل (۲-۴): شبکه مقاومتی نمونه [۴۴].

^۱ Kirchhoff's Voltage Law (KVL)

^۲ Kirchhoff's Current Law (KCL)

قبل از اعمال گام پیشرو برای یافتن ولتاژ هر باس، ولتاژ اولیه در باس انتهایی M ، دارای مقدار $V_{M,ini}$ فرض می‌شود. اکنون می‌توان دو معادله، یکی برای جریان باس M و یکی برای جریان بین باس‌های M و $M-1$ به صورت معادلات ۲-۲۱ و ۲-۲۲ در نظر گرفت [۴۴].

$$I_M = \frac{V_{M,ini}}{R_M} \quad (2-21)$$

$$I_{M-1,M} = I_M \quad (2-22)$$

حال با در اختیار داشتن جریان‌ها، ولتاژ در هر باس می‌تواند بر اساس معادله ۲-۲۳ محاسبه گردد.

$$V_{M-N} = I_{M-N,M-N+1} * R_{M-N,M-N+1} + V_{M-N+1}, N = 1, 2, \dots, M-1 \quad (2-23)$$

بر اساس شکل ۲-۴، معادلات ۲-۲۴ و ۲-۲۵ را نیز می‌توان در خصوص جریان مدار در نظر گرفت.

$$I_{M-P} = \frac{V_{M-P}}{R_{M-P}}, P = 1, 2, 3, \dots, M-2 \quad (2-24)$$

$$I_{M-Q,M-Q+1} = I_{M-Q+1} + I_{M-Q+1,M-Q+2}, Q = 2, 3, \dots, M-1 \quad (2-25)$$

با استفاده از روندی که در معادلات بالا استفاده شد، ولتاژ V_1 در باس اول می‌تواند به دست آید. در حالی که باس ۱ دارای یک ولتاژ از قبل مشخص واقعی می‌باشد، یک نسبت ثابت از تقسیم ولتاژ واقعی باس ۱ بر ولتاژ محاسبه شده باس ۱، به صورت معادله ۲-۲۶ به دست می‌آید.

$$P_R = \frac{V_S}{V_1} \quad (2-26)$$

از آن جا که شبکه نشان داده شده در شکل ۲-۴، یک شبکه پسیو خطی است، جواب نهایی برای ولتاژ هر باس، به وسیله حاصل ضرب ولتاژ محاسبه شده هر باس در نسبت P_R می‌تواند به دست آید. اساس محاسبات صورت گرفته بر اساس شکل ۲-۴، می‌تواند مبنای الگوریتم پخش بار پسرو-پیشرو را ایجاد نماید [۴۴].

با استفاده از مفاهیم ریاضی ذکر شده در قسمت قبل، می‌توان الگوریتم و معادلات مربوط به شبیه‌سازی پخش بار را توصیف کرد. با توجه به ولتاژ باس اصلی و ولتاژ اولیه پیش‌بینی شده باس‌های دیگر، الگوریتم پخش بار برای هر تکرار دارای سه مرحله می‌باشد. در مرحله اول جریان گره محاسبه می‌شود، جریان تزریقی به گره i با استفاده از معادله ۲۷-۲ محاسبه می‌شود که در آن، S_i توان ظاهری تزریقی به گره i می‌باشد، $V_i^{(k)}$ نشان‌دهنده ولتاژ محاسبه شده گره i در تکرار k می‌باشد و y_i بیان گر ادمیتانس^۱ گره i است [۴۴].

$$I_i^{(k)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k)}}\right)^* - y_i V_i^{(k-1)}, i = 1, 2, \dots, n \quad (27-2)$$

مرحله دوم به عنوان گام پسرو شناخته می‌شود؛ با شروع از آخرین شاخه، جریان جاری J_l در شاخه l ، با استفاده از معادله ۲۸-۲ محاسبه می‌شود، که در آن I_{lr} جریان تزریقی از گره lr که در مرحله ۱ محاسبه شده است می‌باشد، $\sum J_{lr}$ جریان شاخه‌های متصل به گره lr می‌باشد.

$$J_l^{(k)} = -I_{lr} + \sum J_{lr}, l = b, b-1, \dots, 1 \quad (28-2)$$

مرحله سوم گام پیشرو نام دارد؛ با شروع از باس اصلی یعنی باس اول، ولتاژ گره‌ها با استفاده از معادله ۲۹-۲ به روز می‌شود. در معادله ۲۹-۲ ls و lr به ترتیب نشان‌دهنده دو سر ارسال کننده و دریافت کننده شاخه l می‌باشند، Z_l امپدانس شاخه l می‌باشد.

$$V_{lr}^{(k)} = V_{ls}^{(k)} - Z_l J_l^{(k)}, l = 1, 2, \dots, b \quad (29-2)$$

به منظور بررسی معیار همگرایی الگوریتم پخش بار پسرو-پیشرو، اختلاف ولتاژ در دو تکرار پی در پی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله ۳۰-۲ معیار همگرایی را نمایش می‌دهد که در آن میزان خطا قابل قبول برای اتمام الگوریتم، به وسیله ε بیان می‌گردد، در صورت محقق شدن معادله ۳۰-۲، الگوریتم پخش بار همگرا شده و در نتیجه خاتمه می‌یابد.

$$|V^{k+1} - V^k| < \varepsilon \quad (30-2)$$

^۱ Admittance

۲-۶- مدل بار

مدل بار، یک نمایش ریاضی از رابطه بین توان اکتیو و راکتیو مصرف شده و متغیرهای تأثیرگذار بر بار می‌باشد، به عبارت دیگر، رفتار بار را زمانی که به شبکه متصل است بر حسب متغیرهای انتخابی توصیف می‌کند. مدل‌های بار وابسته به زمان، به دو نوع استاتیک و دینامیک تقسیم می‌شوند، در مدل‌های استاتیک توان مصرفی در هر لحظه از زمان بر اساس تابعی جبری از یک یا چند متغیر در همان لحظه از زمان تعریف می‌شود، در مدل‌های دینامیک، توان مصرفی بر اساس تابعی از متغیر یا متغیرها در لحظه‌های گذشته از زمان و لحظه حاضر بیان می‌شود. یک مدل بار مناسب، می‌تواند مزایایی در مطالعات برنامه‌ریزی و در نتیجه در عملکرد سیستم‌های برق مانند کاهش تعمیرات سیستم و تجهیزات و همچنین جلوگیری از بروز شرایط بحرانی در سیستم، ایجاد نماید [۵].

به دلیل وابستگی عملکرد و اثربخشی CVR به ترکیب و نوع بارهای مصرفی سیستم توزیع، مدل‌سازی در جهت نمایش رفتار دقیق بار از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، به عنوان مثال بدیهی است که برای پیش‌بینی انرژی ذخیره‌شده ناشی از پیاده‌سازی CVR، نقش مدل بار بسیار پررنگ است. مدل‌های مختلفی به منظور نمایش رفتار بار مورد استفاده قرار گرفته است، ولیکن در مطالعات CVR، مدل‌های باری کارآمد خواهند بود که در آن‌ها نوع مصرف توان بارها لحاظ شده باشد. به عنوان یک طبقه‌بندی مرسوم، بارها به سه نوع مسکونی، تجاری و صنعتی تقسیم می‌شوند، اکثریت قریب به اتفاق این بارها رفتار وابسته به ولتاژ دارند و می‌توانند به وسیله تعداد زیادی از مدل‌های دینامیکی و استاتیکی نشان داده شوند. همچنین نحوه مصرف توان توسط بارها نیز از سه الگو توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت پیروی می‌کند، که هر کدام از این الگوهای رفتاری، وابستگی متفاوتی نسبت به ولتاژ تغذیه دارند. مدل‌های بار وابسته به ولتاژ، نیازمند انجام آزمایش‌های متعددی روی دستگاه‌های مصرف‌کننده انواع بارهای مسکونی، تجاری و صنعتی می‌باشند، هر نوع از این بارها دارای ضرایب ZIP مربوط به خود هستند، این آزمایش‌ها در تعدادی از مطالعات گذشته انجام پذیرفته است و ضرایبی برای استفاده در مدل بار معرفی شده است.

سه مدل بار استاتیک در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که در این بخش به طور مختصر مورد بررسی قرار می‌گیرند، پارامترهای این مدل‌ها در گذشته از اندازه‌گیری‌های انجام شده روی انواع بارها، از طریق تغییر ولتاژ تغذیه در محدوده قابل قبول عملکردی به دست آمده اند. در مدل اول که مدل ZIP نام دارد، مصرف توان اکتیو و راکتیو به صورت یک چندجمله‌ای وابسته به ولتاژ که شامل سه ضریب برای بارهای امپدانس ثابت، جریان ثابت و ولتاژ ثابت می‌باشد، به ترتیب به صورت معادلات ۳۱-۲ و ۳۲-۲ نمایش داده می‌شود [۵].

$$P = P_0 \left[Z_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_p \frac{V}{V_0} + P_p \right], Z_p + I_p + P_p = 1 \quad (31-2)$$

$$Q = Q_0 \left[Z_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_q \frac{V}{V_0} + P_q \right], Z_q + I_q + P_q = 1 \quad (32-2)$$

که اندیس p و q پارامترهای ZIP معادلات توان اکتیو و توان راکتیو را نشان می‌دهند، V_0 ولتاژ نامی، P_0 و Q_0 توان اکتیو و راکتیو مصرفی بار در ولتاژ نامی می‌باشند. در مدل ZIP، P_p درصد مصرف توان اکتیو بار بر اساس الگوی توان ثابت، I_p درصد مصرف توان اکتیو بار بر اساس الگوی جریان ثابت و Z_p درصد مصرف توان اکتیو بار بر اساس الگوی امپدانس ثابت را نشان می‌دهند. همچنین پارامترهای P_q و I_q و Z_q نیز درصد مصرف توان راکتیو بار را به ترتیب بر اساس الگوهای توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت، نمایش می‌دهد.

همان‌طور که از معادلات مدل ZIP مشاهده می‌شود، برای مصرف توان بار به صورت الگوی توان ثابت، هیچ وابستگی‌ای به ولتاژ در نظر گرفته نشده است، برای مصرف بار طبق الگوی جریان ثابت، وابستگی توان مصرفی بار به تغییرات ولتاژ به صورت نسبت مستقیم نشان داده شده است و برای الگوی مصرف امپدانس ثابت، وابستگی توان مصرفی بار به ولتاژ طبق نسبت مربع تغییرات ولتاژ در نظر گرفته شده است.

در مدل دوم که با بهره‌برداری از مدل ZIP حاصل گردیده است، پیشنهاد شده است که علاوه بر اطلاعات مربوط به توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت، اطلاعات مربوط به زاویه فاز هر یک از این

موءلفه‌ها نیز در مدل بار در نظر گرفته شود، این مدل به عنوان مدل ZIP همراه با زاویه فاز شناخته می‌شود، تفاوت این مدل با مدل ZIP در آن است که بار سیستم را به صورت یکپارچه در نظر نمی‌گیرد و مدل بار را برای هر باس به صورت جداگانه و همراه با زاویه فاز ارائه می‌نماید. در این مدل، محاسبات مصرف توان به صورت معادلات ۳۳-۲ و ۳۴-۲ نمایش داده می‌شود، معادله ۳۵-۲ نیز محدودیت حاکم بر ضرایب معادلات را نمایش می‌دهد [۵].

$$P_i = \left(\frac{V_i}{V_o}\right)^2 S_n Z_{\%} \cos(Z_{\theta}) + \frac{V_i}{V_o} S_n I_{\%} \cos(I_{\theta}) + S_n P_{\%} \cos(P_{\theta}) \quad (33-2)$$

$$Q_i = \left(\frac{V_i}{V_o}\right)^2 S_n Z_{\%} \sin(Z_{\theta}) + \frac{V_i}{V_o} S_n I_{\%} \sin(I_{\theta}) + S_n P_{\%} \sin(P_{\theta}) \quad (34-2)$$

$$Z_{\%} + I_{\%} + P_{\%} = 1 \quad (35-2)$$

که P_i مصرف توان اکتیو بار در باس i ، Q_i مصرف توان راکتیو بار در باس i ، V_i ولتاژ واقعی باس i ، V_o ولتاژ نامی باس i ، S_n مصرف توان ظاهری باس در ولتاژ نامی می‌باشد. همچنین $Z_{\%}, I_{\%}, P_{\%}$ کسری از بار و نشان‌دهنده درصد هر الگو مصرفی می‌باشند و $Z_{\theta}, I_{\theta}, P_{\theta}$ زاویه فاز هر یک از موءلفه‌ها می‌باشند.

مدل سوم به صورت نمایی است، رابطه بین توان مصرف شده و ولتاژ تغذیه به صورت یک تابع نمایی نمایش داده می‌شود، رابطه ۳۶-۲ مربوط به توان اکتیو مصرفی و رابطه ۳۷-۲ مربوط به توان راکتیو مصرفی می‌باشد. در این معادلات، α و β پارامترهای توصیف کننده رفتار مصرفی بار و وابستگی مصرف توان به ولتاژ هستند. در مقایسه با مدل ZIP، وقتی α و β هردو برابر با صفر باشند، به این معنی است که الگو مصرف بار، توان ثابت است، درحالی‌که هردو برابر یک باشند، بار جریان ثابت است و اگر هردو برابر با دو باشند، الگو مصرف بار امپدانس ثابت خواهد بود [۵].

$$P_i = P_o \left(\frac{V_i}{V_o}\right)^{\alpha} \quad (36-2)$$

$$Q_i = Q_o \left(\frac{V_i}{V_o}\right)^{\beta} \quad (37-2)$$

۷-۲- مروری بر مطالعات گذشته در زمینه CVR و DG

مطالعات متعددی به طور مجزا در خصوص تولیدات پراکنده و کاهش ولتاژ محافظه کارانه انجام پذیرفته است، همچنین مقالاتی منتشر شده که هر دو موضوع را همراه یکدیگر مورد بررسی قرار داده‌اند. به دلیل اهمیت موضوع مدل سازی بار در بررسی اثرات CVR، مقالات متعددی نیز در این حوزه منتشر گردیده است. ولیکن بررسی تأثیر توابع هدف بر همکاری‌های مشترک CVR با سایر برنامه‌ها مانند DG و همچنین حضور DG در شبکه‌های دارای مدل بار ZIP، کمتر در مطالعات CVR و DG مورد توجه قرار گرفته است.

مقالات متعددی به طور عملیاتی، اثربخشی پیاده سازی کاهش ولتاژ محافظه کارانه در سیستم‌های توزیع را نشان داده است. نتایج مراجع [۳] و [۷] نشان می‌دهد؛ CVR به منظور کاهش ماکزیمم تقاضا، کاهش مصرف انرژی و افزایش حاشیه پایداری سیستم، در تعدادی از تاسیسات با موفقیت اجرا شده است. نویسندگان مرجع [۴۵]، به ازای یک درصد کاهش ولتاژ در سیستم توزیع، تقریباً به ۱/۳ GWh (۱ درصد) کاهش مصرف انرژی در سال دست یافته‌اند، در حالی که تقاضای حداکثر در دوران اوج بار ۱/۶ مگاوات (۱/۱ درصد) کاهش می‌یابد.

مرجع [۴۳]، باهدف کاهش تلفات، افزایش پایداری ولتاژ و بهبود مشخصه ولتاژ و با استفاده از روش پخش بار توزیع^۱ و به کار گیری الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، اقدام به جابجایی و مقدار یابی تولیدات پراکنده کرده است. در نهایت بامقایسه نتایج به دست آمده توسط روش PSO با روش الگوریتم ژنتیک^۲، روش PSO را مؤثرتر از روش GA در خصوص جابجایی و مقدار یابی DG معرفی کرده است.

معین منباجی و همکاران در مرجع [۴۷]، یک روش کنترل ولت-وار مبتنی بر زیرساخت‌های اندازه گیری پیشرفته^۳ نزدیک به زمان واقعی معرفی کرده‌اند و همچنین از طریق تجزیه گروه‌های مختلف

^۱ Distribution Load Flow (DLF)

^۲ Genetic Algorithm (GA)

^۳ Advanced Metering Infrastructure (AMI)

بار به اجزا کوچک‌تر، مدل ZIP نزدیک به زمان واقعی بار را به منظور پیاده‌سازی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه پیشنهاد نموده‌اند که منجر به کسب نتایج دقیق‌تر در خصوص محاسبه صرفه‌جویی انرژی خواهد شد.

نکویی و همکاران در مرجع [۴۶] یک الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه بهبود یافته را اجرا کرده‌اند و با استفاده از روش حساسیت، جایابی بهینه DG را به منظور کاهش تلفات توان و کاهش انحرافات ولتاژ بررسی کرده‌اند.

جولین سندر از در مرجع [۴۸]، یک مدل اقتصادی به منظور بررسی اثرات پیاده‌سازی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه پیشنهاد داده است. نتایج ارائه شده برای کاهش ولتاژ بین ۲/۲۵ تا ۸ درصد نشان می‌دهد که صرفه‌جویی اقتصادی برای همه مشترکین محقق شده است و این صرفه‌جویی اقتصادی برای مشترکینی که دارای مصرف برق بالایی بوده‌اند قابل توجه‌تر است. همچنین برای تولیدکنندگان، کاهش در مصرف انرژی مجموع و کاهش مصرف توان اوج، منجر به اجتناب از سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی شده است.

یک روش جایابی و مقداربازی واحدهای DG با در نظر گرفتن ماهیت احتمالی خروجی‌های DG و بار سیستم، جهت بهبود حاشیه پایداری ولتاژ در مرجع [۴۹] ارائه شده است. اولویت جایابی در این روش با باس‌هایی هست که بر روی مشخصه ولتاژ و حاشیه پایداری ولتاژ تأثیر بیشتری دارند و مقداربازی واحدهای DG توسط برنامه‌ریزی غیر خطی با تابع هدف بهبود حاشیه پایداری ولتاژ صورت می‌پذیرد.

دو مدل بار ZIP و یک مدل بار نمایی در مرجع [۵]، به منظور نمایش اثرات کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه مورد بررسی قرار گرفته است، مشخص شده که مدل بار ZIP بدون در نظر گرفتن زاویه ولتاژ مناسب‌ترین مدل بار برای نمایش رفتار بار در قبال CVR خواهد بود.

کویجان و همکاران در مرجع [۵۰]، با در نظر گرفتن تولیدات پراکنده به عنوان منابع تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه، DG را به عنوان یک متغیر قابل کنترل در قالب کنترل ولت-وار هماهنگ در

نظر گرفته‌اند و با ایجاد دو حالت که DG تنها توان اکتیو تزریق کند و DG قادر به تزریق توان اکتیو و راکتیو باشد، به بررسی اثر توان راکتیو تزریقی توسط DG بر روی CVR پرداخته‌اند، نتایج نشان می‌دهد توانایی تزریق توان راکتیو توسط DG از سویی منجر به افزایش تلفات و از سویی دیگر منجر به کند شدن شیب افزایش تقاضای توان مصرف‌کنندگان به دلیل افزایش ولتاژ ناشی از حضور DG شده‌است.

سه شبکه توزیع در مرجع [۵۱] در نظر گرفته شده است و با تحلیل نقاطی که در آن‌ها افت ولتاژ رخ می‌دهد؛ پیاده‌سازی CVR در دو حالت نفوذ پایین و نفوذ بالای DG، مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه‌گیری حاصل شده مبنی بر آن است که نفوذ پایین DG در سیستم‌های توزیع منجر به افزایش اثرات CVR و کاهش افت ولتاژهای ناشی از اجرای CVR می‌شود، ولیکن در نفوذ بالای DG سیستم نیازمند تنظیمات جبران افت خط به منظور بهبود شرایط می‌باشد و در نهایت فیدرهای کوتاه در شبکه‌های پرجمعیت را برای دستیابی به اهداف CVR مناسب‌تر دانسته است.

مرجع [۱۲]، با اندازه‌گیری‌های مختلف پایان خط به بررسی تغییرات مصرف انرژی، کاهش بار پیک و تغییرات مشخصه ولتاژ، بر اثر اضافه نمودن تولید پراکنده در سیستم توزیع با استفاده از روش کنترل ولت-وار به منظور پیاده‌سازی CVR می‌پردازد. در این مقاله به منظور در نظر گرفتن اثرات تنوع بار و اثرات تنوع آب و هوایی، از مدل دقیق سلول خورشیدی و مدل دقیق بار خانه مسکونی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که پیاده‌سازی طرح کنترل ولت-وار زمانی که تولید خورشیدی به سیستم توزیع اضافه شده است، مزایای قابل توجهی را ایجاد نمی‌کند.

فریور و همکاران در مرجع [۵۲]، سعی کرده‌اند با در نظر گرفتن DG به عنوان منبع تولید توان اکتیو و راکتیو، ضمن حفظ ولتاژ در محدوده مجاز و ثابت نگه‌داشتن ضریب توان، تلفات سیستم را کاهش دهند و ولتاژ سیستم توزیع را برای پیاده‌سازی CVR مؤثرتر آماده سازند. مطرح شده‌است که قابلیت تزریق و جذب توان راکتیو توسط اینورتر در قالب تولید پراکنده، سرعت تنظیم و کنترل توان

راکتیو سیستم را نسبت به روش‌های سنتی افزایش داده و از نوسانات سریع و بزرگ ولتاژ جلوگیری به عمل می‌آورد.

طاهر نیکنام و همکاران در مرجع [۵۳]، با در نظر گرفتن ماهیت احتمالی تولید پراکنده و بار، یک روش کنترل ولت-وار مبتنی بر سناریو در سیستم‌های توزیع دارای DG پیشنهاد نموده‌اند. در یک چارچوب مبتنی بر سناریو، عدم قطعیت‌های مربوط به DG و بار، توسط فرآیند چرخ رولت مبتنی بر توابع توزیع احتمال، به یک سری سناریوهای قطعی معادل تبدیل شده‌اند. در نهایت یک الگوریتم تکاملی برای حل کنترل ولت-وار چندهدفه احتمالی در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی غیر خطی پیشنهاد شده است.

ژایو وانگ و همکاران در مرجع [۴] به بررسی فعل و انفعالات بین CVR و جایگذاری DG برای به حداقل رساندن مصرف بار در شبکه‌های توزیع، در شرایطی که ولتاژ در پایین‌ترین سطح محدوده از پیش تعریف شده نگه داشته می‌شود، پرداخته‌اند. به منظور افزایش اثرات CVR، از جابجایی DG با خروجی متغیر در قالب یک مسئله بهینه‌سازی احتمالی استفاده کرده‌اند. روش الگوریتم تقریب میانگین نمونه^۱ به منظور حل مسئله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است و از روش تکرارهای متعدد^۲ به منظور بررسی کیفیت راه‌حل و محاسبه اختلاف فاصله اطمینان بین راه‌حل کاندید و راه‌حل بهینه استفاده شده است. نتایج برای حالت‌های بدون CVR و DG، وجود DG و عدم وجود CVR در سیستم، وجود CVR و DG در سیستم، به ترتیب مقادیر مصرف توان اکتیو ۳۴۰، ۳۳۶ و ۳۲۹ مگاوات ساعت را نشان می‌دهند که به معنای موفقیت ایده یکپارچه‌سازی جابجایی تولید پراکنده و پیاده‌سازی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه به منظور کاهش تقاضای مصرف است.

^۱ Sample Average Approximation (SAA)

^۲ Multiple Replications Procedure (MRP)

۸-۲- جمع‌بندی

با بررسی اهداف، مزایا و تعاریف CVR و DG که در این بخش ذکر گردید، به نظر می‌رسد این دو روش بهبود بهره‌وری انرژی، از سویی دارای اشتراکات و از سوی دیگر دارای تداخلات عملکردی می‌باشند. از طرفی ماهیت CVR به دنبال پایین آوردن مشخصه ولتاژ سیستم توزیع و ماهیت DG منجر به افزایش ولتاژ باس‌های سیستم توزیع خواهد گردید و از طرف دیگر دو روش دارای اهداف مشترکی نیز می‌باشند، لذا به نظر می‌رسد به کارگیری هماهنگ و یکپارچه CVR و DG علاوه بر این که تقابلات بین دو روش را به حداقل خواهد رساند، موجب آن خواهد شد که اثرات مثبتی نیز در زمینه میزان مجاز اعمال CVR ایجاد نماید.

در قسمت‌های دیگر به مبانی مورد نیاز در شبیه‌سازی‌های این پژوهش اشاره گردیده بود. در این پژوهش مدل بار سیستم توزیع نمونه، مدل ZIP در نظر گرفته شده است و الگوریتم بهینه‌سازی انتخابی به منظور جایابی تولیدات پراکنده، PSO می‌باشد و به منظور اعمال پخش بار در شبکه از روش پسر-پیشرو استفاده شده است که جزئیات این موارد، به اضافه توابع هدف مورد استفاده در الگوریتم بهینه‌سازی، در فصل بعدی بیان می‌گردد.

فصل سوم

ادغام یکپارچه

کاهش و لتاژ محافظه کارانه و تولیدات پراکنده

۳-۱- مقدمه

این فصل به بیان طرح پیشنهادی و تشریح ساز و کار لازم برای انجام شبیه‌سازی‌ها اختصاص دارد. در ابتدا تئوری پژوهش و روش به کار رفته معرفی می‌گردد، سپس توابع هدف به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها معرفی و پارامترها و مقادیر مورد نیاز الگوریتم بهینه‌سازی تعیین می‌گردد. در ادامه نحوه تعیین ضرایب مدل بار ZIP شرح داده می‌شود و در انتها در خصوص روش پخش بار مورد استفاده، توضیحات لازم بیان می‌گردد.

۳-۲- تشریح طرح مورد استفاده در این پژوهش

حداکثرسازی اثرات و منافع پیاده‌سازی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه در سیستم‌های قدرت همواره مورد توجه متولیان صنعت برق بوده است. عمق کاهش ولتاژ، عامل مؤثر مهم در اثربخشی CVR می‌باشد، اگر ولتاژ انتهای فیدر، نزدیک به همان سطح ولتاژ ابتدای فیدر نگه داشته شود، با اعمال CVR می‌توان به کاهش ولتاژ بیشتری دست یافت. در مرجع [۱۴]، استفاده از بانک‌های خازنی در شبکه‌های توزیع به منظور دستیابی به مشخصه ولتاژ مسطح مورد نیاز برای اجرای موفق کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه ارائه شده است. در این پژوهش استفاده از تولیدات پراکنده به منظور ایجاد مشخصه ولتاژ مسطح مورد نیاز CVR مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با گسترش استفاده از تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع و اثرات غیرقابل چشم‌پوشی این منابع، ایده یکپارچه‌سازی DG و CVR به منظور جلوگیری از تداخل عملکردی این دو برنامه با یکدیگر و افزایش اثرات CVR مورد توجه قرار گرفته است، چرا که از هر دو روش می‌توان برای صرفه‌جویی در انرژی و کاهش تقاضای ماکزیمم بار استفاده نمود.

هنگامی که کاهش تلفات و کاهش مصرف توان بار سیستم به عنوان اهداف برنامه‌ریزی تعریف می‌شوند؛ CVR در شبکه‌های مستعد از لحاظ ترکیب بار درصدد بر می‌آید تا با کاهش ولتاژ سیستم توزیع به اهداف برنامه‌ریزی نائل آید. این درحالی است که استفاده از DG منجر به افزایش ولتاژ سیستم

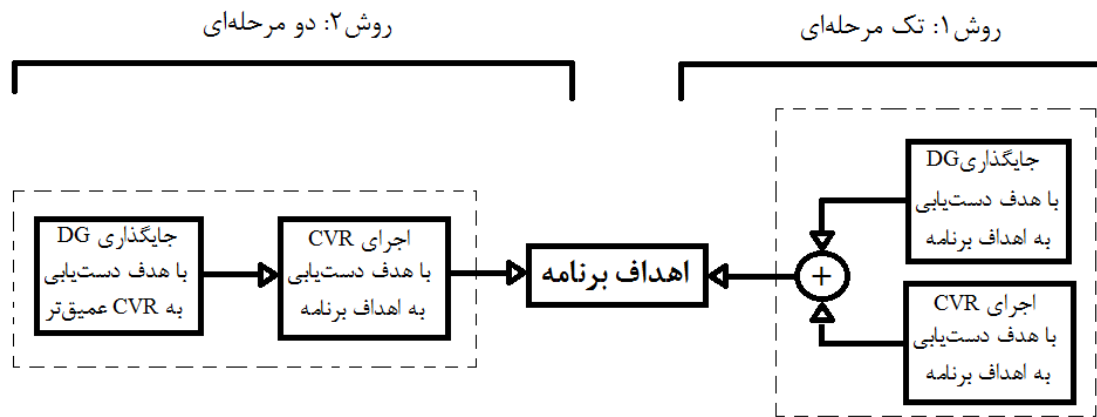
توزیع می‌شود که در تقابل با کاهش ولتاژی است که توسط CVR صورت می‌پذیرد. همچنین با توجه به مدل بار وابسته به ولتاژ، این افزایش ولتاژ ناشی از استفاده از DG در مدار، باعث افزایش تقاضای توان مصرفی بار می‌شود که با اهداف برنامه‌ریزی در تقابل است. لذا به منظور مرتفع نمودن تقابل‌های ذکر شده در بالا، جایگذاری DG و پیاده‌سازی CVR، به صورتی یکپارچه در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که ابتدا از افزایش ولتاژ ناشی از جایگذاری DG به منظور مسطح‌سازی مشخصه ولتاژ مورد نیاز CVR استفاده می‌شود و سپس پیاده‌سازی CVR به منظور کاهش ولتاژ سیستم توزیع و در نتیجه کاهش مصرف توان سیستم توزیع انجام می‌پذیرد. در نهایت مشاهده خواهد شد که در شبکه‌های مستعدی که دارای ترکیب باری عمدتاً امپدانس ثابت هستند، نه تنها جایگذاری DG منجر به افزایش توان مصرفی مصرف‌کنندگان به دلیل افزایش ولتاژ نشده است، بلکه به پیاده‌سازی مؤثرتر CVR و کاهش تقاضای توان کمک کرده است، همچنان که کاهش تلفات ذکر شده در اهداف برنامه‌ریزی نیز محقق شده است.

در این پژوهش به منظور دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی، روشی دو مرحله‌ای معرفی می‌گردد؛ در مرحله اول جایابی DG باهدف فراهم کردن شرایط برای اعمال هر چه بیشتر CVR انجام می‌پذیرد و در مرحله دوم با پیاده‌سازی CVR به دنبال دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی خواهیم بود، به این منظور؛ تابع هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ برای الگوریتم بهینه‌سازی معرفی می‌گردد.

تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ برخلاف سایر توابع هدف که تمامی باس‌های سیستم توزیع را مورد توجه قرار می‌دهند، تنها باس‌های دارای حداکثر و حداقل ولتاژ را در نظر خواهد گرفت. این تابع هدف به عنوان اصلی‌ترین هدف به دنبال آن هست که با کمینه کردن محدوده‌ای که مقادیر ولتاژ باس‌ها در آن قرار می‌گیرند، بهترین وضعیت را برای اعمال هر چه بیشتر CVR محقق سازد.

در مقابل روش دو مرحله‌ای، روش تک مرحله‌ای قرار دارد. در روش تک مرحله‌ای جایابی DG توسط الگوریتم بهینه‌سازی با هدف محقق شدن اهداف اصلی برنامه اجرا می‌گردد و سپس CVR اعمال می‌شود. در فصل ۴ با استفاده از سایر توابع هدف، سناریوهای تک مرحله‌ای برای دستیابی به اهداف کاهش

تلفات و کاهش مصرف بار ایجاد می‌گردد و در انتها نتایج سناریوهای مختلف با یکدیگر مقایسه می‌گردد. فلوچارت نمایش داده شده در شکل ۱-۳، تفاوت روش تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای را نمایش می‌دهد.



شکل (۱-۳): دو روش به کار گیری CVR و DG

در این پژوهش چهار تابع هدف مرتبط با اهداف کاهش ولتاژ، محافظه کارانه و تولیدات پراکنده، معرفی شده است که با ترکیبات مختلف به عنوان هدف جایگذاری تولیدات پراکنده تعیین می‌گردند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به منظور یافتن مکان بهینه DG مورد استفاده قرار خواهد گرفت. سه مدل تولید پراکنده برای سیستم تعریف شده است، ابتدا جاییابی برای سه DG تنها با قابلیت تزریق توان اکتیو انجام خواهد پذیرفت، در مدل دوم، ادوات دارای قابلیت تزریق توان راکتیو، توسط الگوریتم PSO جاییابی می‌شوند و در مدل سوم، جاییابی سه DG با قابلیت تزریق توان اکتیو و راکتیو به محقق‌سازی اهداف الگوریتم بهینه‌سازی می‌پردازند. روش پسر-پیشرو به منظور عملیات پخش بار در سیستم توزیع مورد استفاده قرار گرفته است و مدل بار سیستم، مدل ZIP تعریف گردیده است که ضرایب مدل بار نیز در همین پژوهش محاسبه گردیده است. به منظور پیاده‌سازی شبیه‌سازی و انجام مطالعات و بررسی‌ها، سیستم ۳۳ باسه استاندارد موسسه مهندسان برق و الکترونیک^۱ به عنوان سیستم نمونه در نظر گرفته شده است.

^۱ The Institute of Electrical and Electronics (IEEE)

۳-۳- توابع هدف

در این پژوهش توابع هدف کاهش انحرافات ولتاژ، کاهش تلفات، کاهش توان ظاهری دریافتی شبکه و کاهش محدوده ولتاژ، با ترکیبات مختلف بررسی خواهند شد و در حالات مختلف در الگوریتم بهینه‌سازی جایگذاری DG مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۳-۳-۱- تابع هدف کاهش انحرافات ولتاژ

در این پژوهش از طریق جایی DG، مسطح‌سازی مشخصه ولتاژ باس‌های سیستم توزیع، به منظور افزایش امکان کاهش ولتاژ در روش CVR دنبال خواهد شد. در واقع ضمن استفاده از سایر مزایای حضور DG در سیستم قدرت، توانایی DG در جهت کاهش انحرافات ولتاژ مورد توجه قرار خواهد گرفت و تأثیر آن بر عملکرد CVR بررسی خواهد شد. این تابع هدف از طریق کاهش انحراف معیار^۱ ولتاژ باس‌های شبکه، مبادرت به مسطح‌سازی مشخصه ولتاژ شبکه می‌نماید، انحراف معیار مشخصه ولتاژ از طریق رابطه ۳-۱ محاسبه می‌گردد که در آن nb بیان‌گر تعداد باس‌های سیستم توزیع، V_{avr} میانگین ولتاژ تمامی باس‌ها و V_i ولتاژ باس i ام شبکه مورد مطالعه می‌باشد [۹].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{nb} \sum_{i=1}^{nb} (V_{avr} - V_i)^2} \quad (۱-۳)$$

تابع برازندگی مسطح بودن ولتاژ به صورت رابطه ۳-۲ تعریف می‌شود.

$$F_{v-\delta} = \delta \quad (۲-۳)$$

۳-۳-۲- تابع هدف کاهش تلفات

با استفاده از ولتاژهای به دست آمده برای هر باس توسط اجرای برنامه پخش بار، جریان جاری شده در هر شاخه محاسبه می‌شود و سپس با در اختیار داشتن مقاومت خطوط، تلفات کل سیستم توزیع

^۱ Standard Deviation(δ)

مورد مطالعه به دست می‌آید. معادله ۳-۳ میزان تلفات یک شبکه توزیع شعاعی را نمایش می‌دهد، که در آن دامنه جریان شاخه زام سیستم توزیع می‌باشد، R_j مقاومت زامین شاخه و N تعداد شاخه‌های سیستم توزیع می‌باشد [۵۰].

$$P_{LOSS} = \sum_{j=1}^N R_j I_j^2 \quad (3-3)$$

تابع برازندگی تلفات به صورت معادله ۴-۳ تعریف می‌گردد.

$$F_{loss} = P_{LOSS} \quad (4-3)$$

۳-۳-۳ تابع هدف کاهش توان دریافتی شبکه

در این پژوهش، تقاضای توان اکتیو و راکتیو بار به ترتیب به صورت معادلات ۵-۳ و ۶-۳ محاسبه می‌گردد، که در آن‌ها V_0 ولتاژ نامی، P_0 توان اکتیو نامی، Q_0 توان راکتیو نامی، V ولتاژ واقعی و $P_q, I_q, Z_q, P_p, I_p, Z_p$ ضرایب مدل بار می‌باشند [۵۵].

$$P = P_0 \left[Z_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_p \frac{V}{V_0} + P_p \right] = P_0 K_p \quad (5-3)$$

$$Q = Q_0 \left[Z_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_q \frac{V}{V_0} + P_q \right] = Q_0 K_q \quad (6-3)$$

توان اکتیو و توان راکتیو مصرفی کل بارهای سیستم توزیع به ترتیب توسط معادلات ۷-۳ و ۸-۳ محاسبه می‌گردد، که در آن $P_{0,i}$ بیان‌گر توان اکتیو نامی بار باس i و $Q_{0,i}$ بیان‌گر توان راکتیو نامی بار باس i می‌باشد.

$$P_{load} = \sum_{i=1}^{nb} P_{0,i} K_{p,i} \quad (7-3)$$

$$Q_{load} = \sum_{i=1}^{nb} Q_{0,i} K_{q,i} \quad (8-3)$$

همچنین؛ تلفات توان اکتیو و تلفات توان راکتیو سیستم، به ترتیب توسط معادلات ۳-۳ و ۹-۳ محاسبه می‌گردد. در معادله ۹-۳، I_j دامنه جریان شاخه زام سیستم توزیع می‌باشد، X_j راکتانس زامین شاخه و N تعداد شاخه‌های سیستم توزیع می‌باشد.

$$Q_{LOSS} = \sum_{j=1}^N X_j I_j^2 \quad (9-3)$$

توان اکتیو و توان راکتیو مورد نیاز سیستم که می‌بایست توسط شبکه بالادستی تأمین گردد، به ترتیب بر اساس معادلات ۱۰-۳ و ۱۱-۳ محاسبه می‌گردد.

$$P_{injected} = P_{load} + P_{LOSS} \quad (10-3)$$

$$Q_{injected} = Q_{load} + Q_{LOSS} \quad (11-3)$$

تابع برازندگی توان ظاهری تزریقی به شبکه، به صورت معادله ۱۲-۳ تعریف می‌گردد که در آن تقاضای توان ظاهری کل سیستم لحاظ گردیده است.

$$F_s = \sqrt{(P_{injected}^2 + Q_{injected}^2)} \quad (12-3)$$

۳-۴- تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ

از آنجا که پیاده‌سازی CVR در عمل به معنای کاهش ولتاژ اولیه شبکه یعنی ولتاژ باسی که حداکثر مقدار را در مشخصه ولتاژ شبکه دارا می‌باشد تا جایی که حداقل ولتاژ شبکه از محدوده مجاز خارج نشود می‌باشد، در این پژوهش تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ پیشنهاد می‌گردد. کاهش محدوده ولتاژ به معنای نزدیکی هر چه بیشتر مقدار حداکثر و حداقل مشخصه ولتاژ، یعنی کوچک‌تر شدن باندی که ولتاژ باس‌ها در آن قرار می‌گیرد می‌باشد. به عبارتی هدف از حداقل‌سازی محدوده ولتاژ آن است که، جابجایی تولیدات پراکنده تنها با هدف حداکثرسازی میزان اجرای CVR انجام پذیرد و سپس از طریق پیاده‌سازی CVR به اهداف اصلی برنامه‌ریزی که کاهش تلفات و کاهش مصرف توان بارهای شبکه می‌باشد، دست یافته شود.

عرض محدوده ولتاژ باس‌های سیستم از طریق معادله ۱۳-۳ محاسبه می‌گردد که در آن V^{max} حداکثر مقدار مشخصه ولتاژ و V^{min} حداقل مقدار مشخصه ولتاژ می‌باشد. همچنین تابع برازندگی محدوده ولتاژ به صورت رابطه ۱۴-۳ نمایش داده می‌شود.

$$\Delta V = V^{max} - V^{min} \quad (13-3)$$

$$F_{v-\Delta} = \Delta V \quad (14-3)$$

۳-۴- مقادیر و پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در این پژوهش، از الگوریتم فرا ابتکاری هوشمند PSO به منظور جایابی DG در سیستم توزیع استفاده شده است. در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک^۱ و الگوریتم کلونی مورچه‌ها^۲، می‌توان مزایایی را برای الگوریتم PSO قائل شد. الگوریتم PSO دارای حافظه است، به گونه ای که دانش راه‌حل‌های خوب توسط همه ذرات حفظ خواهد شد، در حالی که در الگوریتم ژنتیک، دانش قبلی مسئله با تغییر جمعیت از بین می‌رود. در روش PSO همکاری سودمند بین ذرات وجود دارد و ذرات در گروه، اطلاعات‌شان را با همدیگر به اشتراک می‌گذارند، همین ارتباط میان ذرات منجر به ایجاد سرعت همگرایی بالا در این الگوریتم می‌شود. مزیت اصلی PSO در مقایسه با الگوریتم‌های کلونی مورچه و ژنتیک در این است که پیاده‌سازی و اجرای این الگوریتم ساده بوده و نیاز به تعیین پارامترهای اندکی دارد.

در این پژوهش، الگوریتم PSO به صورت گام‌های پی در پی طی خواهد شد و محل بهینه جایگذاری تولیدات پراکنده در باس‌های سیستم توزیع مورد مطالعه را مشخص خواهد کرد. در مرحله اول با استفاده از تابع هدف و با در نظر گرفتن محدودیت‌های حاکم بر اندازه ولتاژ و توان، تابع برازندگی شکل خواهد گرفت و همچنین پارامترهای فرمول الگوریتم PSO تعیین می‌گردد. در مرحله دوم ذرات یا همان راه‌حل‌های مکان DG، در سیستم توزیع ۳۳ باسه تولید خواهد شد و به طور تصادفی برای ذره یک موقعیت و سرعت اولیه در فضای جستجو تعریف خواهد شد. موقعیت هر ذره؛ شماره باس‌های دارای DG را در خود ذخیره می‌نماید. در مرحله سوم همسایگی‌های ذرات تولید می‌شود و برای گروه ذرات، موقعیت و سرعت اولیه در فضا جستجو تعریف می‌شود. در مرحله چهارم موقعیت اولیه ذره، به عنوان اولین مقدار بهترین موقعیت ذره نیز تعریف خواهد شد. در مرحله پنجم و ششم پخش بار در سیستم نمونه اجرا می‌شود تا هر ذره، نتیجه راه‌حل جایگذاری DG خود را با وضعیت بهینه مقایسه نماید،

^۱ Genetic Algorithm (GA)

^۲ Ant Colony

به عبارتی دیگر ضمن رعایت محدودیت‌های اعمال شده، برازندگی ناشی از هر ذره یا راه‌حل با برازندگی بهینه مقایسه می‌شود. در مرحله هفتم به روز رسانی بهترین تجربه فردی هر ذره و بهترین تجربه کل ذرات انجام می‌پذیرد. در مرحله هشتم، به روز رسانی موقعیت و سرعت هر ذره بر اساس معادلات ۲-۱۲ و ۱۳-۲ انجام می‌شود. در مرحله نهم مجدداً پخش توان در سیستم توزیع اجرا می‌شود. در مرحله دهم، اگر معیار توقف الگوریتم تأمین شده باشد، یعنی اهداف مد نظر تا حد مطلوبی محقق شده باشند، الگوریتم پایان می‌پذیرد و نتایج جایابی DG منتشر می‌شود، در غیر این صورت الگوریتم به تکرار بعدی می‌رود و مراحل ۷ تا ۱۰ مجدداً اجرا می‌شود.

تابع برازندگی کلی الگوریتم بهینه‌سازی به صورت معادله ۳-۱۵ نمایش داده می‌شود.

$$f = k_1 F_{v-\delta} + k_2 F_{loss} + k_3 F_s + k_4 F_{v-\Delta} \quad (15-3)$$

محدودیت‌های حاکم بر سیستم به صورت معادلات زیر نمایش داده می‌شود. P_{DG} توان اکتیو تزریقی تولیدات پراکنده، Q_{DG} توان راکتیو تزریقی تولیدات پراکنده و V_i ولتاژ باس i ام می‌باشد.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (16-3)$$

$$P_{DG}^{min} \leq P_{DG} \leq P_{DG}^{max} \quad (17-3)$$

$$Q_{DG}^{min} \leq Q_{DG} \leq Q_{DG}^{max} \quad (18-3)$$

در این پژوهش الگوریتم PSO در حالات مختلف و با استفاده از ترکیبات مختلفی از ۴ تابع هدف کاهش انحرافات ولتاژ، کاهش تلفات، کاهش توان ظاهری دریافتی شبکه و کاهش محدوده ولتاژ، جایابی تولیدات پراکنده را انجام خواهد داد، همچنین حداکثر توان تزریقی مجاز توسط تولیدات پراکنده ۲۰٪ بار کل شبکه در نظر گرفته شده است.

به منظور محاسبه ضرایب وزنی در توابع برازندگی ترکیبی، ابتدا مقادیر حداقل و حداکثری که هر تابع برازندگی جزئی می‌تواند با تأمین حداکثر ۲۰٪ توان توسط DG به آن دست‌یابد، محاسبه می‌گردد. در

گام بعدی، میانگین توابع برازندگی جزئی محاسبه می‌گردد و در نهایت وابسته به نحوه به کار گیری توابع برازندگی جزئی در تابع برازندگی ترکیبی، تمامی توابع به نحوی که تأثیر یکسانی داشته باشند، نرمالیزه می‌گردند. همچنین از آن جا که واحدهای توابع هدف جزئی مشابه نمی‌باشد، تمامی مقادیر بر حسب پریونیت محاسبه گردیده است. مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین توابع برازندگی جزئی در جدول ۱-۳ آورده شده است.

جدول (۱-۳): مقادیر توابع برازندگی جزئی

تابع برازندگی	حداقل	حداکثر	میانگین
$F_{v-\delta}$	۰/۰۱۵۶۲	۰/۰۲۸۲۰	۰/۰۲۱۹۱
F_{loss}	۰/۰۸۶۲۰	۰/۱۷۸۱۵	۰/۱۳۲۱۷
F_s	۴/۵۰۵۴۲۵	۴/۵۷۱۵۴۰	۴/۵۳۸۴۸۲
$F_{v-\Delta}$	۰/۰۴۸۲۷	۰/۰۸۱۱۴	۰/۰۶۴۷۰

پارامترها و مقادیر مورد استفاده در الگوریتم PSO در جدول ۲-۳ نمایش داده شده است. پارامترها مربوط به معادلات ۱۹-۲ و ۲۰-۲ می‌باشند، w ضریب انقباضی و C_1 و C_2 ضرایب یادگیری می‌باشند، φ و k پارامترهای واسط می‌باشند.

جدول (۲-۳): مقادیر مورد نیاز و پارامترهای الگوریتم PSO

پارامتر	مقدار	-	پارامتر	مقدار
C_1	۲/۰۵	-	تعداد تکرار	۱۰۰
C_2	۲/۰۵	-	تعداد ذرات	۱۲۰
w	۰/۹	-	تعداد DG	۱-۳
w_{damp}	۰/۹۹۲	-	$P_{DG}^{max} (KW)$	۷۵۰
φ	۴/۱	-	$Q_{DG}^{max} (KVar)$	۴۸۰
K	۱	-	-	-

۳-۵- تعیین ضرایب ZIP مدل بار

در این پژوهش به جهت لزوم تفکیک بارهای مختلف از نظر وابستگی به ولتاژ و میزان مصرف بارها در ولتاژهای مختلف، از مدل ZIP بار استفاده شده است و ضرایب ZIP مدل بار بر اساس مطالعات میدانی و نتایج مطالعات گذشته جهت استفاده در شبیه‌سازی‌ها محاسبه گردیده است.

هر دستگاه یا قطعه‌ای از تجهیزات در سیستم، منحنی $P-V$ و $Q-V$ خودش را داراست که می‌توان از این منحنی‌ها ضرایب ZIP توان مصرفی دستگاه را در ولتاژهای مختلف استخراج نمود. منحنی‌های $P-V$ و $Q-V$ برای یک گروه خاص از بار به ترکیب بار مشتریان در چنین گروهی بستگی دارد، مجموعه‌ای از لوازم و دستگاه‌های مصرف کننده توان، انواع بارهای مسکونی، تجاری، صنعتی و معابر را ایجاد خواهند نمود. ضرایب ZIP این چهار نوع گروه مصرفی، بر اساس ضرایب ZIP، دوره‌های عملکردی و توان مصرفی دستگاه‌های زیر مجموعه آن‌ها مشخص می‌شود. در نهایت ضرایب ZIP این چهار گروه مصرفی، ضرایب ZIP مدل بار کل سیستم را تعیین خواهد نمود.

از آن‌جا که ضرایب ZIP بار کل سیستم، طبق روند بالا از جزء به کل شکل می‌گیرد، می‌توان ادعا کرد که همواره این ضرایب با زمان متغیر خواهند بود، چرا که دستگاه‌های مصرفی دارای دوره‌های عملکرد متفاوت در طی دوره‌های زمانی گوناگون می‌باشند و در نتیجه با توجه به این واقعیت که نوع، مقدار و مدت زمان مصرف در زمان‌های مختلف متفاوت است، در هر مقطع زمانی، ضرایب ZIP متفاوتی را برای بار مصرفی سیستم می‌توان در نظر گرفت. به منظور محاسبه ضرایب ZIP مدل بار در دوره‌های زمانی مختلف، ابتدا دستگاه‌های فعال در هر دوره شناسایی می‌شوند، در مرحله بعد میزان توان مصرفی دستگاه‌های فعال در هر دوره، نسبت به کل توان مصرفی در آن دوره محاسبه می‌شود و سپس بر اساس ضرایب ZIP هر دستگاه که از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به دست آمده است و سهم هر دستگاه از مصرف توان، ضرایب ZIP کل سیستم در دوره‌های زمانی مختلف محاسبه می‌گردد. سهم وزنی هر دستگاه در گروه مصرفی مربوطه، توسط میزان مصرف و دوره‌ی عملکرد آن دستگاه تعیین می‌گردد.

از آن جا که اطلاعات توان مصرفی بار شبکه توزیع مورد مطالعه به صورت توان ثابت ارائه گردیده است، باید به منظور استفاده از مدل بار ZIP برای نمایش رفتار بار شبکه، ضرایب ZIP در نظر گرفته شود. در این پژوهش، با استفاده از ضرایب ZIP آزمایشگاهی به دست آمده در تحقیقات گذشته و با اطلاعات جمع آوری شده از ترکیب بار و مصرف توان بارهای مختلف، ضرایب ZIP نمونه برای فصل تابستان محاسبه شده است.

به منظور به دست آوردن ضرایب ZIP، فهرستی از رایج ترین مصرف کننده های توان برای هر گروه مصرفی ایجاد شده است. با استفاده از مطالعات انجام شده در گذشته، ضرایب ZIP دستگاه ها یا مجموعه ها جمع آوری شده است و از آن ها بسته به سهم مشارکت هر جزء در مصرف بار کل، برای تعیین ضرایب ZIP گروه های مختلف استفاده شده است. در نهایت ضرایب ZIP برای گروه های مختلف مصرفی تعیین گردیده است.

از آنجا که معابر توسط خطوط توزیع مجزا از گروه های مصرفی تغذیه می شوند، لذا این گروه جداگانه در نظر گرفته خواهد شد. در نهایت فرض می شود، مصرف توان بار ترکیبی، به صورت ۷۰٪ صنعتی، ۱۴٪ تجاری، ۱۲٪ مسکونی و ۴٪ معابر می باشد.

به منظور محاسبه ضرایب ZIP مدل بار گروه های مختلف مصرفی، ابتدا با استفاده از اطلاعات متوسط مصرف ساعتی و دوره عملکرد اجزاء هر گروه مصرفی، وزن هر جزء نسبت به مصرف کل گروه مصرفی محاسبه می گردد، سپس با استفاده از ضرایب ZIP اختصاصی هر جزء که از تحلیل رفتار مصرفی آن محاسبه شده و از مطالعات گذشته استخراج گردیده است؛ بر اساس رابطه ۳-۱۹ ضرایب ZIP گروه های مختلف مصرفی تعیین می گردد. در رابطه ۳-۱۹، ZIP_{Total} ضرایب گروه مصرفی، $(ZIP)_i$ ضرایب جزء مصرفی i ام، W_i وزن عنصر i ام از کل بار و عددی بین ۰ و ۱، N تعداد دستگاه های مصرفی گروه می باشد [۵۵].

$$ZIP_{Total} = \sum_{n=1}^N (ZIP)_i * W_i \quad (۳-۱۹)$$

مصرف عمده توان در گروه مسکونی، به دستگاه‌های یخچال، فریزر، تلویزیون، رایانه، ماشین لباسشویی، وسایل سرمایشی، جاروبرقی، شارژر تلفن همراه، فن، روشنایی و محدودکننده جریان اختصاص داده شده است. برای ۳۰ درصد منازل مسکونی، علاوه بر لوازم فوق، دستگاه‌های ماکروویو، ماشین ظرفشویی، آسانسور، شارژر لپ‌تاپ و گرمکن الکتریکی نیز در نظر گرفته شده است. در جدول ۳-۳ اطلاعات اجزا مختلف گروه مصرفی مسکونی نمایش داده شده است. با استفاده از رابطه ۳-۱۹ و جدول ۳-۳ ضرایب ZIP مدل بار گروه مسکونی محاسبه می‌گردد.

جدول (۳-۳): اطلاعات اجزا گروه مصرفی مسکونی [۴۶] و [۵۴] و [۵۵]

مصرف کننده	وزن (%)	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
یخچال	۷/۱۸	۵/۰۳	-۸/۴۸	۴/۴۵	۱۷/۴۴	-۲۸/۶۲	۱۲/۱۸
فریزر	۶/۲۶	۵/۰۳	-۸/۴۸	۴/۴۵	۱۷/۴۴	-۲۸/۶۲	۱۲/۱۸
تلویزیون	۵/۸۹	۰/۳۳	-۰/۵۷	۱/۲۴	۱۹	-۳۳/۲۲	۱۵/۲۲
رایانه	۴/۶	۰/۱۸	-۰/۲۶	۱/۰۸	-۰/۱۹	۰/۹۶	۰/۲۳
لباسشویی	۱/۹۵	۰/۵	۰	۰/۵	۰/۵	۰	۰/۵
سرمایشی	۳۶/۸۱	۱/۶	-۲/۶۹	۲/۰۹	۱۲/۵۳	-۲۱/۱۱	۹/۵۸
جارو برقی	۰/۷۸	۰/۹۲	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۹۱	-۰/۰۲	۰/۱۱
شارژر گوشی	۰/۲۸	۰/۲۵	-۰/۴۸	۱/۲۳	۰/۱۴	۰/۳۲	۰/۵۴
فن	۵/۵۲	۰/۲۶	۰/۹	-۰/۱۶	۰/۵	۰/۶۲	-۰/۱۲
لامپ رشته‌ای	۸/۹۷	۰/۵۴	۰/۵	-۰/۰۴	۰/۴۶	۰/۵۱	۰/۰۳
لامپ فلورسنت	۴/۸۳	-۰/۶۳	۱/۶۶	-۰/۰۳	-۰/۳۴	۱/۴	-۰/۰۶
محدودکننده جریان	۰/۱۹	-۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۹۹	۹/۳۲	-۲۰/۹۶	۱۲/۶۴
ماکروویو	۰/۳۷	-۰/۲۷	۱/۱۶	۰/۱۱	۱۵/۶۴	-۲۷/۷۴	۱۳/۱
ظرف‌شویی	۳/۲۳	۱	۰	۰	۱	۰	۰
آسانسور	۸/۲۸	۲/۳۶	-۴/۱۵	۲/۷۹	۱۱/۶۹	-۱۹/۵	۸/۸۱
لپ‌تاپ	۰/۷۲	۰/۲۵	-۰/۴۸	۱/۲۳	۰/۱۴	۰/۳۲	۰/۵۴
گرمکن الکتریکی	۴/۱۴	۰/۹۲	۰/۱	-۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۸۶	-۰/۰۱

ضرایب ZIP مدل بار برای مشترکین مسکونی که بر اساس معادله ۳-۱۹ محاسبه گردیده است، در جدول ۴-۳ نمایش داده شده است.

جدول (۳-۴): ضرایب ZIP مدل بار گروه مسکونی

نوع بار	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
مسکونی	۱/۶۱	-۲/۳۶	۱/۷۵	۹/۳۸	-۱۵/۳۸	۷

گروه تجاری به مشاغل پرمصرف و کم‌مصرف تقسیم‌بندی شده است. در مشاغل پرمصرف، سوپر مارکت‌ها، فروشگاه‌های زنجیره‌ای، هایپر مارکت‌ها، بستنی و آبمیوه‌خوری‌ها، قصابی‌ها، آرایشگاه‌ها، فروشگاه‌های لوازم صوتی و تصویری، چاپ و تکثیر، الکتریکی‌ها، لوستر فروشی‌ها، اتوشویی‌ها، رستوران‌ها، مدارس و هتل‌ها در نظر گرفته شده‌اند. مشاغل کم‌مصرف تقریباً دارای رفتار مصرفی مشابه بوده و اکثراً مشاغل فروشندگی را شامل می‌شوند. در جدول ۳-۵ اطلاعات اجزا مختلف گروه مصرفی تجاری نمایش داده شده است. با استفاده از رابطه ۳-۱۹ و جدول ۳-۵ ضرایب ZIP مدل بار گروه تجاری محاسبه می‌گردد. ضرایب ZIP مدل بار به دست آمده برای مشترکین تجاری در جدول ۳-۶ نمایش داده شده است.

جدول (۳-۵): اطلاعات اجزا گروه مصرفی تجاری [۱۱] و [۵۵]

مصرف کننده	وزن (%)	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
تجاری کم‌مصرف	۴۰	۰/۴۳	-۰/۰۶	۰/۶۳	۴/۰۶	-۶/۶۵	۳/۵۹
تجاری دارای یخچال	۲۰	۰/۲۷	-۰/۳۳	۱/۰۶	۵/۴۸	-۹/۷	۵/۲۲
تجاری الکترونیکی	۸	۰/۵۵	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۵۵	-۰/۰۹	۰/۵۴
تجاری غذا خوری	۸	۰/۶۹	۰/۰۴	۰/۲۷	۱/۸۲	-۲/۲۵	۱/۴۳
تجاری اتو-لباسشویی	۴	۰/۷۷	-۰/۸۴	۱/۰۷	۸/۰۹	-۱۳/۶۵	۶/۵۶
تجاری آموزشی	۱۲	۰/۴	-۰/۴۱	۱/۰۱	۴/۴۳	-۷/۹۹	۴/۵۶
تجاری اقامتگاهی	۸	۰/۷۶	-۰/۵۲	۰/۷۶	۶/۹۲	-۱۱/۷۵	۵/۸۳

جدول (۳-۶): ضرایب ZIP مدل بار گروه تجاری

نوع بار	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
تجاری	۰/۴۶	-۰/۱۹	۰/۷۳	۴/۳۲	-۷/۲۳	۳/۹۱

گروه صنعتی شامل مشترکین کشاورزی و صنعتی می‌باشد. در جدول ۷-۳ اطلاعات اجزا مختلف گروه مصرفی صنعتی نمایش داده شده است. با استفاده از رابطه ۱۹-۳ و جدول ۷-۳ ضرایب ZIP مدل بار گروه صنعتی محاسبه می‌گردد. ضرایب ZIP مدل بار به دست آمده برای مشترکین صنعتی در جدول ۸-۳ نمایش داده شده است.

جدول (۷-۳): اطلاعات اجزا گروه مصرفی صنعتی [۱۱] و [۵۵]

مصرف کننده	وزن (/.)	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
صنعتی	۶۰	۱/۲۱	-۱/۶۲	۱/۴۱	۴/۳۵	-۷/۰۷	۳/۷۲
کشاورزی	۴۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱

جدول (۸-۳): ضرایب ZIP مدل بار گروه صنعتی

نوع بار	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
صنعتی	۰/۷۳	-۰/۹۷	۱/۲۴	۲/۶۱	-۴/۲۴	۲/۶۳

به منظور تأمین روشنایی عمومی، لامپ‌های سدیم پرفشار، جیوه پرفشار و رشته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول ۹-۳ اطلاعات اجزا مختلف گروه مصرفی معابر نمایش داده شده است. با استفاده از رابطه ۱۹-۳ و جدول ۹-۳ ضرایب ZIP مدل بار گروه مصرفی معابر محاسبه می‌گردد. ضرایب ZIP مدل بار به دست آمده برای مصرف روشنایی معابر در جدول ۱۰-۳ نمایش داده شده است.

جدول (۹-۳): اطلاعات اجزا گروه مصرفی معابر [۵۴] و [۵۵]

مصرف کننده	وزن (/.)	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
لامپ بخار سدیم	۴۰	-۰/۱۶	۱/۲	-۰/۰۴	۳/۲۶	-۴/۱۱	۱/۸۵
لامپ بخار جیوه	۴۰	-۰/۱۶	۲/۳۳	-۱/۱۷	۰/۴۲	-۱/۰۱	۱/۵۹
لامپ رشته‌ای	۲۰	۰/۵۴	۰/۵	-۰/۰۴	۰/۴۶	۰/۵۱	۰/۰۳

جدول (۱۰-۳): ضرایب ZIP مدل بار گروه معابر

نوع بار	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
معابر	-۰/۰۲	۱/۵۱	-۰/۴۹	۱/۵۶	-۱/۹۴	۱/۳۸

در نهایت با استفاده از ضرایب ZIP به دست آمده برای گروه‌های مختلف مصرفی و میزان مصرف هر گروه، ضرایب ZIP مدل بار سیستم توزیع برای استفاده در شبیه‌سازی‌ها محاسبه می‌گردد، نتایج در جدول ۱۱-۳ نمایش داده شده است.

جدول (۱۱-۳): ضرایب ZIP مدل بار ترکیبی

نوع بار	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
ترکیبی	۰/۷۷	-۰/۹۳	۱/۱۶	۳/۶۲	-۵/۹	۳/۲۸

۳-۶- انتخاب روش پخش بار پسر-پیشرو

روش‌های مختلفی به منظور پخش بار در سیستم‌های قدرت معرفی گردیده است. روش‌های سنتی از قبیل گوس سایدل^۱ و نیوتون رافسون^۲ به طور گسترده‌ای در پخش توان سیستم‌های انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های انتقال و توزیع در اندازه ولتاژ، ساختار شبکه و نسبت $\frac{R}{X}$ تفاوت‌های قابل توجهی دارند. به دلیل ویژگی‌های مختلف سیستم‌های توزیع، ممکن است این روش‌های سنتی برای پخش بار سیستم‌های توزیع ناکارآمد باشند. شیوه‌های کارآمد برای پخش بار در شبکه‌های توزیع، شیوه‌هایی هستند که از روش‌های شبکه نردبانی مبتنی بر نظریه اساسی مدارها و نیز مزیت ماهیت شعاعی شبکه‌های توزیع که در آن یک مسیر منحصر به فرد از هر باس به منبع وجود دارد، استفاده می‌کنند. الگوریتم عمومی روش‌های شبکه نردبانی شامل دو مرحله است: رفت و برگشت به عقب و جلو [۴۳]. در این پژوهش به منظور پخش بار در سیستم توزیع نمونه ۳۳ باسه، از روش پخش بار پسر-پیشرو^۳ استفاده شده است، این روش می‌تواند در شبکه‌های شعاعی دارای DG نیز بسیار کارآمد باشد

^۱ Gauss-Seide

^۲ Newton-Raphson

^۳ Backward / Forward Power Flow

و حداقل زمان اجرا و میزان محاسبات را نسبت به روش‌های دیگر دارا باشد. مطالعات صورت گرفته، شایستگی این روش را در برابر روش‌های سنتی نشان داده است [۵۶].

در این پژوهش؛ پارامتر ولتاژ باس‌ها برای محاسبه در گام پیشرو و پارامتر جریان خطوط برای محاسبه در گام پسرو، در نظر گرفته می‌شود. در آغاز الگوریتم پخش بار، به دلیل عدم وجود داده‌های پخش بار، به عنوان فرض اولیه، ولتاژ تمامی ۳۳ باس سیستم نمونه را 1^{pu} فرض می‌کنیم و این فرض به عنوان طی شدن اولین گام پیشرو تلقی می‌شود. سپس گام پسرو طی می‌شود و با حرکت از انتهای خط به سمت ابتدای خط، جریان خطوط محاسبه می‌گردد. از مرحله اول به بعد، الگوریتم پخش بار در حلقه تکرار قرار می‌گیرد و با استفاده از داده‌های به دست آمده از تکرار قبلی، در گام‌های پیشرو و پسرو به ترتیب ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط را محاسبه می‌کند. حلقه تکرار تا زمانی که به حداقل خطای از پیش تعریف شده برسد، گام‌ها را طی می‌کند و پس از دستیابی به حداقل خطا، الگوریتم به پایان می‌رسد. منظور از حداقل خطا از پیش تعریف شده، اختلاف محاسبه یک پارامتر در یک تکرار و تکرار قبل از خودش می‌باشد.

محدودیت‌های حاکم بر عملیات پخش بار در معادلات ۲۰-۳ و ۲۱-۳ نمایش داده شده است. در معادله ۲۰-۳ محدودیت امنیت جریان عبوری از فیدرهای شبکه در نظر گرفته شده است، $I_{(i,j)}$ جریان عبوری از باس i به باس j و $I_{(i,j)}^{max}$ حداکثر جریان مجاز قابل عبور از خط بین باس i و j می‌باشد. در معادله ۲۱-۳ محدودیت تعادل بین توان مورد نیاز شبکه و توان تزریقی به شبکه در نظر گرفته شده است، $S_{injected}$ توان تزریقی از شبکه بالا دستی به شبکه، S_{load} توان مصرفی بار شبکه، S_{DG} توان تزرقی به شبکه توسط تولیدات پراکنده و S_{loss} تلفات خطوط شبکه می‌باشد [۴۳].

$$I_{(i,j)} \leq I_{(i,j)}^{max} \quad (20-3)$$

$$S_{injected} = S_{load} + S_{loss} - S_{DG} \quad (21-3)$$

۳-۷- جمع‌بندی

در فصل سوم، مباحث تئوری مطرح شده در فصل دوم، به منظور پیاده‌سازی اهداف و برنامه‌های پژوهش حاضر مورد بحث قرار گرفت و مبانی انجام شبیه‌سازی‌ها ذکر گردید. در فصل چهارم نیز، بر اساس مراحل، اهداف و مقادیر بیان شده در فصل سوم، شبیه‌سازی‌ها انجام خواهد پذیرفت.

مقادیر و پارامترهای الگوریتم PSO بر اساس تجربه و محاسبات تعیین گردید. همچنین با مقایسه ضرایب مدل بار ZIP تعیین شده در این پژوهش و مطالعات انجام گرفته در گذشته، می‌توان به رفتار مشابه گروه‌های مختلف مصرفی در این پژوهش و پژوهش‌های انجام گرفته در گذشته پی برد.

فصل چهارم

شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این فصل به انجام شبیه‌سازی‌ها بر روی سیستم نمونه در سناریوهای مختلف پرداخته می‌شود. در ابتدا سیستم مورد مطالعه معرفی و مشخصات بار و خطوط سیستم ارائه می‌گردد. در قسمت بعد، به منظور تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه، بهترین روش استفاده از منابع تولید پراکنده مشخص خواهد شد. در ادامه؛ تحلیل و بررسی بر روی توابع هدف مختلف صورت پذیرفته و بهترین تابع هدف به منظور حداکثرسازی منافع استفاده یکپارچه از DG و CVR تعیین می‌گردد. در انتها، نتایج حاصل از روش‌های مختلف حمایتی سیستم توزیع نمونه با یکدیگر مقایسه خواهد شد و میزان صرفه‌جویی در انرژی تعیین می‌گردد.

سیستم توزیع ۳۳ باسه IEEE، به منظور پیاده‌سازی شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. مسئله به این صورت تعریف می‌شود که در یک سیستم توزیع که در وضعیت عملکرد عادی کار می‌کند، قرار است بار شبکه افزایش یابد که در این صورت شبکه دچار افت ولتاژ شدیدی شده به نحوی که ولتاژ تعدادی از باس‌ها خارج از محدوده استاندارد ولتاژ قرار خواهد گرفت و در نهایت سیستم توزیع ۳۳ باسه‌ای با وضعیت عملکرد غیر استاندارد حاصل می‌گردد. ظرفیت شبکه بالادستی نامحدود می‌باشد، ولیکن از آنجا که افت ولتاژ شبکه به سبب تلفات ناشی از امپدانس خطوط می‌باشد، استفاده از ادوات حمایتی مانند تولیدات پراکنده، بانک‌های خازنی و جبران‌کننده ایستای توان راکتیو^۱ که قابلیت تزریق توان اکتیو یا راکتیو در سمت مصرف سیستم توزیع را دارا هستند، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین از آنجا که خطر بحرانی‌تر شدن شبکه جدی می‌باشد، علاوه بر اجرای راه‌کارهایی برای خروج شبکه از وضعیت غیراستاندارد، اندیشیدن به راه‌کارهایی برای شرایط بحرانی‌تر شبکه نیز لازم می‌باشد. مقرر گردیده است که حداکثر مجاز تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه توسط ادوات حمایتی؛ بیش از ۲۰ درصد تقاضای شبکه در بار پیک نباشد. همچنین فرض شده است که ادوات حمایتی موجود، برای

^۱ Static VAR Compensator (SVC)

تزریق توان اکتیو دارای ظرفیت ثابت ۲۵۰ کیلووات و برای تزریق توان راکتیو دارای ظرفیت ثابت ۱۶۰ کیلووار می‌باشند.

از آن جا که میزان مجاز تزریق توان به شبکه توسط ادوات حمایتی ۲۰ درصد بار پیک شبکه تعیین گردیده است و ظرفیت تزریق توان ادوات حمایتی نیز ثابت است، حداکثر سه تزریق کننده توان را می‌توان در شبکه نصب کرد و چون با تعداد کمتر از سه واحد، نمی‌توان شبکه را از حالت غیر استاندارد خارج نمود، مقرر گردیده است که از سه واحد از این ادوات در شبکه استفاده گردد.

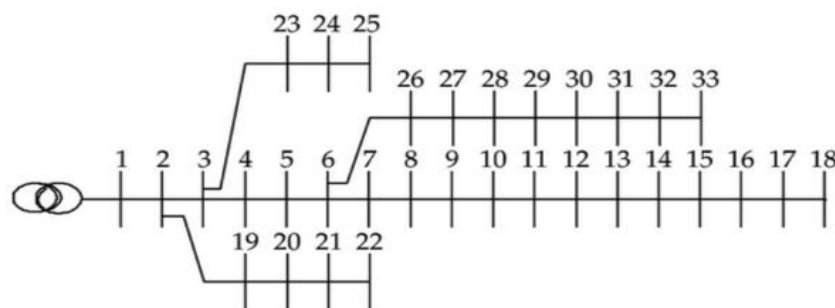
در حالت کلی، سه راهکار به منظور تأمین توان مصرفی بارهای سیستم توزیع و قراردادن شبکه در وضعیت عملکرد استاندارد وجود دارد، راهکار اول؛ افزایش ظرفیت شبکه بالادستی و قراردهی ولتاژ اولیه شبکه در مقدار $1/0.4$ PU تعریف می‌شود. راهکار دوم؛ افزایش ظرفیت تزریق توان شبکه بالادستی و به کار گیری بانک‌های خازنی یا جبران‌کننده ایستای توان راکتیو، به منظور جبران افت ولتاژ موجود در سیستم توزیع می‌باشد. در راهکار سوم، استفاده یکپارچه از DG و CVR پیشنهاد می‌گردد که اولاً بخشی از توان مورد نیاز شبکه توسط تولیدات پراکنده تأمین گردد، ثانیاً توان ظاهری مورد نیاز سیستم توزیع ۳۳ باسه کاهش یابد و در نهایت شبکه در محدوده ولتاژ استاندارد راه‌اندازی شود و ثالثاً برای شرایط بحرانی تر شبکه نیز با استفاده از CVR آمادگی وجود داشته باشد.

پس از انتخاب نحوه مناسب استفاده از ادوات حمایتی، بررسی‌ها بر روی این موضوع صورت خواهد گرفت که جایابی ادوات حمایتی با کدام تابع هدف صورت بگیرد، تا شبکه برای حالت بدون CVR و حالتی که CVR اجرا می‌شود، هم در وضعیت استاندارد عمل کند و هم تقاضای توان ظاهری شبکه حداقل‌ترین مقدار ممکن باشد.

۴-۲- معرفی سیستم توزیع مورد مطالعه

به منظور انجام شبیه‌سازی و بررسی تأثیر حضور تولیدات پراکنده بر روی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه با در نظر گرفتن مدل ZIP بار، از سیستم ۳۳ باسه IEEE، به عنوان سیستم نمونه استفاده شده است.

سیستم توزیع مورد مطالعه شعاعی می‌باشد و برای عملکرد تحت شرایط عادی در نظر گرفته شده است و همچنین برای نمایش آن از مدل تک‌فاز استفاده شده است، ساختار سیستم توزیع نمونه در شکل ۴-۱ آمده است. سیستم تست استاندارد مورد مطالعه، دارای ۳۳ باس و ۳۲ شاخه می‌باشد، همچنین بار اکتیو کل شبکه ۳۷۱۵ کیلووات و بار راکتیو کل شبکه ۲۳۰۰ کیلووار می‌باشد. تلفات توان اکتیو این سیستم در صورتی که کل تقاضای توان از شبکه بالادستی تأمین شود، برابر با ۲۰۲/۶۷ کیلووات می‌باشد. اطلاعات توان مصرفی باس‌ها و امیدانس خطوط شبکه، در پیوست ۱ ارائه گردیده است.



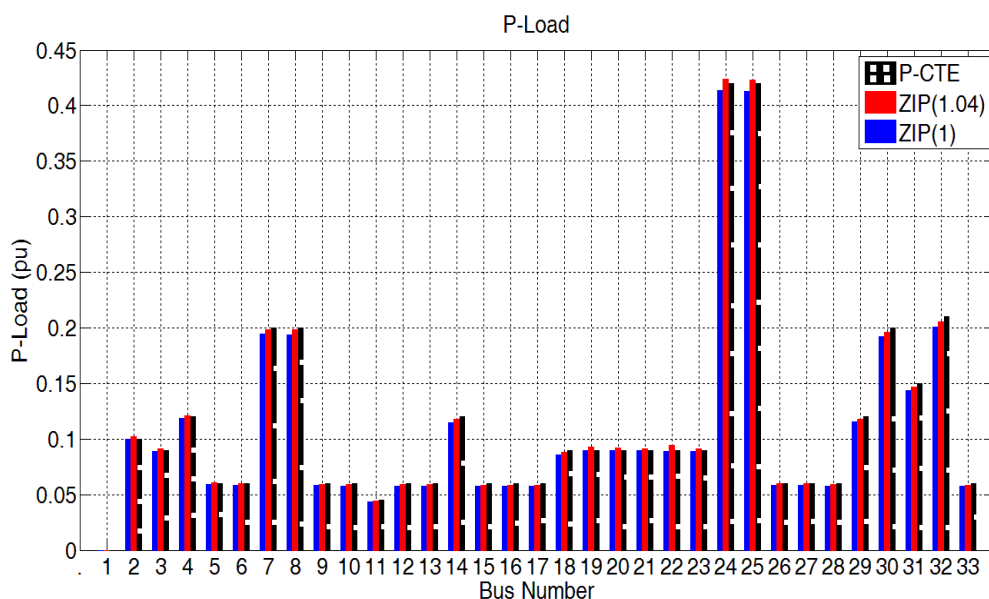
شکل (۴-۱): ساختار شبکه مورد مطالعه [۵۷]

همان‌طور که از اطلاعات شبکه دریافت می‌شود، بار مصرفی شبکه ثابت فرض شده است، ولیکن مطالعات CVR نیازمند به در نظر گرفتن مدل باری وابسته به ولتاژ می‌باشد. مدل بار مورد استفاده در این پژوهش، مدل ZIP انتخاب شده است، لذا مقادیر توان مصرفی باس‌ها که در پیوست ۱ ارائه گردیده است، به عنوان توان مصرفی باس‌ها در ولتاژ نامی در نظر گرفته خواهد شد. همچنین فرض شده است که باس ۱۹ دارای بار مسکونی، باس ۲۰ دارای بار تجاری، باس ۲۱ دارای بار صنعتی، باس ۲۲ دارای بار روشنایی معابر و سایر باس‌های شبکه مورد مطالعه دارای بار ترکیبی هستند. ضرایب ZIP گروه‌های مختلف مصرفی در نظر گرفته شده برای مدل بار باس‌های شبکه توزیع مورد مطالعه، در فصل سوم محاسبه گردیده است.

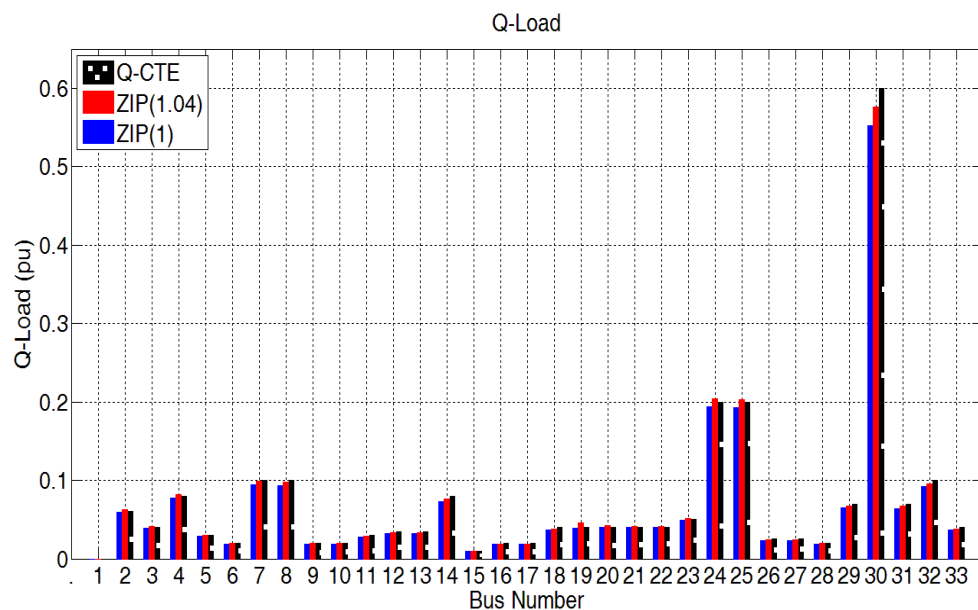
با اعمال پخش بار در شبکه ملاحظه می‌شود که شبکه دارای افت ولتاژ قابل توجه‌ای می‌باشد و تعداد زیادی از باس‌های شبکه خارج از محدوده استاندارد ولتاژ به مصرف‌کنندگان برق‌رسانی می‌کنند.

همچنین با بررسی نتایج پخش بار، مشاهده شده است که کمترین مقدار مشخصه ولتاژ شبکه برابر با 0.913 PU می باشد، لذا اقدامات حمایتی برای بهبود وضعیت شبکه مورد مطالعه ضروری می باشد. ابتدایی ترین راه به منظور رفع این مشکل افزایش ولتاژ اولیه شبکه می باشد، لذا در قسمتی از بررسی ها، ولتاژ اولیه شبکه از 1 PU به 1.04 PU افزایش داده می شود تا محدوده ولتاژ استاندارد رعایت شود.

اطلاعات مربوط به مصرف شبکه با در نظر گرفتن مدل بار ZIP برای شبکه با دو ولتاژ اولیه ۱ و 1.04 پریونیت و در نظر گرفتن مدل بار توان ثابت برای شبکه، در وضعیتی که تقاضای توان توسط شبکه بالادستی تأمین گردد، در شکل های ۲-۴ و ۳-۴ قابل مشاهده می باشد. در شکل ۲-۴ اطلاعات توان اکتیو مصرفی و در شکل ۳-۴ اطلاعات توان راکتیو مصرفی بارهای شبکه نشان داده شده است، تفاوت مشاهده شده در مقادیر توان مصرفی در حالات مختلف؛ به سبب ماهیت مدل بار در نظر گرفته شده برای شبکه می باشد. در حالت اول، مدل بار شبکه ثابت فرض شده است و ولتاژ اولیه شبکه 1 PU می باشد، در حالت دوم و سوم، رفتار مصرفی بارهای شبکه توسط مدل ZIP نمایش داده می شود؛ با این تفاوت که در حالت دوم ولتاژ اولیه شبکه 1.04 PU و در حالت سوم ولتاژ اولیه شبکه 1 PU می باشد.

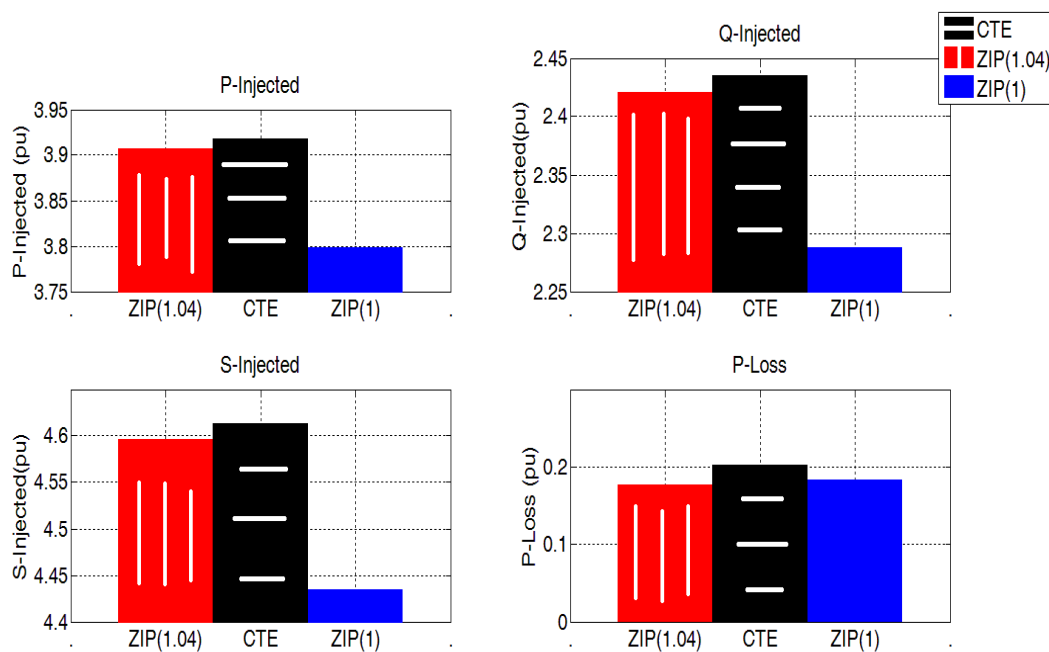


شکل (۲-۴): مصرف توان اکتیو بارهای شبکه در حالت عادی

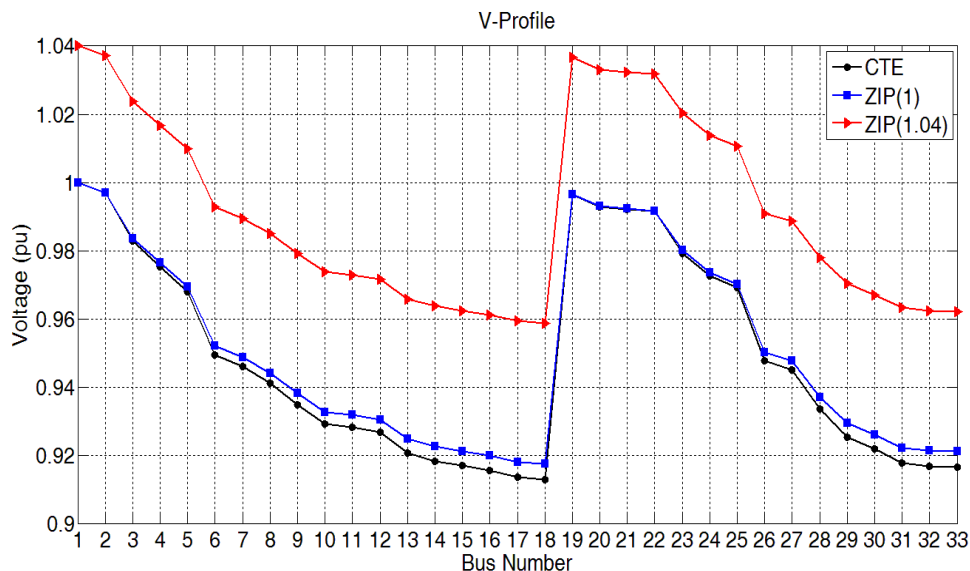


شکل (۴-۳): مصرف توان راکتیو باس‌های شبکه در حالت عادی

در شکل ۴-۴ اطلاعات تلفات توان اکتیو خطوط شبکه و توان اکتیو، توان راکتیو و توان ظاهری تزریقی به شبکه در حالات مختلف ارائه شده است. همچنین مشخصه ولتاژ حاصل از حالات مختلف در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است.



شکل (۴-۴): اطلاعات توان تزریقی و تلفات شبکه در حالت عادی



شکل (۴-۵): مشخصه ولتاژ شبکه در حالت عادی

۳-۴- تعیین نحوه مناسب استفاده از تولیدات پراکنده

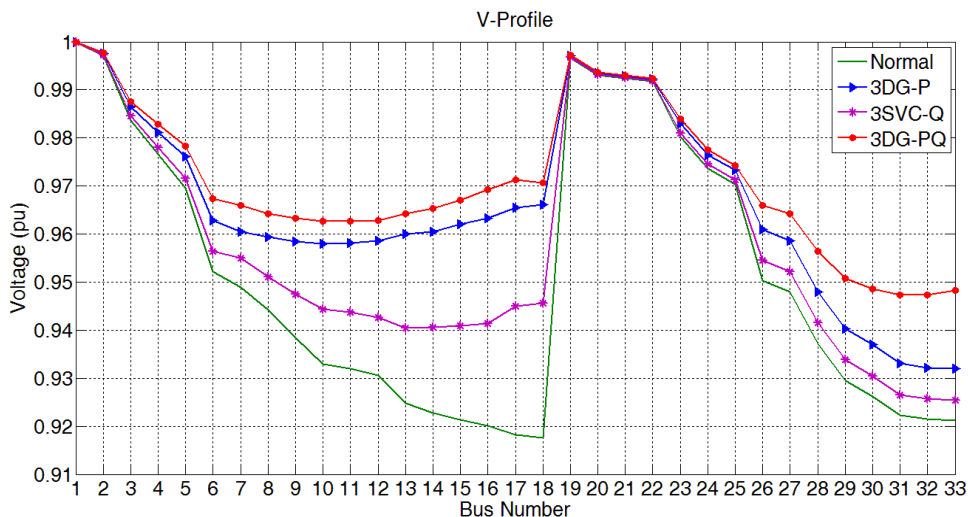
در این قسمت با اجرای الگوریتم بهینه‌سازی PSO به منظور جایابی ادوات حمایتی در شبکه، بهترین روش استفاده از تزریق‌کننده‌های توان اکتیو و راکتیو تعیین می‌گردد، منظور از ادوات حمایتی همان تولیدات پراکنده یا بانک‌های خازنی می‌باشند که برای کمک‌رسانی به شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، سه حالت برای استفاده از ادوات حمایتی به منظور تأمین حداکثر ۲۰٪ توان مصرفی شبکه پیش‌بینی شده است. در حالت اول استفاده از سه تأمین‌کننده توان راکتیو (SVC یا CB) به منظور تزریق توان راکتیو به شبکه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در حالت دوم استفاده از سه DG که تنها قابلیت تزریق توان اکتیو به شبکه را دارا هستند مورد بررسی قرار خواهد گرفت و در نهایت استفاده از سه DG با قابلیت تزریق توان اکتیو و راکتیو بررسی خواهد شد. لازم به ذکر است که به منظور رعایت محدودیت حداکثر توان تزریقی به شبکه توسط ادوات حمایتی که ۲۰ درصد تعیین شده است، در تمامی حالات، حداکثر توان اکتیو تزریقی به شبکه توسط ادوات

حمایتی ۷۵۰ کیلووات و حداکثر توان راکتیو تزریقی به شبکه ۴۸۰ کیلووات تعیین گردیده است که توسط سه واحد ادوات حمایتی با ظرفیت‌های یکسان انجام خواهد پذیرفت.

همان‌طور که در فصول گذشته مطرح گردید، تولیدات پراکنده می‌توانند نقش مؤثری در تصحیح مشخصه ولتاژ شبکه به منظور پیاده‌سازی مؤثرتر CVR ایفا کنند. توسط الگوریتم PSO جایابی ادوات حمایتی با هدف کاهش انحراف معیار مشخصه ولتاژ برای هر سه روش استفاده از DG و CB انجام پذیرفته است، نتایج اجرای الگوریتم در جدول ۴-۱ منتشر گردیده است. مشخصه ولتاژ حاصل از روش‌های به کارگیری ادوات حمایتی، در شکل ۴-۶ نمایش داده شده است. با توجه به نتایج و منحنی‌های به دست آمده، مناسب‌ترین انتخاب برای تابع هدف کاهش انحرافات ولتاژ، در نظر گرفتن ۳ واحد DG با قابلیت تولید توان اکتیو و راکتیو می‌باشد.

جدول (۴-۱): نتایج جایابی DG با هدف کاهش انحراف معیار مشخصه ولتاژ

سناریو	مکان نصب DG	اندازه DG		پایین‌ترین ولتاژ شبکه (pu)	انحراف معیار
		Q(KVar)	P(KW)		
عادی	-	-	-	۰/۹۱۷	۰/۰۲۸۶۲
3DG-P	۱۵	۲۵۰	-	۰/۹۳۱	۰/۰۱۹۵۲
	۱۷	۲۵۰	-		
	۱۸	۲۵۰	-		
3SVC-Q	۱۷	-	۱۶۰	۰/۹۲۵	۰/۰۲۳۵۲
	۱۸	-	۳۲۰		
	-	-	-		
3DG-P,Q	۱۶	۲۵۰	۱۶۰	۰/۹۴۷	۰/۰۱۵۴۷
	۱۷	۲۵۰	۱۶۰		
	۳۳	۲۵۰	۱۶۰		



شکل (۴-۶): مشخصه ولتاژ سناریوهای استفاده از DG با هدف کاهش انحراف معیار مشخصه ولتاژ

در این قسمت با استفاده از تابع هدف کاهش تلفات سیستم توزیع نمونه، جابجایی ادوات حمایتی با سناریوهای مختلف استفاده از آنها انجام پذیرفته است، نتایج الگوریتم PSO در جدول ۴-۲ نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده؛ با هدف کاهش تلفات سیستم، استفاده از سه DG با قابلیت تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه، کاهش تلفات بیشتری را در مقایسه با روش‌های دیگر برای شبکه محقق می‌سازد.

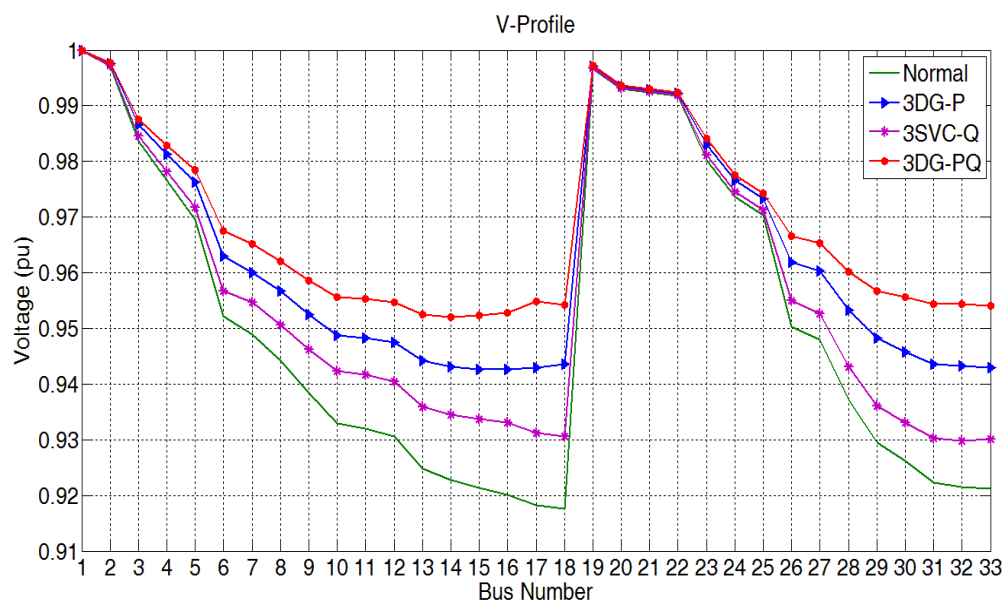
جدول (۴-۲): نتایج جابجایی DG با هدف کاهش تلفات

تلفات شبکه (KW)	اندازه DG		مکان نصب DG	سناریو
	Q(KVar)	P(KW)		
۱۸۲/۹۰۱	-	-	-	عادی
۱۱۵/۷۴۸	-	۲۵۰	۱۷	3DG-P
	-	۲۵۰	۳۱	
	-	۲۵۰	۳۲	
۱۵۱/۲۰۶	۱۶۰	-	۱۴	3SVC-Q
	۱۶۰	-	۳۰	
	۱۶۰	-	۳۱	
۸۵/۵۵۵	۱۶۰	۲۵۰	۱۷	3DG-P,Q
	۱۶۰	۲۵۰	۳۱	
	۱۶۰	۲۵۰	۳۲	

در این قسمت، الگوریتم PSO برای هر سه روش استفاده از ادوات حمایتی با هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ، یعنی کاهش اختلاف ولتاژ بین باس‌هایی که دارای بیشترین و کمترین اندازه ولتاژ می‌باشند، پیاده‌سازی شده است. نتایج اجرای الگوریتم در جدول ۳-۴ و مشخصه ولتاژ حاصل از هر روش در شکل ۷-۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ استفاده از سه واحد DG با توانایی تزریق توان اکتیو و راکتیو بهترین نتایج را به همراه داشته است.

جدول (۳-۴): نتایج جایابی DG با هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ

$\Delta V(\text{pu})$	پایین‌ترین ولتاژ شبکه (pu)	اندازه DG		مکان نصب DG	سناریو
		Q(KVar)	P(KW)		
۰/۰۸۲۳	۰/۹۱۷۶	-	-	-	عادی
۰/۰۵۷۳	۰/۹۴۲۷	-	۲۵۰	۱۸	3DG-P
		-	۲۵۰	۲۹	
		-	۲۵۰	۳۲	
۰/۰۷۰۲	۰/۹۲۹۷	۱۶۰	-	۱۱	3SVC-Q
		۱۶۰	-	۱۶	
		۱۶۰	-	۳۳	
۰/۰۴۷۹	۰/۹۵۲۱	۱۶۰	۲۵۰	۱۷	3DG-P,Q
		۱۶۰	۲۵۰	۳۰	
		۱۶۰	۲۵۰	۳۲	



شکل (۷-۴): مشخصه ولتاژ سناریوهای استفاده از DG با هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ

در این قسمت با استفاده از تابع هدف کاهش توان ظاهری تزریقی به شبکه، الگوریتم PSO اقدام به جایابی ادوات حمایتی شبکه می‌نماید، نتایج اجرای الگوریتم در جدول ۴-۴ نمایش داده شده است. با توجه به جدول ۴-۴، استفاده از سه واحد DG با قابلیت تزریق توان اکتیو و راکتیو، بهترین نتایج را به همراه داشته است.

جدول (۴-۴): نتایج جایابی DG با هدف کاهش توان تزریقی

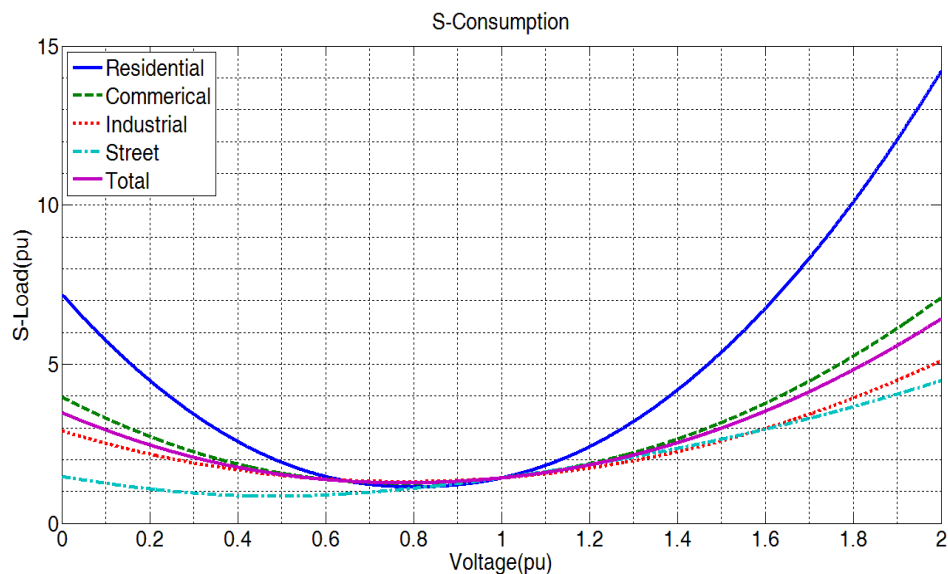
سناریو	مکان نصب DG	اندازه DG		توان ظاهری تزریقی (MVA)
		Q(KVar)	P(KW)	
عادی	-	-	-	۴/۴۳۴۵۹۷
3DG-P	۱۰	۲۵۰	-	۴/۳۸۴۹۲۰
	۱۶	۲۵۰	-	
	۳۲	۲۵۰	-	
3SVC-Q	۱۳	-	۱۶۰	۴/۴۱۰۰۱۲
	۳۰	-	۱۶۰	
	۳۱	-	۱۶۰	
3DG-P,Q	۱۵	۲۵۰	۱۶۰	۴/۳۶۴۳۵۲
	۳۰	۲۵۰	۱۶۰	
	۳۲	۲۵۰	۱۶۰	

با توجه به ضرایب ZIP مدل بار باس‌های سیستم، شبکه مورد مطالعه به منظور مصرف توان کمتر، تمایل به مشخصه ولتاژی پایین‌تر دارد. از آنجا که افزودن تولیدات پراکنده به شبکه، موجب افزایش اندازه ولتاژ باس‌های شبکه خواهد شد، استفاده از تابع هدف کاهش مصرف توان، رغبتی برای افزودن DG به شبکه از خود نشان نمی‌دهد و لذا معیار مناسبی برای تعیین مکان تولیدات پراکنده نخواهد بود و در مطالعات در نظر گرفته نشده است.

با عنایت به نتایج حاصل از جایابی تولیدات پراکنده با سناریوهای مختلف تعریف شده، استفاده از سه DG با قابلیت تزریق توان اکتیو و راکتیو، بهترین نتایج را هم برای دو تابع هدف مربوط به بهبود پروفیل ولتاژ و هم برای اهداف کاهش تلفات و کاهش توان ظاهری تزریقی به شبکه، محقق می‌سازد. همچنین مشاهده شد که استفاده از SVC یا CB با ظرفیت تعیین شده در این پژوهش و حتی استفاده از DG تنها با قابلیت تزریق توان اکتیو، توانایی خارج نمودن سیستم توزیع مورد مطالعه از حالت غیر استاندارد را نخواهند داشت. با توجه به ظرفیت ثابت تولیدات پراکنده، اگر کمتر از سه واحد DG برای حمایت از شبکه استفاده شود، باز هم شبکه از وضعیت عملکردی غیر استاندارد خارج نخواهد شد؛ لذا به منظور قراردادی شبکه در وضعیت عملکردی استاندارد، سه واحد تولید پراکنده با قابلیت تزریق توان اکتیو و راکتیو با ظرفیت مشخص و ثابت؛ به نحوی که اولاً ولتاژ شبکه در وضعیت استاندارد قرار بگیرد و ثانیاً توان مصرفی بار و تلفات شبکه به حداقل برسد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

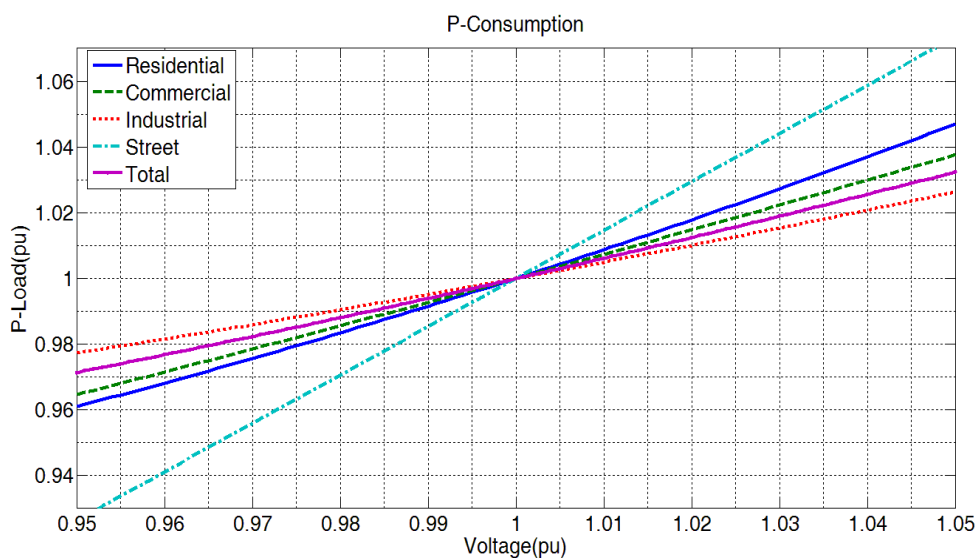
۴-۴- بررسی رفتار مدل بار شبکه

همان‌طور که در فصل ۳ ذکر گردید، مدل ZIP برای نمایش رفتار بار شبکه انتخاب گردیده است که وابسته به ولتاژ شبکه می‌باشد. میزان تغییرات توان مصرفی بار شبکه نسبت به تغییر ولتاژ، بر اساس ضرایب ZIP مدل بار باس‌های شبکه تعیین می‌گردد. در این قسمت تغییرات توان مصرفی بار باس‌های شبکه نسبت به تغییر ولتاژ نمایش داده می‌شود، کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه با توجه به ضرایب موجود در مدل بار هر باس اقدام به کاهش مصرف توان در آن باس می‌نماید. شکل ۴-۸ میزان مصرف توان ظاهری گروه‌های مختلف مصرفی را بر حسب ولتاژ نمایش می‌دهد، به منظور رسم این شکل، ولتاژ از مقدار صفر تا ۲PU تغییر یافته است و بر اساس معادله مدل بار ZIP، به ازای مقادیر مختلف ولتاژ، توان ظاهری مصرفی محاسبه گردیده است.

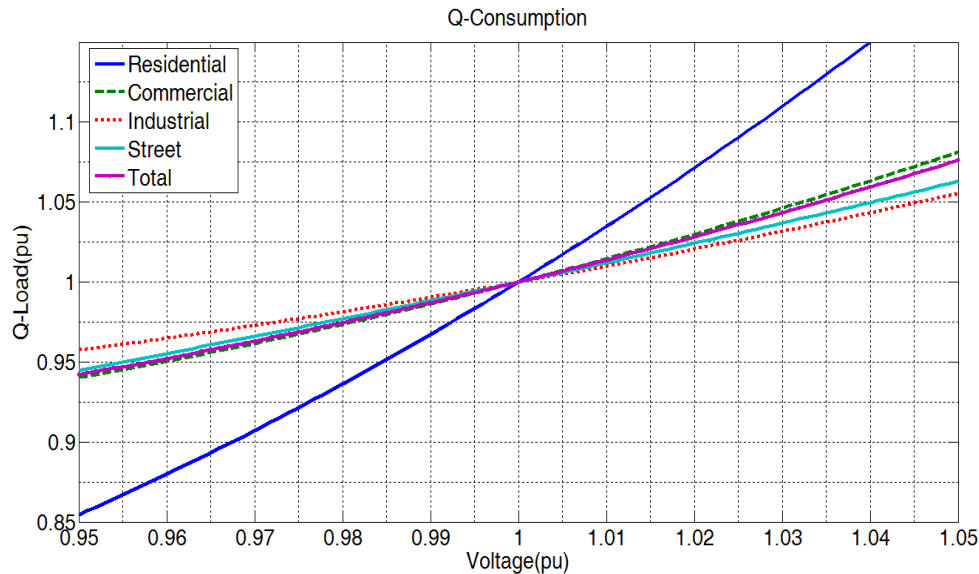


شکل (۸-۴): تأثیر ولتاژ بر مصرف توان ظاهری گروه‌های مصرفی

همان‌طور که در شکل ۸-۴ مشاهده می‌شود؛ با توجه به معادله درجه دوم مدل بار، نمودار مصرف توان ظاهری بارهای مختلف غیرخطی می‌باشد، همچنین می‌توان مشاهده کرد که در همسایگی مقدار نامی ولتاژ و توان، با کاهش ولتاژ، توان مصرفی بار نیز کاهش می‌یابد و این مطلب اصل اساسی روش کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه به شمار می‌آید. شکل ۹-۴ میزان مصرف توان اکتیو و شکل ۱۰-۴ میزان مصرف توان راکتیو گروه‌های مختلف مصرفی را بر حسب ولتاژ و در همسایگی مقدار نامی ولتاژ نمایش می‌دهد.



شکل (۹-۴): تأثیر ولتاژ بر مصرف توان اکتیو گروه‌های مصرفی



شکل (۴-۱۰): تأثیر ولتاژ بر مصرف توان راکتیو گروه‌های مصرفی

واضح است که هرچه شیب نمودارها بیشتر باشد، تأثیر CVR نیز بیشتر خواهد بود. لذا همان‌طور که از شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۰ نتیجه‌گیری می‌شود، CVR بیشترین کاهش مصرف توان اکتیو را در بارهای روشنایی معابر مانند باس ۲۲ و کمترین کاهش مصرف توان اکتیو را در بارهای صنعتی مانند باس ۲۱ به وجود خواهد آورد. همچنین CVR در خصوص کاهش مصرف توان راکتیو، بیشترین تأثیر را روی بارهای مسکونی مانند باس ۱۹ و کمترین تأثیر را مجدداً روی بارهای صنعتی خواهد داشت.

با توجه به شکل‌های مربوط به توان مصرفی بارها، این نکته قابل ذکر می‌باشد که تغییرات توان مصرفی بارها نسبت به تغییرات ولتاژ، وابسته به اندازه ولتاژ اولیه و ثانویه می‌باشد و این به جهت معادله درجه دوم مدل بار ZIP و منحنی‌های غیرخطی بار مصرفی نسبت به ولتاژ می‌باشد.

۴-۵- تعیین تابع هدف مطلوب

بی‌شک برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان در ولتاژی نزدیک به ولتاژ نامی مصرف‌کنندگان، یکی از مسائلی است که متولیان صنعت برق در بحث کیفیت توان به دنبال آن هستند. با این وجود CVR ایده‌ای را مطرح می‌نماید که در آن از تأمین توان در ولتاژی نزدیک به ولتاژ نامی مصرف‌کنندگان صرف نظر

می‌شود، ولی در شرایط بحرانی شبکه این امکان را به متولیان صنعت برق می‌دهد که ضمن رعایت محدوده استاندارد ولتاژ، تقاضای توان شبکه کاهش یابد و در نتیجه شرایط برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان بیشتری فراهم گردد.

توضیحات فوق اساس پیاده‌سازی CVR بلندمدت و کوتاه‌مدت را شکل می‌دهد و برنامه‌ریزان شبکه توزیع را ملزم می‌سازد که در دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی توسط تولیدات پراکنده؛ هم وضعیت شبکه در شرایط عادی و عدم نیاز به CVR را مدنظر داشته باشند و هم وضعیت شبکه در شرایط بحرانی که نیاز به CVR وجود دارد، مورد توجه قرار گیرد. در نهایت با توجه به توضیحات فوق، اهمیت جایابی DG آشکار می‌گردد و نتیجه گرفته می‌شود که تولیدات پراکنده می‌بایست به نحوی در شبکه جایابی شوند که هم در شرایط عدم نیاز به CVR و هم در شرایط نیاز به پیاده‌سازی CVR اهداف برنامه‌ریزی تا حد امکان محقق گردد. لازم به ذکر است که در این مطالعه، عملکرد شبکه در محدوده استاندارد و حداقل‌سازی توان ظاهری مورد نیاز شبکه، به عنوان اهداف برنامه تعریف گردیده است.

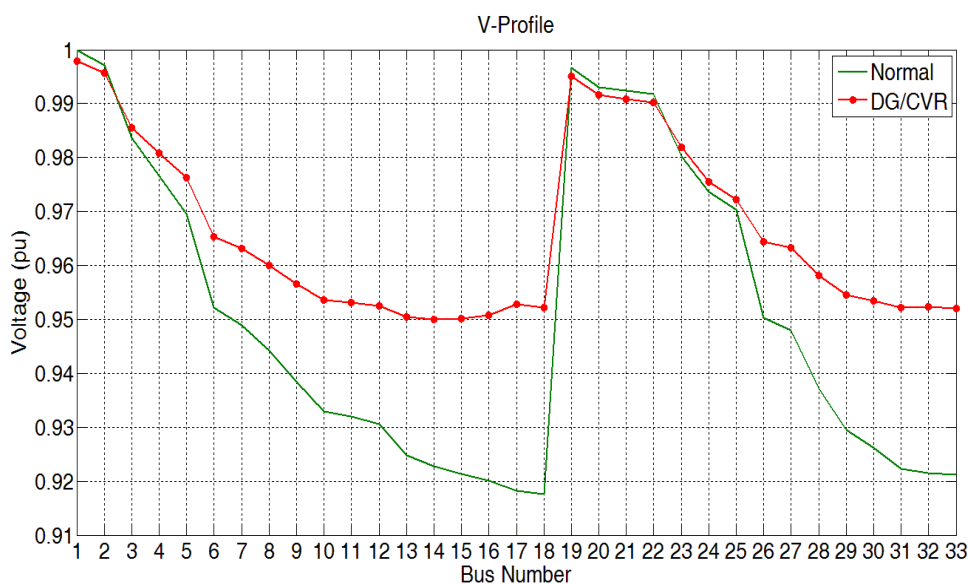
برای حالتی که پیاده‌سازی ۲۴ ساعته کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه در شبکه، یعنی CVR بلندمدت مدنظر باشد، لازم است که CVR نیز در الگوریتم بهینه‌سازی در نظر گرفته شود. به این منظور هر ذره در الگوریتم PSO سه باس پیشنهادی برای قرارگیری DG را در خود ذخیره می‌نماید و سپس با توجه به محل‌های تعیین شده برای DG، آنقدر ولتاژ اولیه شبکه کاهش می‌یابد که حداقل ولتاژ شبکه برابر با ۰/۹۵ PU گردد، در نهایت الگوریتم بهینه‌سازی از میان راه‌حل‌هایی که به وسیله آن‌ها محدوده استاندارد ولتاژ شبکه رعایت شده باشد، راه‌حلی که کمترین تقاضای توان ظاهری را دارا باشد، به عنوان راه‌حل بهینه که بیان‌گر محل‌های قرارگیری DG می‌باشد، معرفی می‌نماید.

با اجرای الگوریتم PSO با تابع هدف حداقل‌سازی تقاضای توان ظاهری شبکه، در شرایطی که پیاده‌سازی CVR نیز در الگوریتم بهینه‌سازی لحاظ شده باشد، یعنی هدف اجرای CVR بلندمدت باشد،

نتایج به صورت جدول ۴-۵ حاصل می‌گردد. همچنین مشخصه ولتاژ شبکه پس از قراردادی تولیدات پراکنده و پیاده‌سازی کاهش ولتاژ محافظه کارانه به طور همزمان، به صورت شکل ۴-۱۱ خواهد بود.

جدول (۴-۵): نتایج جایی DG همراه با CVR بلندمدت با هدف کاهش توان دریافتی شبکه

تابع هدف الگوریتم PSO	مکان نصب DG	اندازه DG		تلفات شبکه (KW)	توان مصرفی بار شبکه		توان ظاهری دریافتی (MVA)
		Q(KVar)	P(KW)		Q(KVar)	P(MW)	
کاهش توان دریافتی شبکه	۱۷	۱۶۰	۲۵۰	۸۵/۴۴۵	۲/۲۰۱۱۶۵	۳/۶۴۲۵۳۷	۴/۳۵۷۹۴۸
	۳۰	۱۶۰	۲۵۰				
	۳۲	۱۶۰	۲۵۰				



شکل (۴-۱۱): مشخصه ولتاژ شبکه پس از ادغام DG و CVR بلندمدت

در قسمت بعد هدف آن است که تعیین گردد؛ استفاده از کدام تابع هدف برای تعیین مکان DG، هم در شرایطی که CVR در شبکه اعمال نمی‌شود و هم در وضعیت بحرانی که CVR در شبکه اعمال خواهد شد، بیشترین منافع را برای شبکه به همراه خواهد داشت.

همان‌طور که در مطالب گذشته اشاره شد، در اجرای CVR کوتاه‌مدت می‌بایست برای دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی، وضعیت شبکه بدون اعمال CVR و همراه با پیاده‌سازی CVR مورد توجه قرار گیرد؛ به‌نحوی که تا حد قابل‌قبولی در هر دو وضعیت اهداف برنامه‌ریزی محقق گردد، لذا در این قسمت می‌بایست جایابی DG به صورتی انجام پذیرد که هم عملکرد شبکه در محدوده استاندارد ولتاژ قرار داشته باشد و هم شبکه همراه با CVR و بدون CVR تا حد امکان توان ظاهری کمتری مصرف نماید.

به این منظور، در ابتدا با ایجاد تابع برازندگی برای الگوریتم PSO توسط ترکیبات مختلف ۴ تابع هدف معرفی شده در فصل سوم، ۱۵ حالت ایجاد گردیده و سپس جایابی سه واحد DG با قابلیت تزریق توان اکتیو و راکتیو در حالات مختلف در شبکه انجام خواهد پذیرفت. ظرفیت تولیدات پراکنده ثابت و برابر ۲۵۰ کیلووات و ۱۶۰ کیلووار می‌باشد و از آن جهت که می‌خواهیم امکان افزایش بار شبکه در آینده هر چه بیشتر باشد، در وضعیت بدون CVR نیز معیار مقایسه، توان ظاهری دریافتی شبکه در حالات مختلف خواهد بود. با توجه به توضیحات فوق، تعداد و ظرفیت تولیدات پراکنده از قبل مشخص است و در این بخش هدف آن است که مکان مناسب جهت نصب واحدهای DG در حالات مختلف شناسایی گردد.

لازم به ذکر است که در این بخش، به منظور مقایسه بهتر حالات مختلف، ولتاژ اولیه سیستم توزیع PU ۱/۰۴ در نظر گرفته شده است تا برای تمامی حالات امکان اعمال CVR وجود داشته باشد. تابع هدف بهینه‌سازی در معادله ۳-۱۵ آورده شده است، k_1 ضریب تابع هدف کاهش انحراف معیار مشخصه ولتاژ، k_2 ضریب تابع هدف کاهش تلفات، k_3 ضریب تابع هدف کاهش توان ظاهری دریافتی شبکه و k_4 ضریب تابع هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ می‌باشد که برای نرمالیزه کردن مقادیر توابع هدف به کار گرفته شده است. نتایج جایابی DG در حالات مختلف در جدول ۴-۶ نمایش داده شده است، خروجی الگوریتم بهینه‌سازی مناسب‌ترین باس‌ها برای نصب سه واحد تولید پراکنده می‌باشد.

جدول (۴-۶): نتایج جایابی DG با توابع هدف مختلف و بدون اعمال CVR

CVR مجاز (pu)	توان دریافتی S(MVA)	مکان نصب DG	ضرایب تابع هدف				حالت
			k_4	k_3	k_2	k_1	
۰/۰۳۷۰۷۵	۴/۵۰۹۸۱۸	۱۶،۱۷،۳۳	۰	۰	۰	۱	۱
۰/۰۴۱۷۲۲	۴/۵۰۵۲۱۲	۱۷،۳۱،۳۲	۰	۰	۱	۰	۲
۰/۰۳۸۲۵۹	۴/۵۰۳۹۸۷	۱۵،۳۰،۳۲	۰	۱	۰	۰	۳
۰/۰۴۱۷۳۵	۴/۵۰۴۳۹۴	۱۷،۳۰،۳۲	۱	۰	۰	۰	۴
۰/۰۳۷۱۰۳	۴/۵۰۷۹۹۶	۱۴،۱۷،۳۳	۰	۰	۳۴	۲۰۷	۵
۰/۰۳۷۰۷۵	۴/۵۰۹۸۱۸	۱۶،۱۷،۳۳	۰	۱	۰	۲۰۷	۶
۰/۰۴۱۶۸۰	۴/۵۰۷۰۸۲	۱۸،۳۳،۳۳	۷۰	۰	۰	۲۰۷	۷
۰/۰۴۱۷۳۵	۴/۵۰۴۳۹۴	۱۷،۳۰،۳۲	۰	۱	۳۴	۰	۸
۰/۰۴۱۷۳۵	۴/۵۰۴۳۹۴	۱۷،۳۰،۳۲	۷۰	۰	۳۴	۰	۹
۰/۰۴۱۷۳۵	۴/۵۰۴۳۹۴	۱۷،۳۰،۳۲	۷۰	۱	۰	۰	۱۰
۰/۰۳۷۱۰۳	۴/۵۰۷۹۹۶	۱۴،۱۷،۳۳	۰	۱	۳۴	۲۰۷	۱۱
۰/۰۴۱۷۰۰	۴/۵۰۵۷۵۵	۱۸،۳۱،۳۳	۷۰	۰	۳۴	۲۰۷	۱۲
۰/۰۴۱۶۸۰	۴/۵۰۷۰۸۲	۱۸،۳۳،۳۳	۷۰	۱	۰	۲۰۷	۱۳
۰/۰۴۱۷۳۵	۴/۵۰۴۳۹۴	۱۷،۳۰،۳۲	۷۰	۱	۳۴	۰	۱۴
۰/۰۴۱۷۰۰	۴/۵۰۵۷۵۵	۱۸،۳۱،۳۳	۷۰	۱	۳۴	۲۰۷	۱۵

پس از جایابی تولیدات پراکنده با اهداف مختلف که نتایج آن در جدول ۴-۶ نمایش داده شده است، اکنون برای هر حالت کاهش ولتاژ محافظه کارانه اعمال خواهد شد، یعنی ولتاژ اولیه شبکه را به مقداری که مشخصه ولتاژ در محدوده استاندارد باقی بماند کاهش خواهیم داد، که نتایج آن در جدول ۴-۷ نمایش داده شده است. نتایج موجود در جدول ۴-۷ وضعیت شبکه را با وجود سه واحد DG در شبکه و پس از اجرای CVR نمایش می‌دهد.

جدول (۴-۷): وضعیت شبکه با حضور DG و CVR در حالات مختلف

توان ظاهری دریافتی S(MVA)	توان مصرفی بار شبکه		تلفات شبکه (KW)	ولتاژ اولیه شبکه	حالت
	Q(MVar)	P(MW)			
۴/۳۷۹۲۹۹	۲/۲۱۱۴۵۷	۳/۶۵۴۸۹۷	۹۰/۰۰۶	۱/۰۰۲۶۶۱	۱
۴/۳۵۸۷۷۰	۲/۲۰۱۷۰۶	۳/۶۴۳۱۲۷	۸۵/۴۷۹	۰/۹۹۷۹۱۵	۲
۴/۳۶۸۷۵۵	۲/۲۰۹۷۷۰	۳/۶۴۹۶۵۸	۸۵/۶۴۵	۱/۰۰۱۳۹۴	۳
۴/۳۵۷۹۴۸	۲/۲۰۱۱۶۵	۳/۶۴۲۵۳۶	۸۵/۴۴۵	۰/۹۹۷۹۰۳	۴
۴/۳۷۷۲۷۷	۲/۲۱۱۱۴۳	۳/۶۵۴۴۶۱	۸۸/۸۲۳	۱/۰۰۲۶۲۸	۵
۴/۳۷۹۲۹۹	۲/۲۱۱۴۵۷	۳/۶۵۴۸۹۷	۹۰/۰۰۶	۱/۰۰۲۶۶۱	۶
۴/۳۶۰۹۰۲	۲/۲۰۲۰۱۲	۳/۶۴۳۴۴۵	۸۶/۶۰۸	۰/۹۹۷۹۶۰	۷
۴/۳۵۷۹۴۸	۲/۲۰۱۱۶۵	۳/۶۴۲۵۳۶	۸۵/۴۴۵	۰/۹۹۷۹۰۳	۸
۴/۳۵۷۹۴۸	۲/۲۰۱۱۶۵	۳/۶۴۲۵۳۶	۸۵/۴۴۵	۰/۹۹۷۹۰۳	۹
۴/۳۵۷۹۴۸	۲/۲۰۱۱۶۵	۳/۶۴۲۵۳۶	۸۵/۴۴۵	۰/۹۹۷۹۰۳	۱۰
۴/۳۷۷۲۷۷	۲/۲۱۱۱۴۳	۳/۶۵۴۴۶۱	۸۸/۸۲۳	۱/۰۰۲۶۲۸	۱۱
۴/۳۵۹۴۱۷	۲/۲۰۱۸۵۸	۳/۶۴۳۲۸۱	۸۵/۷۹۳	۰/۹۹۷۹۳۹	۱۲
۴/۳۶۰۹۰۲	۲/۲۰۲۰۱۲	۳/۶۴۳۴۴۵	۸۶/۶۰۸	۰/۹۹۷۹۶۰	۱۳
۴/۳۵۷۹۴۸	۲/۲۰۱۱۶۵	۳/۶۴۲۵۳۶	۸۵/۴۴۵	۰/۹۹۷۹۰۳	۱۴
۴/۳۵۹۴۱۷	۲/۲۰۱۸۵۸	۳/۶۴۳۲۸۱	۸۵/۷۹۳	۰/۹۹۷۹۳۹	۱۵

از آن جا که معیار مقایسه بین حالات مختلف، حداقل بودن توان ظاهری دریافتی شبکه می باشد، همان طور که از نتایج جدول های ۴-۶ و ۴-۷ می توان دریافت؛ بهترین مکان ها برای نصب DG در شرایط بدون CVR، باس های ۱۵، ۳۰، ۳۲ می باشند که برای حالت سوم، یعنی حالتی که تابع هدف الگوریتم بهینه سازی کاهش توان ظاهری دریافتی شبکه بوده است، محقق گردیده است. همچنین کمترین تقاضای توان ظاهری شبکه پس از اعمال CVR، زمانی محقق شده که تولیدات پراکنده در باس های ۱۷، ۳۰، ۳۲ جایگذاری شده باشند، یعنی مکان هایی که الگوریتم بهینه سازی با تابع هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ به آن ها دست یافته است. قابل توجه است که باس های ۱۷، ۳۰، ۳۲ همان

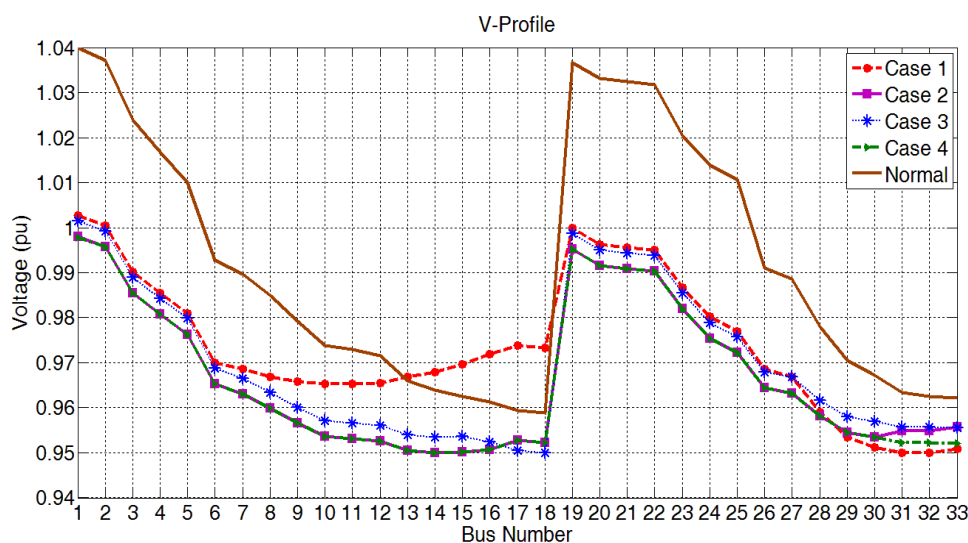
باس‌هایی هستند که الگوریتم بهینه‌سازی در خصوص CVR بلندمدت که شبکه را باوجود DG و CVR مورد بررسی قرار داده بود، برای مکان‌های نصب DG معرفی کرده بود.

برای CVR کوتاه‌مدت، با مقایسه حالت سوم یعنی استفاده از تابع هدف کاهش توان ظاهری دریافتی شبکه، با حالت چهارم یعنی استفاده از تابع هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ، می‌توان دریافت که شبکه در حالت سوم در شرایط بدون CVR، ۴۰۷ ولت‌آمپر نسبت به حالت چهارم کمتر توان ظاهری دریافت می‌کند، ولیکن در شرایط اجرای CVR، در حالت چهارم است که نسبت به حالت سوم، شبکه به میزان ۱۰/۸۰۷ کیلوولت‌آمپر، توان ظاهری کمتری دریافت می‌کند. دلیل برتری تابع هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ نسبت به تابع هدف کاهش توان ظاهری دریافتی شبکه در شرایطی که CVR اعمال شده است را می‌توان در تقابل بین کاهش توان مصرفی بار با افزایش ولتاژ ناشی از به کار گیری تولیدات پراکنده دانست، تقابلی که تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ با استفاده از روشی دو مرحله‌ای آن را برطرف نموده است.

در استفاده از تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ و کاهش انحرافات ولتاژ، مسیری دو مرحله‌ای برای دستیابی به اهداف اصلی برنامه ترسیم گردیده است، در مرحله اول به کمک DG شرایط برای اعمال هر چه بیشتر CVR فراهم می‌گردد و در مرحله دوم با اعمال CVR تقاضای توان ظاهری شبکه کاهش داده می‌شود، این روند همان روش دو مرحله‌ای به کار گیری CVR و DG به حساب می‌آید. در استفاده از تابع هدف کاهش تلفات و کاهش توان ظاهری دریافتی شبکه، جایابی DG به منظور دستیابی مستقیم به هدف اصلی برنامه انجام پذیرفته است و سپس CVR نیز به منظور کاهش تقاضای توان ظاهری شبکه اعمال شده است، این روند همان روش تک مرحله‌ای به کار گیری CVR و DG به حساب می‌آید. نتایج نشان می‌دهد در نهایت با توجه به مسئله تعریف شده، روش دو مرحله‌ای استفاده از تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ بهترین نتیجه را ایجاد نموده است.

با توجه به جدول ۴-۷، نکته قابل توجه؛ نزدیکی نتایج حاصل از تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ یعنی حالت سوم و کاهش تلفات سیستم یعنی حالت دوم می‌باشد که قابل پیش‌بینی نیز بوده است، چرا که کاهش تلفات به منزله کاهش افت ولتاژ شبکه و در نهایت محدوده ولتاژی باریک‌تر برای مشخصه ولتاژ شبکه می‌باشد. حساسیت تابع هدف کاهش تلفات به ولتاژ تمامی باس‌ها و حساسیت تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ تنها به باس دارای حداقل ولتاژ، منجر به اختلاف حاصل بین دو تابع هدف گردیده است، به‌نحوی که اولاً تابع هدف کاهش تلفات میزان مجاز CVR کمتری نسبت به تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ ایجاد نموده است و ثانیاً، هرچند دو تابع هدف محدوده ولتاژ تقریباً برابری ایجاد نموده‌اند، ولیکن میانگین مشخصه ولتاژ حاصل از تابع هدف کاهش تلفات، بیشتر از تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ بوده است، لذا با توجه به ماهیت بار وابسته به ولتاژ شبکه، در نهایت این تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ است که پس از اعمال CVR تقاضای توان کمتری برای بارهای شبکه ایجاد می‌نماید.

به منظور مقایسه‌ای دقیق‌تر میان نتایج حاصل از چهار تابع هدف معرفی‌شده در این پژوهش، در این قسمت نتایج به کارگیری مستقل هر یک از چهار تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی، نمایش داده شده است. در شکل ۴-۱۲، مشخصه ولتاژ حاصل از جایابی DG با توابع هدف معرفی شده و پس از اعمال CVR، با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل (۴-۱۲): مشخصه ولتاژ شبکه پس از ادغام DG و CVR کوتاه‌مدت

در جدول ۴-۸ با به کار گیری هر یک از چهار تابع هدف معرفی شده در این پژوهش به عنوان هدف

بهینه‌سازی، نتایج حاصل از الگوریتم PSO برای جابجایی DG نشان داده شده است.

جدول (۴-۸): نتایج ادغام عملکرد DG و CVR کوتاه‌مدت برای ۴ تابع هدف

مورد	۱			۲			۳			۴			عادی
تابع هدف الگوریتم PSO	کاهش انحرافات ولتاژ			کاهش تلفات			کاهش توان دریافتی			کاهش محدوده ولتاژ			-
	مکان نصب DG			اندازه DG			CVR مجاز (pu)			انحراف معیار ولتاژ ΔV (pu)			توان دریافتی قبل از S(MVA) CVR
	P(KW)	Q(KVar)											
-	۳۳	۱۷	۱۶	۳۲	۳۱	۱۷	۳۲	۳۰	۱۷	۳۲	۳۰	۱۷	-
-	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	-
-	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	-
-	۰/۰.۳۷۰.۷۵			۰/۰.۴۱۷۲۲			۰/۰.۳۸۲۵۹			۰/۰.۴۱۷۳۵			-
۰/۰.۲۸۲۰.۵	۰/۰.۱۵۴۸۱			۰/۰.۱۶۱۷۷۰			۰/۰.۱۶۸۰.۵			۰/۰.۱۶۳۸۹			۰/۰.۲۸۲۰.۵
۰/۰.۸۱۱۴۱	۰/۰.۵۲۶۶۰			۰/۰.۴۷۹۱۸			۰/۰.۵۱۳۹۳			۰/۰.۴۷۹۰.۲			۰/۰.۸۱۱۴۱
۴/۵۶۰.۷۶۷	۴/۵۰.۹۸۱۸			۴/۵۰.۵۲۱۲			۴/۵۰.۳۹۸۷			۴/۵۰.۴۳۹۴			۴/۵۶۰.۷۶۷
۱۷۸/۱۵۱	۹۰/۰.۰۰۶			۸۵/۴۷۹			۸۵/۶۴۵			۸۵/۴۴۵			۱۷۸/۱۵۱
۳/۷۰.۵۷۱۰	۳/۶۵۴۸۹۷			۳/۶۴۳۱۲۷			۳/۶۴۹۶۵۸			۳/۶۴۲۵۳۶			۳/۷۰.۵۷۱۰
۲/۲۷۲۲۸۲	۲/۲۱۱۴۵۷			۲/۲۰.۱۷۰۶			۲/۲۰.۹۷۷۰			۲/۲۰.۱۱۶۵			۲/۲۷۲۲۸۲
-	۴/۳۷۹۲۹۹			۴/۳۵۸۷۷۰			۴/۳۶۸۷۵۵			۴/۳۵۷۹۴۸			-

با توجه به توضیحات این بخش و جدی بودن خطر بحرانی تر شدن شبکه مورد مطالعه، می توان نتایج حاصل از حالتی که از تابع هدف کاهش محدوده مشخصه ولتاژ برای جایی تولیدات پراکنده استفاده شده است را، به عنوان نتایج بهینه در نظر گرفت، البته با استفاده از برخی از توابع هدف ترکیبی نیز، این نتایج بهینه حاصل گردیده است.

۴-۶- نتایج

نتایج شبیه سازی ها نشان داد که در شبکه ۳۳ با سه مورد مطالعه، استفاده از سه واحد تولید پراکنده با قابلیت تزریق توان اکتیو و راکتیو نسبت به سایر سناریوها، نتایج بهتری را به همراه خواهد داشت. همچنین نتایج نشان داد که در پیاده سازی یکپارچه برنامه CVR و DG، استفاده از تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ برای جایی تولیدات پراکنده، در نهایت منجر به دستیابی به نتایج بهتری در مقایسه با سایر توابع هدف می گردد.

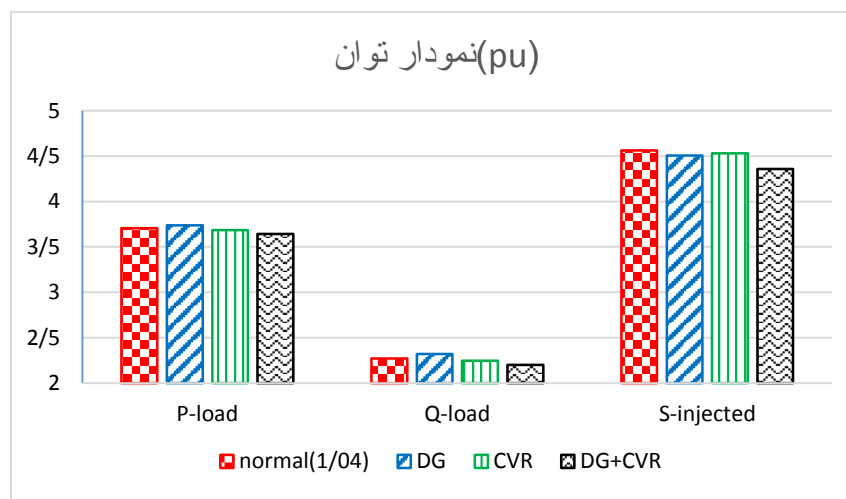
در این بخش نتایج به دست آمده از روش حمایتی ادغام CVR و DG با شرایط عادی شبکه با ولتاژ اولیه ۱/۰۴ پریونیت مقایسه می گردد، لازم به ذکر است که به منظور مقایسه جامع تر نتایج استفاده از CVR به تنهایی و نتایج استفاده از DG به تنهایی نیز ارائه گردیده است، جدول ۴-۹ نتایج حاصل از هر روش را نمایش می دهد.

جدول (۴-۹): نتایج راه کارهای حمایتی شبکه نمونه

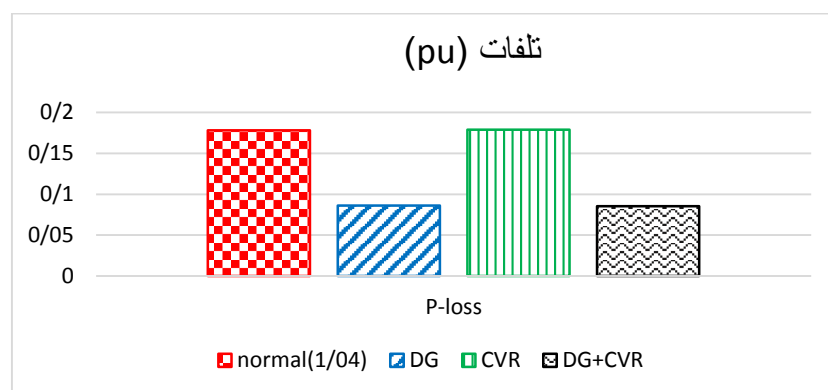
کمیت (pu)	عادی (۱/۰۴)	DG	CVR	CVR+DG
$P_{loss}(MW)$	۰/۱۷۸۱۵۱	۰/۰۸۶۲۲۰	۰/۱۷۸۸۷۷	۰/۰۸۵۴۴۵
$P_{load}(MW)$	۳/۷۰۵۷۱۰	۳/۷۳۸۷۹۲	۳/۶۸۵۵۶۷	۳/۶۴۲۵۳۶
$Q_{load}(MVAR)$	۲/۲۷۲۲۸۲	۲/۳۲۲۵۴۶	۲/۲۴۷۰۴۶	۲/۲۰۱۱۶۵
$S_{inj}(MVA)$	۴/۵۶۰۷۶۷	۴/۵۰۴۳۹۴	۴/۵۳۱۲۸۳	۴/۳۵۷۹۴۸

جدول ۹-۴ نشان می‌دهد؛ به کارگیری تنه‌های DG موجب افزایش توان مصرفی بار سیستم می‌گردد، از طرفی به کارگیری تنه‌های CVR موجب افزایش تلفات شبکه می‌گردد، ولیکن در صورتی که DG و CVR در قالب یک برنامه حمایتی مشترک به طور یکپارچه مورد استفاده قرار بگیرند، هر دو هدف کاهش مصرف توان و کاهش تلفات سیستم را به طور همزمان محقق می‌سازند.

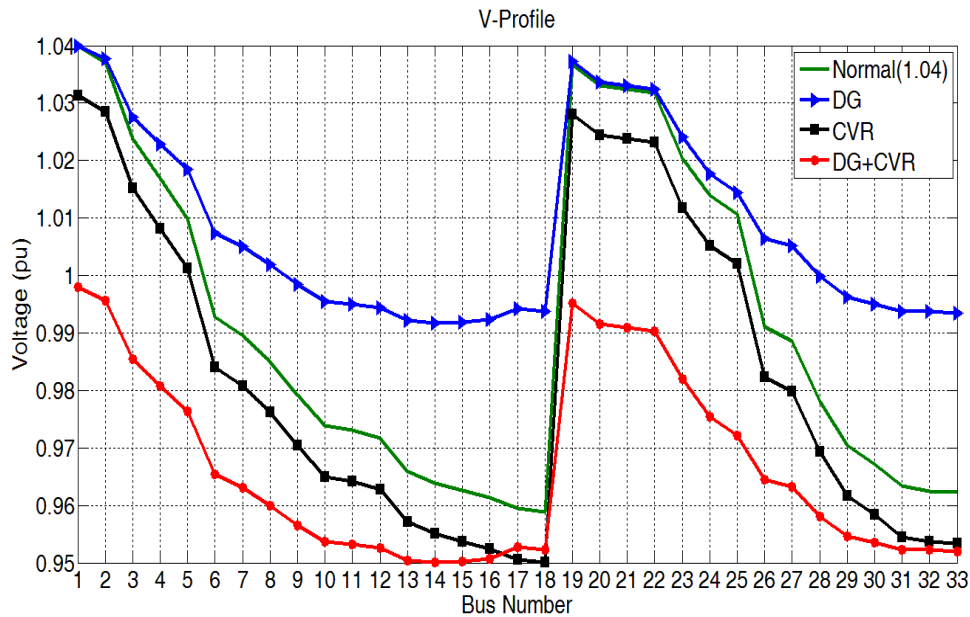
شکل ۱۳-۴، به ترتیب توان اکتیو مصرفی بار شبکه، توان راکتیو مصرفی بار شبکه و توان ظاهری تزریقی به شبکه در هر روش حمایتی را با یکدیگر مقایسه می‌کند. شکل ۱۴-۴، تلفات شبکه در هر روش حمایتی را مقایسه می‌کند و در نهایت شکل ۱۵-۴، مشخصه ولتاژ حاصل از روش‌های حمایتی را نمایش می‌دهد.



شکل (۱۳-۴): نمودار توان راه‌کارهای حمایتی مختلف شبکه



شکل (۱۴-۴): نمودار تلفات برای راه‌کارهای حمایتی مختلف شبکه



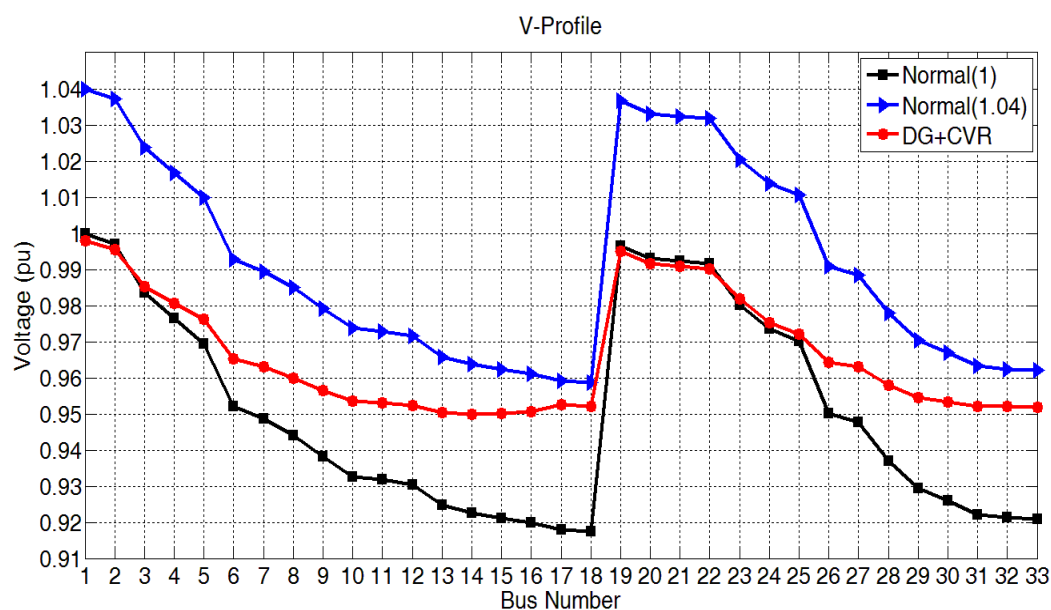
شکل (۴-۱۵): مشخصه ولتاژ حاصل از راه کارهای حمایتی شبکه

همان طور که در شکل ۴-۵ مشخص است؛ نتایج حاصل از پخش بار در وضعیت اولیه شبکه نمونه مورد مطالعه نشان داد که؛ مشخصه ولتاژ شبکه در وضعیت عادی، خارج از محدوده استاندارد ولتاژ، قرار دارد و در نتیجه شبکه نیازمند اقدامات حمایتی به منظور برق رسانی به مشترکین در محدوده استاندارد ولتاژ می باشد. از طرفی بار شبکه مدل ZIP وابسته به ولتاژ تعریف شده است که با افزایش ولتاژ شبکه، توان مصرفی بارهای شبکه نیز افزایش می یابد. دو راهکار حمایتی برای بهبود وضعیت شبکه مورد بررسی قرار گرفت، روش اول افزایش ولتاژ اولیه سیستم به مقدار $1/04$ پریونیت و روش دوم استفاده یکپارچه از کاهش ولتاژ محافظه کارانه و تولیدات پراکنده تعیین گردید. همان طور که از جدول ۴-۹ برداشت می شود؛ روش ادغام CVR و DG موجب می شود شبکه مورد مطالعه به میزان $202/819$ کیلوولت آمپر، نسبت به روش افزایش ولتاژ اولیه سیستم، کمتر توان ظاهری از شبکه بالادستی خود بکشد، این اختلاف از طرفی موجب صرفه جویی در انرژی خواهد شد و از طرف دیگر، در طولانی مدت می تواند هزینه های مربوط به نصب و راه اندازی DG را جبران نماید. علاوه بر این که روش ادغام CVR و DG مشخصه ولتاژ بسیار مناسب تری نیز نسبت به روش افزایش ولتاژ اولیه، برای شبکه ایجاد می نماید.

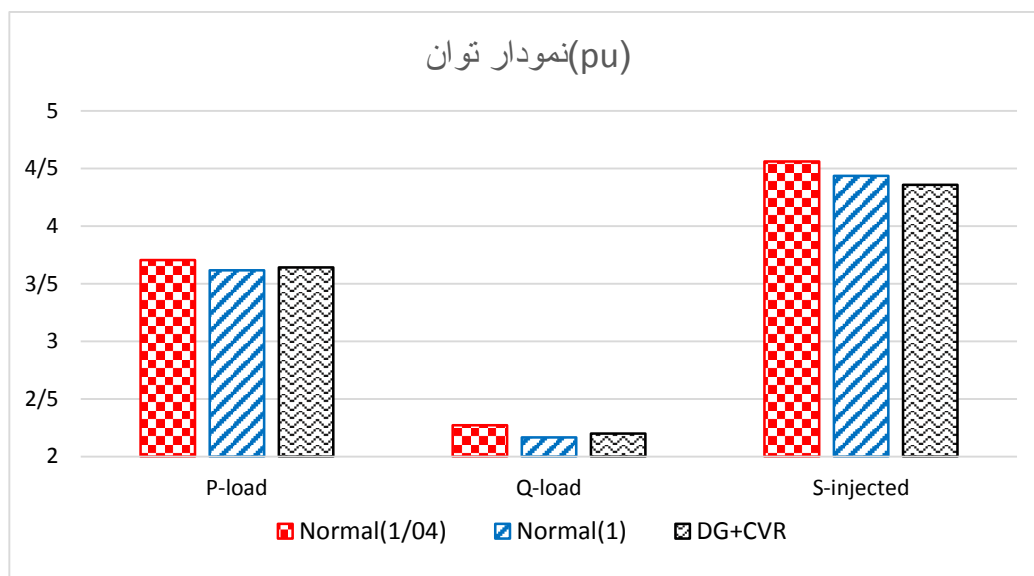
در این قسمت وضعیت غیر استاندارد اولیه شبکه را که در آن محدوده مجاز ولتاژ رعایت نشده بود را با وضعیت شبکه پس از اعمال روش‌های حمایتی مقایسه می‌نماییم. جدول ۴-۱۰ نتایج اجرای پخش بار را برای حالت عادی، حالت حمایتی که ولتاژ اولیه شبکه به ۱/۰۴ PU افزایش داده شده است و حالت حمایتی که از تولیدات پراکنده و کاهش ولتاژ محافظه کارانه به صورت یکپارچه استفاده شده است، نمایش می‌دهد. شکل ۴-۱۶ نیز مشخصه ولتاژ شبکه را برای هر کدام از سه حالت نمایش می‌دهد. در شکل ۴-۱۷ توان اکتیو و راکتیو مصرفی بار و توان ظاهری تزریقی به شبکه و در شکل ۴-۱۸ تلفات شبکه برای سه وضعیت مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول (۴-۱۰): نتایج پخش بار شبکه در وضعیت عادی و حمایت شده

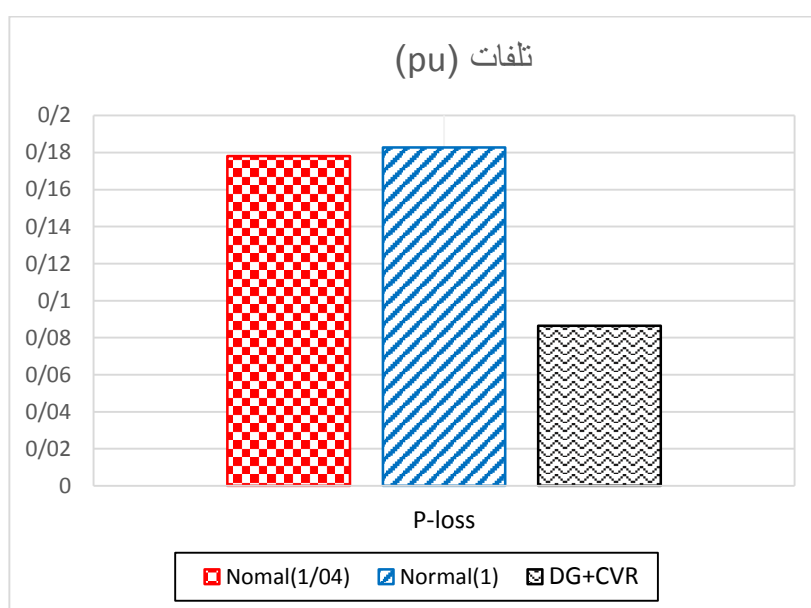
کمیت (pu)	δ	V_{min}	P_{loss}	P_{load}	Q_{load}	S_{inj}
عادی (۱)	۰/۰۲۸۶	۰/۹۱۷۷	۰/۱۸۲۸۲۸	۳/۶۱۵۹۲۴	۲/۱۶۶۱۴۵	۴/۴۳۴۵۱۷
عادی (۱/۰۴)	۰/۰۲۸۲	۰/۹۵۸۹	۰/۱۷۸۱۵۱	۳/۷۰۵۷۱۰	۲/۲۷۲۲۸۲	۴/۵۶۰۷۶۷
CVR+DG	۰/۰۱۶۳	۰/۹۵	۰/۰۸۵۴۴۵	۳/۶۴۲۵۳۶	۲/۲۰۱۱۶۵	۴/۳۵۷۹۴۸



شکل (۴-۱۶): مشخصه ولتاژ شبکه در وضعیت عادی و حمایت شده



شکل (۴-۱۷): نمودار توان وضعیت عادی و حمایت شده شبکه



شکل (۴-۱۸): نمودار تلفات وضعیت عادی و حمایت شده شبکه

نتایج جدول ۴-۱۰ و شکل ۴-۱۶ نشان می‌دهد که روش حمایتی افزایش ولتاژ اولیه شبکه؛ توانسته است محدوده عملکردی شبکه را در بازه استاندارد ولتاژ قرار دهد؛ ولیکن موجب شده است توان ظاهری تزریقی به شبکه به میزان ۲/۸۵٪ افزایش یابد که در تناقض با اهداف بهینه‌سازی و بهبود بهره‌وری عملکرد شبکه می‌باشد. در مقابل روش حمایتی ادغام DG و CVR به طور یکپارچه، علاوه بر قرار دادن مشخصه ولتاژ شبکه در رنج استاندارد، منجر به کاهش ۱/۷۳ درصدی توان ظاهری تزریقی به شبکه

گردیده است؛ این موضوع به این معناست که علاوه بر خروج شبکه از حالت غیر استاندارد، بهره‌وری شبکه نیز افزایش یافته است.

در مقایسه شبکه حمایت شده توسط ترکیب CVR و DG، با وضعیت غیر استاندارد اولیه شبکه، $1/86$ درصد صرفه‌جویی در توان اکتیو و $1/07$ درصد صرفه‌جویی در توان راکتیو تزریقی به شبکه حاصل شده است. همچنین با مقایسه وضعیت شبکه با وجود DG و بدون اعمال CVR، با وضعیت شبکه با وجود DG و پس از پیاده‌سازی CVR، برای کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه اعمال شده در شبکه، $CVR_f = 2/216$ و $CVRQ_f = 2/569$ به دست آمده است.

در پایان، آنالیز حساسیت مکان‌های مطلوب نصب DG که توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین می‌گردد، نسبت به تغییرات ضرایب ZIP مورد استفاده در این پژوهش انجام گرفته است. ضرایب ZIP مدل بار از مقدار ۵ تا $0/1$ درصد تغییر داده شده است و نتایج حاصل از هر حالت با نتایج ارائه شده در این پژوهش مورد مقایسه قرار گرفته است.

به عنوان نمونه، ضرایب ارائه شده در جدول ۴-۱۱ که همگی از تغییر ضرایب مدل بار به میزان کمتر از ۳ درصد به وجود آمده اند، در خصوص مکان‌های مطلوب نصب DG، نتایجی مشابه نتایج ارائه شده در این پژوهش را دارا می‌باشند که قبلاً در جدول ۴-۶ نمایش داده شده است. در نمونه ۱، ضرایب امپدانس ثابت ۱ درصد کاهش یافته و ضرایب توان ثابت بدون تغییر فرض شده است و سپس به نحوی که محدودیت‌های معادلات ۲-۳۱ و ۳-۳۲ رعایت شود، ضرایب جریان ثابت محاسبه گردیده است. طبق همین روند، در نمونه ۲، ضرایب امپدانس ثابت ۳ درصد افزایش یافته و ضرایب جریان ثابت بدون تغییر فرض شده است. در نمونه ۳، ضرایب جریان ثابت $0/9$ درصد کاهش یافته و ضرایب توان ثابت بدون تغییر فرض شده است. در نمونه ۴، ضرایب جریان ثابت ۳ درصد افزایش یافته و ضرایب امپدانس ثابت بدون تغییر فرض شده است. در نمونه ۵، ضرایب توان ثابت ۳ درصد کاهش یافته و ضرایب جریان ثابت

بدون تغییر فرض شده است. در نمونه ۶، ضرایب توان ثابت ۲ درصد افزایش یافته و ضرایب امپدانس ثابت بدون تغییر فرض شده است.

جدول (۴-۱۱): ضرایب ZIP حاصل از اعمال تغییرات کمتر از سه درصد

ضرایب ZIP	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
نمونه ۱	۰/۷۶۲۳	-۰/۹۲۲۳	۱/۱۶	۳/۵۸۳۸	-۵/۸۶۳۸	۳/۲۸
نمونه ۲	۰/۷۹۳۱	-۰/۹۳	۱/۱۳۶۹	۳/۷۲۸۶	-۵/۹	۳/۱۷۱۴
نمونه ۳	۰/۷۷۸۳۷	-۰/۹۳۸۳۷	۱/۱۶	۳/۶۷۳۱	-۵/۹۵۳۱	۳/۲۸
نمونه ۴	۰/۷۷	-۰/۹۰۲۱	۱/۱۳۲۱	۳/۶۲	-۵/۷۲۳	۳/۱۰۳
نمونه ۵	۰/۸۰۴۸	-۰/۹۳	۱/۱۲۵۲	۳/۷۱۸۴	-۵/۹	۳/۱۸۱۶
نمونه ۶	۰/۷۷	-۰/۹۵۳۲	۱/۱۸۳۲	۳/۶۲	-۵/۹۶۵۶	۳/۳۴۵۶

از طرفی مشخص گردید که اگر ضرایب ZIP مدل بار بیشتر از ۳ درصد دچار تغییر شوند، الگوریتم بهینه‌سازی PSO، در خصوص مکان‌های مطلوب نصب DG، در برخی حالات نتایج متفاوتی را نسبت به نتایج ارائه شده در این پژوهش معرفی خواهد نمود. به عنوان نمونه، با فرض ثابت ماندن ضرایب جریان ثابت، ضرایب امپدانس ثابت مدل بار به میزان ۴ درصد افزایش داده شده است و سپس با رعایت محدودیت‌های معادلات ۲-۳۱ و ۲-۳۲، ضرایب توان ثابت محاسبه گردیده است. در جدول ۴-۱۲ ضرایب حاصل از اعمال تغییرات فوق بر روی ضرایب ZIP مورد استفاده در این پژوهش ارائه گردیده است.

جدول (۴-۱۲): ضرایب ZIP حاصل از اعمال تغییرات بیشتر از سه درصد

ضرایب ZIP	Z_p	I_p	P_p	Z_q	I_q	P_q
نمونه	۰/۸۰۰۸	-۰/۹۳	۱/۱۲۹۲	۳/۷۶۴۸	-۵/۹	۳/۱۳۵۲

با در نظر گرفتن ضرایب ارائه شده در جدول ۴-۱۲ به عنوان ضرایب ZIP مدل بار سیستم توزیع نمونه و اجرای الگوریتم بهینه‌سازی جایابی DG، نتایج ارائه شده در جدول ۴-۱۳ برای حالات مختلف استفاده از توابع هدف حاصل گردیده است.

جدول (۴-۱۳): نتایج جایابی DG با استفاده از ضرایب ZIP نمونه

CVR مجاز (pu)	توان دریافتی S(MVA)	مکان نصب DG	ضرایب تابع هدف				حالت
			k_4	k_3	k_2	k_1	
۰/۰۳۷۱۴۱	۴/۵۱۱۸۴۱	۱۶،۱۷،۳۳	۰	۰	۰	۱	۱
۰/۰۴۱۷۴۲	۴/۵۰۷۷۲۹	۱۷،۳۱،۳۲	۰	۰	۱	۰	۲
۰/۰۳۸۲۸۶	۴/۵۰۶۳۱۰	۱۵،۲۹،۳۲	۰	۱	۰	۰	۳
۰/۰۴۱۷۵۷	۴/۵۰۶۷۸۱	۱۷،۳۰،۳۲	۱	۰	۰	۰	۴
۰/۰۳۷۱۶۹	۴/۵۰۹۹۹۰	۱۴،۱۷،۳۳	۰	۰	۳۴	۲۰۷	۵
۰/۰۳۷۱۴۱	۴/۵۱۱۸۴۱	۱۶،۱۷،۳۳	۰	۱	۰	۲۰۷	۶
۰/۰۴۱۷۰۰	۴/۵۰۹۶۳۱	۱۸،۳۳،۳۳	۷۰	۰	۰	۲۰۷	۷
۰/۰۴۱۷۵۷	۴/۵۰۶۷۸۱	۱۷،۳۰،۳۲	۰	۱	۳۴	۰	۸
۰/۰۴۱۷۵۷	۴/۵۰۶۷۸۱	۱۷،۳۰،۳۲	۷۰	۰	۳۴	۰	۹
۰/۰۴۱۷۵۷	۴/۵۰۶۷۸۱	۱۷،۳۰،۳۲	۷۰	۱	۰	۰	۱۰
۰/۰۳۷۱۶۹	۴/۵۰۹۹۹۰	۱۴،۱۷،۳۳	۰	۱	۳۴	۲۰۷	۱۱
۰/۰۴۱۷۲۰	۴/۵۰۸۲۷۷	۱۸،۳۱،۳۳	۷۰	۰	۳۴	۲۰۷	۱۲
۰/۰۴۱۷۰۰	۴/۵۰۹۶۳۱	۱۸،۳۳،۳۳	۷۰	۱	۰	۲۰۷	۱۳
۰/۰۴۱۷۵۷	۴/۵۰۶۷۸۱	۱۷،۳۰،۳۲	۷۰	۱	۳۴	۰	۱۴
۰/۰۴۱۷۲۰	۴/۵۰۸۲۷۷	۱۸،۳۱،۳۳	۷۰	۱	۳۴	۲۰۷	۱۵

آنالیز حساسیت در حالات مختلف تغییرات ضرایب مدل بار و با درصدهای مختلف تغییرات، صورت پذیرفته است که در قسمت قبل به طور نمونه به برخی از آن‌ها اشاره گردیده است. انجام آنالیز حساسیت بر روی مکان‌های بهینه نصب DG و ضرایب ZIP مدل بار سیستم توزیع نمونه، نشان داد که اگر تغییرات ضرایب ZIP مدل بار، کمتر از ۳٪ باشد، تغییری در نتایج پژوهش حاصل نمی‌گردد.

۴-۷- جمع‌بندی

در این فصل با انجام شبیه‌سازی؛ ادغام تولیدات پراکنده به سیستم توزیع نمونه و اجرای کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه در شبکه، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. ماهیت وابسته به ولتاژ مصرف توان بارها که توسط مدل بار ZIP نمایش داده شده بود، بستر مناسبی را به منظور صرفه‌جویی در انرژی در مواقع نیاز فراهم کرده است. نتایج نشان داد؛ به کارگیری یکپارچه DG و CVR می‌تواند نتایج قابل توجهی در خصوص صرفه‌جویی در انرژی و بهبود وضعیت شبکه، به همراه داشته باشد.

همچنین تأثیر حضور تولید پراکنده بر روی کاهش ولتاژ محافظه‌کارانه در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت که می‌تواند مرجع مناسبی برای مطالعات آینده در خصوص استفاده یکپارچه از DG و CVR در سیستم‌های توزیع باشد. در نهایت نشان داده شد که در به کارگیری یکپارچه DG و CVR، جایابی تولیدات پراکنده با استفاده از تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ، می‌تواند بهترین نتایج را در خصوص صرفه‌جویی در انرژی، به همراه داشته باشد.

در انتها، با انجام آنالیز حساسیت مشخص گردید که با تغییر ضرایب ZIP مدل بار سیستم توزیع تا مقدار ۳ درصد، تغییری در نتایج الگوریتم بهینه‌سازی در خصوص مکان‌های مناسب نصب تولیدات پراکنده حاصل نخواهد شد. لذا در محاسبه ضرایب مدل بار ZIP که در فصل سوم انجام پذیرفت، ۳ درصد خطا، مجاز می‌باشد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر حضور تولیدات پراکنده بر روی کاهش ولتاژ محافظه کارانه در سناریوهای مختلف و با در نظر گرفتن مدل ZIP برای نمایش رفتار بار شبکه انجام پذیرفت. به منظور پیاده سازی شبیه سازی ها؛ سیستم استاندارد ۳۳ باسه IEEE مورد استفاده قرار گرفت، با این برتری که برای نمایش رفتار بار شبکه، مدل ZIP که مدل بار دقیق تری می باشد، در نظر گرفته شد. برای اعمال پخش بار در شبکه نیز، روش پسرو-پیشرو به کار گیری شد.

برای تولیدات پراکنده علاوه بر قابلیت تولید توان اکتیو، قابلیت تزریق توان راکتیو نیز در نظر گرفته شد. به منظور جابجایی تولیدات پراکنده در شبکه، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات مورد استفاده قرار گرفت و سه سناریو برای نحوه استفاده از تولیدات پراکنده تعریف گردید که در نهایت استفاده از ۳ واحد DG با قابلیت تزریق توان اکتیو و راکتیو بهترین نتایج را برای تابع هدف الگوریتم به همراه داشت.

در مسئله بهینه سازی چهار تابع هدف به کار گرفته شد که با استفاده از روش PSO حل گردید و توسط آن ها دست یابی به اهداف برنامه ی ادغام CVR و DG؛ یعنی صرفه جویی در انرژی، از دو مسیر تک مرحله ای و دو مرحله ای دنبال گردید. برای اجرای روش تک مرحله ای ادغام DG و CVR، توابع هدف کاهش تلفات و کاهش توان ظاهری دریافتی شبکه، مورد استفاده الگوریتم بهینه سازی جابجایی DG قرار گرفت. همچنین برای اجرای روش دو مرحله ای ادغام DG و CVR، توابع هدف کاهش محدوده ولتاژ و کاهش انحرافات ولتاژ، مورد استفاده الگوریتم بهینه سازی جابجایی DG قرار گرفت. در نهایت نشان داده شد؛ در حالتی که توسط تابع هدف کاهش محدوده ولتاژ، جابجایی DG به منظور افزایش هر چه بیشتر اثرات CVR صورت می پذیرد و سپس با هدف دستیابی به صرفه جویی در انرژی، CVR اعمال می گردد، نتایج بهتری نسبت به سایر توابع هدف که مسیر تک مرحله ای را طی می کنند، حاصل خواهد شد.

وضعیت اولیه شبکه ۳۳ با سه مورد مطالعه، خارج از محدوده استاندارد ولتاژ قرار داشت که به منظور رفع مشکل و حمایت از شبکه دو راه کار افزایش ولتاژ اولیه و ادغام یکپارچه DG و CVR پیشنهاد گردید، نتایج نشان داد هر دو روش موفق به قرار دادن مشخصه ولتاژ شبکه در محدوده استاندارد ولتاژ شده اند، ولی در خصوص میزان توان ظاهری تزریقی به شبکه؛ روش افزایش ولتاژ اولیه موجب افزایش ۲/۸۵ درصدی توان ظاهری مصرفی شبکه گردیده است، در حالی که روش ادغام CVR و DG، توان ظاهری مصرفی شبکه را به میزان ۱/۷۳ درصد کاهش داده است.

بررسی ضرایب ZIP مدل بار گروه های مصرفی نشان می دهد که بیشترین تأثیر CVR در خصوص توان اکتیو به ترتیب روی گروه های مصرفی معابر، مسکونی، تجاری و صنعتی خواهد بود، همچنین در خصوص توان راکتیو، CVR به ترتیب روی گروه های مصرفی مسکونی، تجاری، معابر و در آخر صنعتی، بیشترین تأثیر را خواهد داشت. همچنین نتایج پیاده سازی کاهش ولتاژ محافظه کارانه در سیستم نمونه، CVR_f برابر با ۲/۲۱۶ و $CVRQ_f$ برابر با ۲/۵۶۹ را نشان می دهد.

مدل بار ZIP وابسته به ولتاژ بوده و اگر CVR و DG هر کدام مجزا و به تنهایی مورد استفاده قرار بگیرند، افزایش ولتاژ ناشی از جایگذاری DG، مصرف بار شبکه را افزایش خواهد داد و اعمال CVR نیز تلفات خطوط شبکه را افزایش خواهد داد. پژوهش حاضر نشان داد که در شبکه هایی که دارای بارهای امپدانس ثابت و جریان ثابت قابل توجهی می باشند، ادغام یکپارچه DG و CVR به سیستم علاوه بر این که کمبودهای دو روش را برطرف می سازد، نقش مؤثری نیز در بهبود اثرات آنها ایفا خواهد نمود. همان طور که نتایج شبیه سازی ها در شبکه ۳۳ با سه نمونه نشان داد؛ ترکیب CVR و DG و طی مسیر دو مرحله ای برای دستیابی به هدف صرفه جویی انرژی، علاوه بر قرار دادن عملکرد شبکه در محدوده استاندارد، منجر به ۱/۸۶ درصد صرفه جویی در توان اکتیو و ۱/۰۷ درصد صرفه جویی در توان راکتیو تزریقی به شبکه شده است.

۵-۲ پیشنهادات

۱- با توجه به اهداف مشترک کاهش ولتاژ محافظه کارانه و تولید پراکنده با سایر دستگاه‌های تنظیم‌کننده ولتاژ و توان راکتیو در سیستم‌های توزیع، تلفیق CVR و DG با سایر دستگاه‌های کنترلی در قالب کنترل ولت-وار هماهنگ، موضوعی است که می‌تواند در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد و همچنین تعیین تابع هدف مناسب برای جابجایی ادوات حمایتی شبکه را مورد بحث قرار دهد.

۲- ادغام اهداف CVR با برنامه‌های تجدید ساختار شبکه‌های توزیع و پیکربندی‌های مختلف شبکه‌ها، از موضوعاتی است که در زمینه افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌ها می‌تواند نقش قابل توجهی ایفا کند و موضوعی مناسب برای مطالعات آتی باشد.

۳- انجام تحقیقات بر روی مدل بار و ضرایب مدل ZIP بار، به منظور پیاده‌سازی CVR و ارزیابی اثرات CVR در سیستم‌های توزیع مختلف، می‌تواند برای سیستم‌های توزیع اثربخشی CVR را با هدف کاهش تلفات، کاهش بار پیک و کاهش مصرف به همراه داشته باشد.

۴- ملاحظات اقتصادی و محدودیت‌های سرمایه‌گذاری و علاقه موجود برای کاهش هزینه‌های تولید و مصرف برق، می‌تواند توجه تحقیقات آینده را به بررسی اثرات اقتصادی کاهش ولتاژ محافظه کارانه و تولیدات پراکنده، جلب کند.

پیوست‌ها

پیوست ۱- اطلاعات سیستم توزیع ۳۳ باسه IEEE

جدول پ-۱ مقادیر توان اکتیو و توان راکتیو مصرفی بار متصل به باس‌های سیستم توزیع نمونه را نمایش می‌دهد.

جدول (پ-۱): اطلاعات بار سیستم توزیع ۳۳ باسه IEEE [۵۷]

باس	توان اکتیو (KW)	توان راکتیو (KVar)	-	باس	توان اکتیو (KW)	توان راکتیو (KVar)
۱	۰	۰	-	۱۸	۹۰	۴۰
۲	۱۰۰	۶۰	-	۱۹	۹۰	۴۰
۳	۹۰	۴۰	-	۲۰	۹۰	۴۰
۴	۱۲۰	۸۰	-	۲۱	۹۰	۴۰
۵	۶۰	۳۰	-	۲۲	۹۰	۴۰
۶	۶۰	۲۰	-	۲۳	۹۰	۵۰
۷	۲۰۰	۱۰۰	-	۲۴	۴۲۰	۲۰۰
۸	۲۰۰	۱۰۰	-	۲۵	۴۲۰	۲۰۰
۹	۶۰	۲۰	-	۲۶	۶۰	۲۵
۱۰	۶۰	۲۰	-	۲۷	۶۰	۲۵
۱۱	۴۵	۳۰	-	۲۸	۶۰	۲۰
۱۲	۶۰	۳۵	-	۲۹	۱۲۰	۷۰
۱۳	۶۰	۳۵	-	۳۰	۲۰۰	۶۰۰
۱۴	۱۲۰	۸۰	-	۳۱	۱۵۰	۷۰
۱۵	۶۰	۱۰	-	۳۲	۲۱۰	۱۰۰
۱۶	۶۰	۲۰	-	۳۳	۶۰	۴۰
۱۷	۶۰	۲۰	-	مجموع	۳۷۱۵	۲۳۰۰

جدول پ-۲ مقاومت و راکتانس خطوط شبکه توزیع مورد مطالعه را جهت انجام عملیات پخش بار

و محاسبات تلفات توان نمایش می‌دهد.

جدول (پ-۲): اطلاعات امپدانس خطوط سیستم توزیع ۳۳ باسه IEEE [۵۷]

X(Ohm)	R(Ohm)	از باس	به باس	-	X(Ohm)	R(Ohm)	از باس	به باس
۰/۵۷۴۰	۰/۷۳۲۰	۱۸	۱۷	-	۰/۰۴۷۰	۰/۰۹۲۲	۲	۱
۰/۱۵۶۵	۰/۱۶۴۰	۱۹	۲	-	۰/۲۵۱۱	۰/۴۹۳۰	۳	۲
۱/۳۵۵۴	۱/۵۰۴۲	۲۰	۱۹	-	۰/۱۸۶۴	۰/۳۶۶۰	۴	۳
۰/۴۷۸۴	۰/۴۰۹۵	۲۱	۲۰	-	۰/۱۹۴۱	۰/۳۸۱۱	۵	۴
۰/۹۳۷۳	۰/۷۰۸۹	۲۲	۲۱	-	۰/۷۰۷۰	۰/۸۱۹۰	۶	۵
۰/۳۰۸۳	۰/۴۵۱۲	۲۳	۳	-	۰/۶۱۸۸	۰/۱۸۷۲	۷	۶
۰/۷۰۹۱	۰/۸۹۸۰	۲۴	۲۳	-	۰/۲۳۵۱	۰/۷۱۱۴	۸	۷
۰/۷۰۱۱	۰/۸۹۶۰	۲۵	۲۴	-	۰/۷۴۰۰	۱/۰۳۰۰	۹	۸
۰/۱۰۳۴	۰/۲۰۳۰	۲۶	۶	-	۰/۷۴۰۰	۱/۰۴۴۰	۱۰	۹
۰/۱۴۴۷	۰/۲۸۴۲	۲۷	۲۶	-	۰/۰۶۵۰	۰/۱۹۶۶	۱۱	۱۰
۰/۹۳۳۷	۱/۰۵۹۰	۲۸	۲۷	-	۰/۱۲۳۸	۰/۳۷۴۴	۱۲	۱۱
۰/۷۰۰۶	۰/۸۰۴۲	۲۹	۲۸	-	۱/۱۵۵۰	۱/۴۶۸۰	۱۳	۱۲
۰/۲۵۸۵	۰/۵۰۷۵	۳۰	۲۹	-	۰/۷۱۲۹	۰/۵۴۱۶	۱۴	۱۳
۰/۹۶۳۰	۰/۹۷۴۴	۳۱	۳۰	-	۰/۵۲۶۰	۰/۵۹۱۰	۱۵	۱۴
۰/۳۶۱۹	۰/۳۱۰۵	۳۲	۳۱	-	۰/۵۴۵۰	۰/۷۴۶۳	۱۶	۱۵
۰/۵۳۰۲	۰/۳۴۱۰	۳۳	۳۲	-	۱/۷۲۱۰	۱/۲۸۹۰	۱۷	۱۶

- [1] R. W. Beck, "Distribution Efficiency Initiative Final Report," *Northwest Energy Efficiency Alliance*, 2007.
- [2] F. Martzloff, L. Conrad, E. Yandek, A. Mansoor, T. Key, "The Power Quality Implications of Conservation Voltage Reduction," *PQ Commentary*, 2001.
- [3] T. L. Wilson, "Measurement and verification of distribution voltage optimization results for the IEEE power & energy society," in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1–9, 2010.
- [4] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, and M. M. Begovic, "Stochastic DG placement for conservation voltage reduction based on multiple replications procedure," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 3, pp. 1039–1047, 2015.
- [5] W. D. Caetano, P. R. S. Jota, and E. N. Gonçalves, "Comparison between static models of commercial/residential loads and their effects on conservation voltage reduction," in *Smart Energy Grid Engineering (SEGE), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 1–6, 2013.
- [6] M. Begovic, D. Novosel, B. Milosevic, and M. Kostic, "Impact of distribution efficiency on generation and voltage stability," in *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*, p. 7–pp, 2000.
- [7] D. Kirshner, "Implementation of conservation voltage reduction at Commonwealth Edison," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 5, no. 4, pp. 1178–1182, 1990.
- [8] B. W. Kennedy and R. H. Fletcher, "Conservation voltage reduction (CVR) at Snohomish County PUD," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 986–998, 1991.
- [9] Z. Wang, M. Begovic, and J. Wang, "Analysis of conservation voltage reduction effects based on multistage SVR and stochastic process," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 431–439, 2014.

- [10] Z. Wang and J. Wang, "Review on implementation and assessment of conservation voltage reduction," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1306–1315, 2014.
- [11] M. Diaz-Aguiló, J. Sandraz *et al.*, "Field-validated load model for the analysis of CVR in distribution secondary networks: Energy conservation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 4, pp. 2428–2436, 2013.
- [12] R. Singh, F. Tuffner, J. Fuller, and K. Schneider, "Effects of distributed energy resources on conservation voltage reduction (CVR)," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, pp. 1–7, 2011.
- [13] K. Gudger, M. Reedy, and O. Siddiqui, "Distribution Efficiency Initiative: Market Progress Evaluation Report, No. 1." Northeast Energy Efficiency Alliance, 2005.
- [14] C. A. McCarthy and J. Josken, "Applying capacitors to maximize benefits of conservation voltage reduction," in *Rural Electric Power Conference, 2003*, pp. C4–C4, 2003.
- [15] T. Wilson, "Adaptivolt based CVR in industrial applications technical synopsis," *White Pap. Util. May*, 2003.
- [16] K. P. Schneider, J. C. Fuller, F. K. Tuffner, and R. Singh, "Evaluation of conservation voltage reduction (CVR) on a national level," Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US), 2010.
- [17] C. Concordia and S. Ihara, "Load representation in power system stability studies," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, no. 4, pp. 969–977, 1982.
- [18] R. J. Smith and R. C. Dorf, *Circuits, devices and systems*. John Wiley & Sons, 2009.
- [19] Z. Wang and J. Wang, "Time-varying stochastic assessment of conservation voltage reduction based on load modeling," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 2321–2328, 2014.
- [20] R. C. Sonderegger, "Dynamic models of house heating based on equivalent thermal parameters," 1978.
- [21] K. P. Schneider, J. C. Fuller, and D. P. Chassin, "Multi-state load models for distribution system analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2425–

2433, 2011.

- [22] R. H. Fletcher and A. Saeed, "Integrating engineering and economic analysis for conservation voltage reduction," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, vol. 2, pp. 725–730, 2002.
- [23] M. J. Krok and S. Genc, "A coordinated optimization approach to Volt/VAr control for large power distribution networks," in *American Control Conference (ACC), 2011*, pp. 1145–1150, 2011.
- [24] K. C. Fagen, "Distribution efficiency voltage optimization supports lowest cost new resource," in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1–6, 2010.
- [25] K. C. Fagen and C. Bernier, "Efficiencies in distribution design and operating practices mid-study analysis (February 2007)," in *Rural Electric Power Conference, 2007 IEEE*, pp. B6–B6, 2007.
- [26] A. Ellis, R. Nelson *et al.*, "Reactive power interconnection requirements for PV and wind plants-recommendations to NERC," *Sandia Natl. Lab. Albuquerque, New Mex.*, vol. 87185, 2012.
- [27] D. Singh and K. S. Verma, "Multiobjective optimization for DG planning with load models," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 427–436, 2009.
- [28] D. Zhu, R. P. Broadwater, K.-S. Tam, R. Seguin, and H. Asgeirsson, "Impact of DG placement on reliability and efficiency with time-varying loads," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 419–427, 2006.
- [29] H. Hedayati, S. A. Nabaviniaki, and A. Akbarimajd, "A method for placement of DG units in distribution networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 3, pp. 1620–1628, 2008.
- [30] O. Curea, I. Vechiu, and H. Camblong, "Design of a test bench for the analysis of a hybrid power system," in *European Wind Energy Conference*, p. CD, 2004.
- [31] A. F. Zobaa and A. Majd, "Power electronics for distributed and co-generation," *Int. J. Energy Technol. Policy*, vol. 5, no. 2, pp. 109–117, 2007.

[32] س. ه. رضایی، ۱۳۸۴، "انواع پیل های سوختی و کاربرد آنها" جلد اول، چاپ اول، نشر دانشمند، تهران.

- [33] M. Vaziri, M. Afzal, M. Zarghami, A. Yazdani, S. Vadhva, and F. Tavatli, "Voltage impacts of DG on distribution grid with voltage regulators and SVCs," in *Green Technologies Conference, 2013 IEEE*, pp. 322–329, 2013.
- [34] B. Maurhoff and G. Wood, "Dispersed generation-reduce power costs and improve service reliability," in *Rural Electric Power Conference, 2000*, pp. C5-1, 2000.
- [35] K. Angelopoulos, "Integration of distributed generation in low voltage networks: Power quality and economics," *Univ. Strat. Glas. Dep. Mech. Eng. Glas.*, 2004.
- [36] A. Coelho, A. B. Rodrigues, and M. G. Da Silva, "Distribution network reconfiguration with reliability constraints," in *Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on*, vol. 2, pp. 1600–1606, 2004.
- [37] M. Ettehad, H. Ghasemi, and S. Vaez-Zadeh, "Voltage stability-based DG placement in distribution networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 1, pp. 171–178, 2013.
- [38] C. Wang and M. H. Nehrir, "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 2068–2076, 2004.
- [39] D. Q. Hung and N. Mithulananthan, "Multiple distributed generator placement in primary distribution networks for loss reduction," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1700–1708, 2013.
- [40] K.-H. Kim, Y.-J. Lee, S.-B. Rhee, S.-K. Lee, and S.-K. You, "Dispersed generator placement using fuzzy-GA in distribution systems," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, vol. 3, pp. 1148–1153, 2002.
- [41] N. S. Rau and Y. Wan, "Optimum location of resources in distributed planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 2014–2020, 1994.
- [42] R. S. Rao, S. V. L. Narasimham, M. R. Raju, and A. S. Rao, "Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm," *IEEE Trans. power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1080–1088, 2011.
- [43] G. Zareiegovar, R. R. Fesaghandis, and M. J. Azad, "Optimal DG location and sizing in distribution system to minimize losses, improve voltage stability, and

- voltage profile,” in *Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2012 Proceedings of 17th Conference on*, pp. 1–6, 2012.
- [44] G. W. Chang, S. Y. Chu, and H. L. Wang, “A simplified forward and backward sweep approach for distribution system load flow analysis,” in *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, pp. 1–5, 2006.
 - [45] V. Dabic, C. Siew, J. Peralta, and D. Acebedo, “BC hydro’s experience on voltage VAR optimization in distribution system,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES*, pp. 1–7, 2010.
 - [46] K. Nekooei, M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-Pour, and K. Y. Lee, “An improved multi-objective harmony search for optimal placement of DGs in distribution systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 557–567, 2013.
 - [47] M. Manbachi, H. Farhangi, A. Palizban, and S. Arzanpour, “Quasi real-time ZIP load modeling for Conservation Voltage Reduction of smart distribution networks using disaggregated AMI data,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 19, pp. 1–10, 2015.
 - [48] J. Sandraz, R. Macwan *et al.*, “Energy and economic impacts of the application of CVR in heavily meshed secondary distribution networks,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 4, pp. 1692–1700, 2014.
 - [49] R. S. Al Abri, E. F. El-Saadany, and Y. M. Atwa, “Optimal placement and sizing method to improve the voltage stability margin in a distribution system using distributed generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 326–334, 2013.
 - [50] D. A. Quijano and A. P. Feltrin, “Assessment of Conservation Voltage Reduction effects in networks with distributed generators,” in *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES*, pp. 393–398, 2015.
 - [51] A. Bokhari, A. Reza *et al.*, “Combined effect of CVR and DG penetration in the voltage profile of low-voltage secondary distribution networks,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 1, pp. 286–293, 2016.
 - [52] M. Farivar, R. Neal, C. Clarke, and S. Low, “Optimal inverter VAR control in distribution systems with high PV penetration,” in *Power and Energy Society*

General Meeting, 2012 IEEE, pp. 1–7, 2012.

- [53] T. Niknam, M. Zare, and J. Aghaei, “Scenario-based multiobjective volt/var control in distribution networks including renewable energy sources,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 4, pp. 2004–2019, 2012.
- [54] شرکت مادر تخصصی توانیر.
- [55] A. Bokhari, A. Alkan *et al.*, “Experimental determination of the ZIP coefficients for modern residential, commercial, and industrial loads,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 3, pp. 1372–1381, 2014.
- [56] F. Teng, “Implementation of a Voltage Sweep Power Flow Method and Comparison with Other Power Flow Techniques,” *Zurich Swiss Fed. Inst. Technol.*, 2014.
- [57] K. Dharageshwari and C. Nayanatara, “Multiobjective optimal placement of multiple distributed generations in IEEE 33 bus radial system using simulated annealing,” in *Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2015 International Conference on*, pp. 1–7, 2015.

Abstrac

These days, increase in electricity consumption and limited capacity of power plants along with considerations of investment and electricity costs, have caused to the development of ways to make more exploitation of the facilities available. Conservation voltage reduction is one of the novel phenomenon which is proposed to decrease power consumption, losses and peak load in distribution systems by reducing the voltage of the distribution system to the lowest possible level of the permissible range (0.95 to 1.05 per-unit of nominal amount of voltage). Distributed generation is also a subject with many proven advantages including power loss reduction, network capacity release and qualitative improvement of voltage profile, and in the recent years it has been appreciated by electrical industry planners. In the concept of a conservation voltage reduction, it is found that when the voltage profile of the distribution system is flat, conservation voltage reduction will be more effective, also the nature of the distributed generation tends to form a flat voltage profile. The integration of the goals and results of the method of conservation voltage reduction and distributed generation units will create a positive overlap in order to achieve optimization objectives and improve the efficiency of the power system. In this research, with regard to ZIP-load model, the optimal placement of distributed generation using the particle swarm optimization algorithm are carried out in order to achieve the objectives of the objective functions with different types and combinations and then conservation voltage reduction is implemented. ZIP load model coefficients are obtained by field measurements and calculations. In order to show the effect of distributed generation on the conservation voltage reduction, the above process is implemented on a 33-bus sample distribution system and obtained results will be examined in different scenarios.

Key Words: Conservation Voltage Reduction, Distributed Generation, ZIP Load Model, Loss Reduction, Reduce Consumption, Reduce Peak Demand



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis Power Electronic and Machine Engineering

**The effect of distributed generation on the conservation
voltage reduction considering the load model**

By: BEHNAM ABEDINI

Supervisors:

DR. MEHDI BANEJAD

DR. AMIR HASSANNIA

JANUARY 2018