

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده برق و رباتیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های قدرت

پخش بار در شبکه های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن

مدل بار

نگارنده: صدیقه عسکری

استاد راهنما

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور

دکتر محمد جعفریان

بهمن ۱۳۹۵

دانشکده: مهندسی برق و رباتیک

گروه: قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم صدیقه عسکری به شماره دانشجویی ۹۳۱۲۰۹۴ تحت عنوان

پخش بار در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با در

نظر گرفتن مدل بار

در تاریخ ۱۳۹۵/۱۱/۱۸ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد در مهندسی

برق-کنترل مورد ارزیابی و با درجه‌ی --- مورد پذیرش قرار گرفت.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر مهدی بانژاد	دانشیار	
استاد ممتحن اول	دکتر یاسر دامچی	استادیار	
استاد ممتحن دوم	دکتر حسین قلی زاده نرم	دانشیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر امیر حسن نیا خیبری	استادیار	

تقدیم ہے:

پدر و مادر عزیزم

کہ بی دریغ در تمام طول دوران تحصیل، ہموارہ پشتیبان و ہمراہم بودند...

سپاسگزاری:

الهی و ربی من لی غیرک؟! ...

در اینجا لازم میدانم صمیمانه از استاد راهنمایم جناب آقای دکتر باژاد که من را در تکمیل این پایان نامه راهنمایی کردند، تشکر و قدردانی کنم. همچنین تشکری خاص و ویژه به خاطر همه صبوری ها و نصیحت های ایشان در مدت زمان تکمیل پایان نامه از ایشان دارم.

از جناب آقای دکتر جعفریان مشاور محترم که راهنمایی های ایشان کمک بزرگی در پیشبرد این پایان نامه داشتند، کمال تشکر را دارم.

## تعهدنامه

اینجانب صدیقه عسکری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه پخش بار در شبکه های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مدل بار تحت راهنمایی جناب آقای دکتر مهدی بانزاد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصال بر خوردار 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

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

یکی از مسائل مهم در مطالعات سیستم قدرت، محاسبات پخش بار می باشد که از آن به منظور برنامه ریزی و بررسی نحوه عملکرد یک سیستم قدرت استفاده می شود. حضور منابع تولید پراکنده (DG) و ویژگی های شبکه توزیع، باعث شده است که انجام پخش بار این شبکه ها به کمک روش های مرسوم با چالش روبه رو گردد. از این رو، ضرورت یافتن روشی که علاوه بر موثر بودن در این سیستم ها، دارای محاسبات ساده و دقیق نیز باشد، احساس می گردد. علاوه بر این، در حالت کلی و به صورت دقیق تر اکثر بارها وابسته به ولتاژ می باشند که معمولاً رفتار وابستگی به ولتاژ بارها در اطراف نقطه کار با توابع نمایی و چند جمله ای تقریب زده می شود. همچنین وجود بارهای نامتعادل، سیستم را نامتعادل می سازد.

در این پایان نامه روش پسر و - پیشرو به عنوان یکی از روش های گسترده و در عین حال دارای حجم محاسبات پایین و دقت مناسب در تحلیل پخش بار سیستم های توزیع معرفی می گردد. در ادامه تحلیل روش پیشنهادی، اجزای مورد نیاز در تحلیل پخش بار سیستم توزیع مدل سازی و پس از آن، منابع تولید پراکنده و انواع مدل بار به سیستم اضافه می شود. الگوریتم مورد نظر بر روی سه سیستم تست پیاده سازی شده است. سیستم تست اول یک سیستم ۱۹ باسه سه فاز می باشد که برای بررسی تاثیر منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است. سیستم تست دوم یک سیستم ۳۴ باسه می باشد و روش مورد نظر در حضور بارهای متعادل و نامتعادل بر سیستم اعمال می گردد و در انتها یک سیستم تک فاز ۳۰ باسه برای نمایش عملکرد سیستم در حضور بارهای وابسته به ولتاژ مورد بررسی قرار می گیرد و نتایج ارائه می گردند. شبیه سازی ها در نرم افزار MATLAB انجام گرفته است.

**کلیدواژه:** سیستم توزیع- پخش بار- منابع تولید پراکنده- مدل بار- خطوط سه فاز- رگولاتورهای ولتاژ

## فهرست مطالب

۱-مقدمه.....	و
۱-۱-انگیزه تحقیق.....	۲
۱-۲-اهداف تحقیق.....	۵
۱-۳-مروری بر فصل‌های پایان‌نامه.....	۵
۲-مدل سازی اجزاء مختلف سیستم توزیع ازدید پخش بار و مدل سازی بار.....	۷
۲-۱-مقدمه.....	۸
۲-۲-سیستم توزیع.....	۸
۲-۲-۱-خطوط توزیع.....	۹
۲-۲-۱-۱-تبدیل کرون.....	۱۲
۲-۲-۲-ترانسفورماتورهای توزیع.....	۱۴
۲-۲-۲-۱-مدل توسعه داده شده برای ترانسفورماتور سه فاز.....	۱۹
۲-۲-۳-رگولاتورهای ولتاژ.....	۲۲
۲-۲-۳-۱-مدل ریاضی رگولاتورهای ولتاژ.....	۲۳
۲-۲-۴-مدل سازی بارها در سیستم توزیع.....	۲۶
۲-۲-۴-۱-انواع مدل بار.....	۲۷
۲-۲-۴-۲-نحوه اتصال بار به شبکه توزیع.....	۳۰
۲-۲-۵-مدل تولیدات پراکنده.....	۳۳
۲-۲-۵-۱-مدل سازی منابع تولید پراکنده برای مطالعات پخش بار.....	۳۴
۲-۲-۵-۲-نحوه محاسبه ماتریس حساسیت.....	۳۵
۲-۲-۵-۳-گام‌های موردنیاز برای مدل سازی باس کنترل ولتاژ در الگوریتم پخش بار.....	۳۶
۳-پخش بار در سیستم های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و انواع مدل بار.....	۳۹
۳-۱-مقدمه.....	۴۰



۳-۲	مقایسه روشهای تحلیل پخش بار در سیستمهای توزیع ..	۴۰
۳-۳	الگوریتم روش پس-رو- پیشرو ..	۴۱
۳-۳-۱	مرحله جاروب پسرو ..	۴۲
۳-۳-۲	مرحله جاروب پیشرو ..	۴۳
۳-۴	در نظر گرفتن ترانسفورماتور در الگوریتم پخش بار ..	۴۸
۳-۵	در نظر گرفتن رگولاتورهای ولتاژ در الگوریتم پخش بار ..	۵۱
۳-۶	در نظر گرفتن تولیدات پراکنده در الگوریتم پخش بار ..	۵۴
۳-۷	تأثیر بار در الگوریتم پس-رو- پیشرو ..	۵۷
۴-	شبیه سازی و تحلیل نتایج ..	۶۱
۴-۱	مقدمه ..	۶۲
۴-۲	معرفی سیستمهای تست مورد مطالعه ..	۶۲
۴-۲-۱	سیستم ۱۹ باسه توزیع ..	۶۲
۴-۲-۲	سیستم ۳۴ باسه توزیع ..	۶۳
۴-۲-۳	سیستم ۳۰ باسه توزیع ..	۶۳
۴-۳	پخش بار در سیستم تست ۱ (A-۱) ..	۶۵
۴-۴	پخش بار در سیستم تست ۱ (A-۲) ..	۶۷
۴-۵	پخش بار در سیستم تست ۱ (A-۳) ..	۶۹
۴-۶	پخش بار در سیستم تست ۲ (B-۱) ..	۷۳
۴-۷	پخش بار در سیستم تست ۲ (B-۲) ..	۷۶
۴-۸	پخش بار در سیستم تست ۲ (B-۳) ..	۷۹
۴-۹	پخش بار در سیستم تست ۳ (C-۱) ..	۸۱
۵-	نتیجه گیری و پیشنهادات ..	۸۳
۵-۱	نتیجه گیری ..	۸۴
۵-۲	پیشنهادهای ..	۸۴

۶-مراجع.....۸۷

۷-پیوست ها.....۹۳

## فهرست شکل؛

- شکل (۱-۲) - دیاگرام تک خطی سیستم قدرت ..... ۹
- شکل (۲-۲) - مدل خط سه فاز در سیستم توزیع ..... ۱۰
- شکل (۳-۲) - مدل خط سه فاز در سیستم توزیع همراه با سیم خنثی ..... ۱۱
- شکل (۴-۲) - مدل یک خط توزیع سه فاز - چهار سیمه ..... ۱۲
- شکل (۵-۲) - مدل یک ترانسفورماتور ..... ۱۴
- شکل (۷-۲) - مدار معادل یک ترانسفورماتور ستاره - مثلث به همراه جریانها و ولتاژها ..... ۱۵
- شکل (۸-۲) - دیاگرام اتصال ترانسفورماتور ستاره - ستاره زمین شده سه فاز ..... ۱۹
- شکل (۹-۲) - ارتباط بین جریان سیم پیچها و ترمینالهای ترانسفورماتور ستاره - مثلث ..... ۲۱
- شکل (۱۰-۲) - شماتیک مدل توسعه داده شده برای ترانسفورماتور ستاره - مثلث سه فاز ..... ۲۱
- شکل (۱۱-۲) - رگولاتور کاهنده ولتاژ نوع B ..... ۲۴
- شکل (۱۲-۲) - رگولاتور مثلث باز ..... ۲۵
- شکل (۱۳-۲) - بار با اتصال ستاره ..... ۳۰
- شکل (۱۴-۲) - بار با اتصال مثلث ..... ۳۲
- شکل (۱۵-۲) - بارهای توزیع شده پس از انتقال ..... ۳۳
- شکل (۱۶-۲) - یک فیدر ساده توزیع ..... ۳۶
- شکل (۱-۳) - شماتیک یک فیدر ساده توزیع ..... ۴۲
- شکل (۲-۳) - مراحل مختلف جاروب پس رو در الگوریتم پس رو - پیشرو ..... ۴۳
- شکل (۳-۳) - مراحل مختلف جاروب پیشرو در الگوریتم پس رو - پیشرو ..... ۴۴

- شکل (۴-۳) - فلوچارت روش پسرو- پیشرو در پخش بار سیستمهای توزیع ..... ۴۵
- شکل (۵-۳) - مدل خط تک فاز با ۴ باس ..... ۴۶
- شکل (۶-۳) - مدل خط سه فاز سیستم توزیع ..... ۴۶
- شکل (۷-۳) - مدل خط سه فاز چهار- سیمه ..... ۴۷
- شکل (۸-۳) - مدل ترانسفورماتور در مرحله پسرو ..... ۴۸
- شکل (۹-۳) - مدل ترانسفورماتور در مرحله پیشرو ..... ۴۹
- شکل (۱۰-۳) - فلوچارت الگوریتم پسرو-پیشرو در حضور ترانسفورماتورهای توزیع ..... ۵۰
- شکل (۱۱-۳) - رگولاتور افزاینده با اتصال ستاره ..... ۵۱
- شکل (۱۲-۳) - مدل رگولاتور در الگوریتم پسرو - پیشرو ..... ۵۲
- شکل (۱۳-۳) - فلوچارت الگوریتم پسرو -پیشرو در حضور رگولاتورهای ولتاژ ..... ۵۴
- شکل (۱۴-۳) - ساختار کلی از حضور منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع ..... ۵۴
- شکل (۱۵-۳) - فلوچارت الگوریتم پسرو- پیشرو در حضور منابع تولید پراکنده کنترل ولتاژ ..... ۵۷
- شکل (۱۶-۳) - فلوچارت الگوریتم پسرو - پیشرو در حضور بارهای توان ثابت ..... ۵۸
- شکل (۱۷-۳) - فلوچارت الگوریتم پسرو - پیشرو در حضور بارهای وابسته به ولتاژ ..... ۵۹
- شکل (۱-۴) - فلوچارت پخش بارهای انجام شده در سیستمهای تست ..... ۶۴
- شکل (۲-۴) - شماتیک تک خطی سیستم تست ۱ ..... ۶۵
- شکل (۳-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) در فازهای مختلف سیستم تست ۱ ..... ۶۶
- شکل (۴-۴) - شماتیک سیستم تست ۱ در حضور منبع تولید پراکنده ..... ۶۸
- شکل (۵-۴) - پروفیل ولتاژ در حضور و بدون حضور منبع تولید پراکنده PQ ثابت ..... ۶۹
- شکل (۶-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) در حضور و بدون حضور منبع تولید پراکنده کنترل

ولتاژ.....	۷۱
شکل (۷-۴) - مقایسه پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) سیستم ۱۹ باسه در حالت بدون حضور منبع تولید پراکنده و در حضور منبع تولید پراکنده PV و PQ.....	۷۱
شکل (۸-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) در سیستم تست ۱ در حضور منبع تولید پراکنده کنترل ولتاژ در باس ۱۴.....	۷۲
شکل (۹-۴) - شماتیک تک خطی سیستم ۳۴ باسه IEEE.....	۷۴
شکل (۱۰-۴) - مدل بارهای توزیع شده برای تبدیل به بارهای متراکم.....	۷۴
شکل (۱۱-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) سیستم تست ۲ با بار متعادل.....	۷۵
شکل (۱۲-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) سیستم ۳۴ باسه در حضور بارهای متعادل و نامتعادل.....	۷۶
شکل (۱۳-۴) - یک بار سه فاز ستاره نامتعادل.....	۷۷
شکل (۱۴-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) در فازهای مختلف سیستم ۳۴ باسه IEEE	
الف) پروفیل ولتاژ فاز a ب) پروفیل ولتاژ فاز b ج) پروفیل ولتاژ فاز c د) پروفیل ولتاژ فازهای a, b, c.....	۷۸
شکل (۱۵-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) سیستم ۳۴ باسه در حالات بدون رگولاتور.....	۷۹
شکل (۱۶-۴) - شماتیک تک خطی سیستم ۳۰ باسه.....	۸۰
شکل (۱۷-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) سیستم ۳۰ باسه در حضور بارهای وابسته به ولتاژ.....	۸۲

## فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۲) - زیر ماتریس های به کاررفته در ماتریس ادمیتانس ترانسفورماتور سه فاز برای اتصالات

رایج ..... ۱۷

جدول (۲-۲) - رنج ولتاژ برای مبنای ۱۲۰ ولت بر اساس استاندارد ANSIC84.1 ..... ۲۳

جدول (۱-۳) - دسته‌بندی و مقایسه روشهای مورد استفاده در پخش بار سیستمهای توزیع ..... ۴۱

جدول (۱-۴) - ولتاژ در فازهای مختلف سیستم تست ۱ ..... ۶۶

جدول (۲-۴) - مقایسه نتایج ولتاژ (بر حسب پریونیت) در حضور منبع تولید پراکنده PQ ثابت ..... ۶۸

جدول (۳-۴) - مقایسه نتایج پخش بار سیستم ۱۹ با سه در حضور منبع تولید پراکنده کنترل ولتاژ ۷۰ ..... ۷۰

جدول (۴-۴) - مقایسه نتایج پخش بار با ۱۴ از سیستم تست ۱ در حضور منبع تولید پراکنده کنترل

کنترل ولتاژ ..... ۷۲

جدول (۵-۴) - نتایج حاصل از پخش بار سیستم ۳۴ با سه ..... ۸۰

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ انگیزه تحقیق

محاسبات پخش بار<sup>۱</sup> از جمله مسائل مهم در بررسی سیستم‌های قدرت می‌باشد که بسیاری از پارامترهای سیستم از جمله ولتاژ خط، جریان خط، توان‌های اکتیو و راکتیو و ... را می‌توان به وسیله آن به دست آورد. روش‌های پخش بار زیادی در سیستم‌های انتقال ارائه گردیده است. این روش‌ها به دلیل ویژگی‌های سیستم توزیع از جمله ساختار شعاعی سیستم توزیع، نسبت بالای  $\frac{R}{X}$  و ... در این سیستم‌ها کارآمد نمی‌باشد و همگرایی مطلوب را ندارد. از طرف دیگر، یک سیستم توزیع به صورت شبکه‌ای از باس-ها که به خطوط توزیع، ترانسفورماتورها، رگولاتورها و ... متصل شده است، نشان داده می‌شود. خطوط توزیع ممکن است تک فاز، سه فاز و یا دارای سیم خنثی باشند و هر باس سیستم نیز ممکن است دارای بارهایی متعادل یا نامتعادل باشد. تأثیر برخی از این ویژگی‌ها ممکن است باعث نامتعادلی سیستم گردد [۱]. از این روش‌های به کار برده شده در پخش بار سیستم‌های توزیع با روش‌های مرسوم سیستم انتقال متفاوت می‌باشد. یک روش مؤثر و قابل اعتماد برای دستگاه‌های توزیع باید قادر به حل مساله با چندین هزار گره و چندین سطح ولتاژ باشد [۲]. در ابتدا تحقیقاتی برای تعدیل روش نیوتن و پخش بار سریع برای سازگاری با شبکه‌های توزیع صورت گرفت. اما این روش‌ها دارای محاسبات بالا می‌باشند و ویژگی-های خاص شبکه توزیع به طور واضح در نظر گرفته نمی‌شوند [۳].

روش گوس - سایدل نیز یکی دیگر از روش‌هایی می‌باشد که برای پخش بار شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار گرفت، اما این روش نیز به دلیل عدم تعادل بار و ساختار شعاعی شبکه توزیع، رنج گسترده مقاومت و راکتانس برای استفاده در این شبکه‌ها مناسب نبود [۴].

تلاش دیگری که برای تحلیل پخش بار شبکه‌های توزیع صورت گرفت استفاده از تئوری شبکه

---

<sup>۱</sup> Load Flow



نردبانی<sup>۱</sup> بود. تئوری شبکه‌های نردبانی از لحاظ محاسباتی بسیار سریع می‌باشد اما همگرایی مطلوب در بسیاری از شبکه‌ها نخواهد داشت [۵]. سیستم‌های توزیع ممکن است به صورت حلقوی ضعیف<sup>۲</sup> باشند (شبکه‌های حلقوی ضعیف، شبکه‌هایی می‌باشند که دارای حداقل یک حلقه می‌باشد). در این شبکه‌ها الگوریتم‌های پخش باری بر اساس روش‌های جبران سازی معرفی شدند. بعد از این روش‌ها، الگوریتم‌های دیگری که محاسبات سریعتر و دقیق‌تری داشتند، توسعه یافتند. روش ماتریس امپدانس ( $Z_{bus}$ ) یکی از این روش‌ها می‌باشد که شبکه به صورت لایه‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود [۶].

روش مستقیم یکی از روش‌های دیگر در پخش بار شبکه‌های توزیع می‌باشد، در این روش بارها به صورت امپدانس ثابت مدل می‌گردند و شبکه توزیع به صورت یک شبکه سلفی - مقاومتی در نظر گرفته می‌شود سپس ماتریس امپدانس محاسبه می‌گردد [۷]. با ایجاد تغییراتی این روش‌ها برای تحلیل شبکه‌های دارای مش نیز قابل استفاده می‌باشند. حجم بالای محاسبات در این روش‌ها باعث می‌گردد که در شبکه‌های توزیع کارآمد نباشند [۸]. یک روش متفاوت دیگر برای تحلیل پخش بار شبکه‌های توزیع در [۹] ارائه گردیده است که در این روش ابتدا شاخه‌های خارج از شاخه اصلی مشخص می‌گردد سپس جریان شاخه‌ها و ولتاژ گره‌ها محاسبه می‌گردد که در سیستم‌های بزرگ شناسایی گره‌ها زمان زیادی به طول می‌انجامد و الگوریتم دارای سرعت بالایی نمی‌باشد.

در [۱۰] روش دیگری بر مبنای تزریق جریان در سیستم توزیع بیان گردید که به کمک دو ماتریس ولتاژ شین‌ها به عنوان تابعی از جریان شاخه‌ها و امپدانس خطوط در نظر گرفته می‌شود. این روش از لحاظ محاسباتی ساده می‌باشد اما همه ویژگی‌های سیستم توزیع را پوشش نخواهد داد. روش‌های دیگری نیز ارائه گردیده‌اند که با استفاده از ماتریس امپدانس می‌توان افت ولتاژ در شین‌ها را محاسبه نمود [۱۱].

---

<sup>۱</sup> Ladder

<sup>۲</sup> Weakly Meshed

روش پس‌رو- پیشرو یک روش مؤثر در تحلیل پخش بار سیستم‌های توزیع می‌باشد که ایده اصلی این روش توسط برگ بیان گردید و پس‌از آن توسط شیرمحمدی و همکارانش توسعه داده شد [۱۲]. این روش دارای دو گام اصلی می‌باشد. گام اول یا جاروب پس‌رو<sup>۱</sup> برای تعیین جریان‌ها به کار می‌رود و گام دوم یا جاروب پیشرو<sup>۲</sup>، با استفاده از جریان‌های به دست آمده و امیدانس شاخه‌ها، مقادیر ولتاژ را محاسبه می‌کند. در سال‌های اخیر این روش برای تحلیل سیستم‌های سه فاز و سه فاز - چهار سیمه شامل سیم خنثی زمین شده بهبود یافت.

عدم تعادل بارها در سیستم‌های قدرت بر روی پارامترهای سیستم تأثیرگذار است. بارهای سیستم قدرت به دو دسته استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌گردند که در مطالعات پخش بار و برنامه‌ریزی شبکه، مدل استاتیکی بار را در نظر گرفته می‌شود. بارها می‌توانند به صورت ستاره یا مثلث به سیستم متصل گردند [۱۳]. در حالت کلی و به صورت دقیق‌تر اکثر بارها وابسته به ولتاژ می‌باشند. بارهای موجود در سیستم قدرت رفتارهای متفاوتی را در تغییرات ولتاژ خواهند داشت. برای مثال، مصرف توان اکتیو و راکتیو توسط لامپ‌های فلوروسنت تأثیر زیادی بر دامنه ولتاژ خواهند داشت در حالی که کامپیوترهای خانگی حساسیت کمتری به تغییرات ولتاژ خواهند داشت. در روش‌های مرسوم رفتار وابستگی به ولتاژ بارها را در اطراف نقطه کار با توابع چند جمله‌ای و نمایی تقریب می‌زنند. افزایش میزان بار نیز ناپایداری را افزایش خواهد داد. در نظر گرفتن مدل واقعی بار محدوده پایداری را افزایش خواهد داد و نتایج پخش بار واقعی‌تری را خواهیم داشت [۱۴].

با افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی، تغییرات آب و هوا و ایجاد رقابت در صنعت برق، نفوذ و کاربرد منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت افزایش یافته است. این منابع بیشتر به شبکه‌های توزیع

---

<sup>۱</sup> Backward

<sup>۲</sup> Forward

متصل می‌گردند. وجود منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع باعث تغییراتی در سیستم می‌گردد. عملکرد این منابع ممکن است به صورت باس‌های کنترل ولتاژ<sup>۱</sup> و باس‌های PQ ثابت باشد. منابع تولید پراکنده PQ در سیستم به صورت بار منفی<sup>۲</sup> در نظر گرفته می‌شود اما در مدل‌سازی باس‌های PV می‌بایست مراحل اضافه‌تری انجام گردد. روش به کار برده شده در پخش بار باید توانایی مدل‌سازی این باس‌ها را نیز داشته باشد [۱۵].

## ۲-۱ اهداف تحقیق

در این پایان‌نامه روشی در زمینه پخش بار سه فاز سیستم توزیع ارائه می‌گردد که دارای اهداف زیر می‌باشد:

- در نظر گرفتن عدم تعادل در سیستم
- لحاظ کردن مدل بار
- در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده

## ۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در فصل دوم در مورد سیستم توزیع، اجزای سیستم توزیع و نحوه مدل‌سازی آن‌ها در پخش بار صحبت می‌شود. در فصل سوم انواع روش‌های پخش بار در سیستم توزیع معرفی می‌گردد و روش پسر-و-پیشرو به عنوان روشی مناسب در تحلیل سیستم‌های توزیع مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل چهارم نحوه انجام روش پسر-و-پیشرو در حضور منابع تولید پراکنده، انواع مدل بار، وجود ترانسفورماتورهای توزیع و رگولاتورهای ولتاژ در سیستم سه فاز توزیع بیان می‌شود و در هر مرحله فلوچارت الگوریتم رسم

<sup>۱</sup> PV bus

<sup>۲</sup> Negative Load

می‌گردد. در فصل پنجم روش ارائه شده به منظور بررسی تأثیر حضور منابع تولید پراکنده و انواع مدل‌های بار بر روی سه سیستم تست اعمال می‌گردد و نتایج به دست آمده در هر مرحله تحلیل می‌شود. در انتها در فصل ششم نتایج جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق ارائه می‌گردد.

## فصل دوم

مدل سازی اجزاء مختلف سیستم توزیع ازدیادپخش بار و مدل سازی

بار

## ۱-۲ مقدمه

بخش توزیع به عنوان یکی از بخش های اصلی سیستم قدرت می باشد که از نظر ساختاری تفاوت های با بخش انتقال دارد. این تفاوت باعث شده است که روش های پخش بار مرسوم در بخش انتقال در قسمت توزیع کارایی لازم را نداشته باشد. در این فصل ابتدا به بررسی سیستم توزیع و اجزای سیستم توزیع پرداخته می شود. سپس از دیدگاه پخش بار اجزاء مختلف سیستم توزیع مدل سازی می گردد. همچنین انواع مدل بار در این فصل بیان می گردد.

## ۲-۲ سیستم توزیع

سیستم قدرت به طور کلی به سه بخش اصلی به صورت زیر تقسیم می گردد:

- تولید<sup>۱</sup>

- انتقال<sup>۲</sup>

- توزیع<sup>۳</sup>

بخش توزیع به عنوان مرحله نهایی تحویل انرژی به بارها محسوب می گردد که شامل خطوط ولتاژ متوسط، پست ها و خطوط ولتاژ پایین می شود. این شبکه ها دارای ساختار شعاعی<sup>۴</sup> می باشند و انتقال انرژی در آن ها در جهت مشخصی می باشد. ولتاژ بخش انتقال در مجاورت بارها و توسط ترانسفورماتورهای کاهنده کاسته می شود و پس از آن به سمت شبکه های فوق توزیع و توزیع می رود. شبکه های توزیع در ایران ۲۰ کیلوولت و ۳۸۰ ولت اجرا می شود. شکل زیر دیاگرام تک خطی سیستم قدرت را نشان می دهد [۱۶].

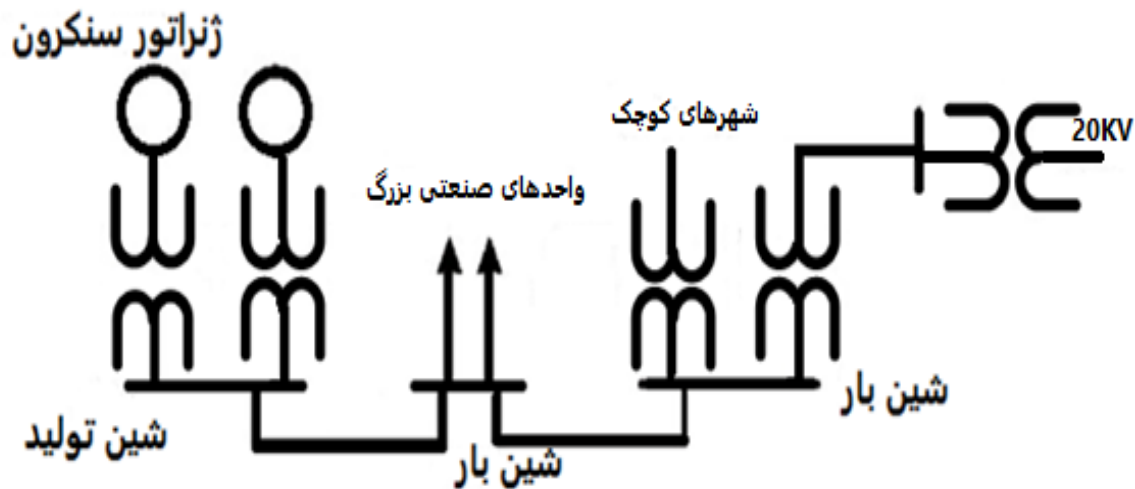
---

<sup>۱</sup> Generation

<sup>۲</sup> Transmission

<sup>۳</sup> Distribution

<sup>۴</sup> Radial



شکل (۱-۲) - دیاگرام تک خطی سیستم قدرت [۱۶]

اجزای سیستم توزیع به دو دسته کلی تقسیم می گردند:

- ۱- اجزای تحویل دهنده توان<sup>۱</sup>: مثل ترانسفورماتورها<sup>۲</sup> و رگولاتورهای<sup>۳</sup> ولتاژ که می توان آن ها را با ماتریس های ادمیتانس و امپدانس نشان داد.
- ۲- اجزا تبدیل کننده توان<sup>۴</sup>: این اجزا انرژی الکتریکی را به شکل های دیگر انرژی تبدیل می کنند. این گروه از اجزا شامل منابع تولید پراکنده، بارها و... می باشند. توصیف این اجزا به روش مورد استفاده در شبیه سازی بستگی دارد [۱۶].

## ۲-۲-۱ خطوط توزیع

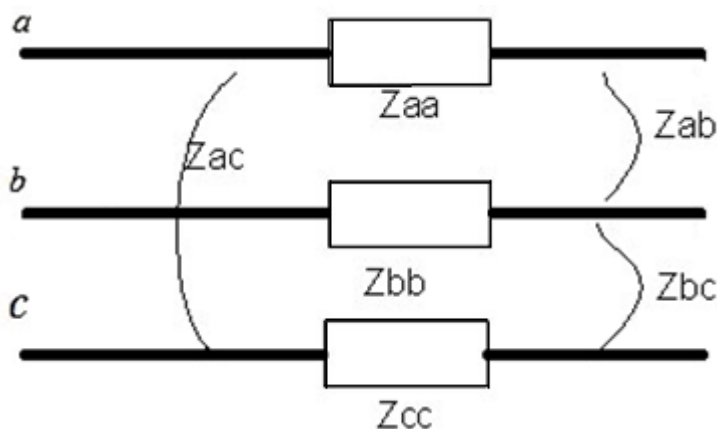
خطوط توزیع سه فاز را می توان با ماتریس امپدانس  $3 \times 3$  شامل امپدانس های خودی سه فاز a, b و c برای المان های قطری و امپدانس متقابل بین این فازها برای المان های غیرقطری نمایش داد [۱۷]. شکل زیر، نمایش یک خط انتقال سه فاز همراه با تزویج داخلی بین هادی فازها را نشان می دهد:

<sup>۱</sup> Power Delivery Components

<sup>۲</sup> Transformers

<sup>۳</sup> Regulators

<sup>۴</sup> Power Conversion Components



شکل (۲-۲) - مدل خط سه فاز در سیستم توزیع

با توجه به شکل (۲-۲) مدل ماتریس امپدانس برای خط سه فاز به صورت زیر می باشد:

$$Z^{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (۲-۱)$$

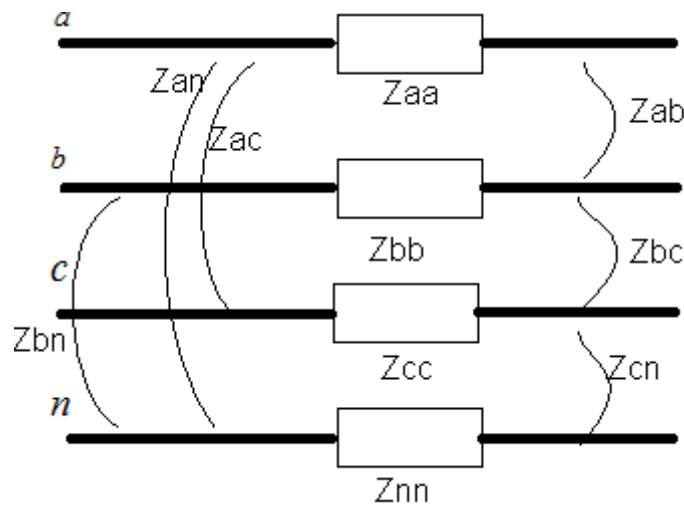
عناصر قطری ماتریس  $Z^{abc}$ ، امپدانس های خودی خطوط و عناصر غیرقطری امپدانس های متقابل خطوط می باشند. به عنوان مثال،  $Z_{aa}$  امپدانس خودی و  $Z_{ab}$  امپدانس متقابل می باشد. ماتریس بالا در فرم ادمیتانسی به صورت زیر خواهد بود:

$$Y^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (۲-۲)$$

که  $Y^{abc}$  ماتریس ادمیتانس برای خطوط سه فاز می باشد. مشابه با ماتریس امپدانس عناصر قطری ماتریس  $Y^{abc}$ ، ادمیتانس های خودی خطوط و عناصر غیرقطری ادمیتانس های متقابل خطوط می باشند. ماتریس امپدانس خطوط سه فاز بسیار شبیه ماتریس امپدانس خطوط تک فاز است، با این تفاوت که هر المان با یک ماتریس  $3 \times 3$  جایگزین شده است. در فیدرهای ولتاژ پایین توزیع به طور معمول خطوط



توزیع با ۴ سیم ساخته شده‌اند که سیم چهارم سیم خنثی<sup>۱</sup> می‌باشد. مشابه با هادی فاز، سیم خنثی نیز دارای امپدانس خودی و متقابل با دیگر فازها می‌باشد. بنابراین لازم است که در مدل ماتریس امپدانس نمایش داده شود. در هر بخش خط که سیم خنثی یا سیم زمین موجود نباشد، سطر و ستون معادل با آن سیم حذف خواهد شد. شکل زیر، نمایش یک خط انتقال سه فاز همراه با تزویج داخلی بین هادی فازها و سیم زمین را نشان می‌دهد [۱۸]:



شکل (۳-۲) - مدل خط سه فاز در سیستم توزیع همراه با سیم خنثی

رابطه زیر مدل ماتریس امپدانس شامل سیم خنثی را نشان می‌دهد [۱۸]:

$$Z^{abcn} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (۳-۱)$$

عناصر قطری ماتریس  $Z^{abcn}$ ، امپدانس‌های خودی و عناصر غیرقطری امپدانس‌های متقابل خطوط

می‌باشد. سطر و ستون چهارم در ماتریس  $4 \times 4$  مورد نظر مربوط به سیم خنثی می‌باشد، که می‌توان با

<sup>۱</sup> Neutral

تبدیل کرون<sup>۱</sup> به ماتریس ۳×۳ کاهش داد.

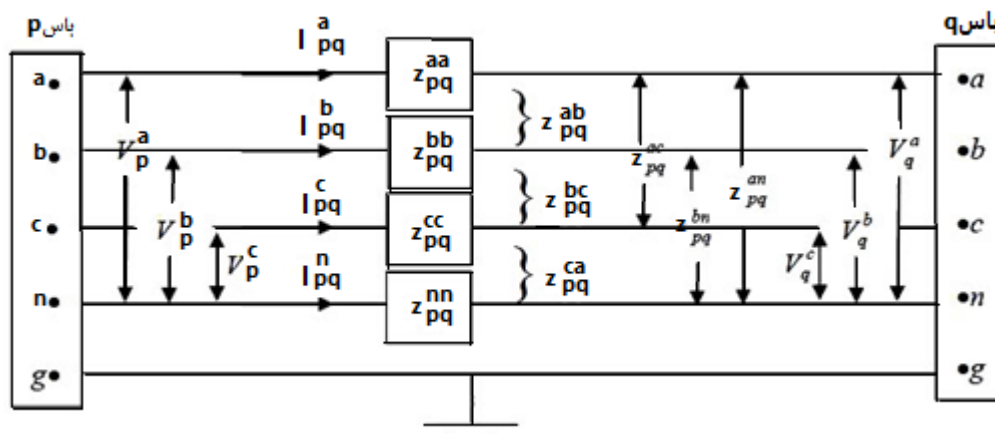
همچنین درحالتی که ساختار شبکه سه فاز - چهار سیمه باشد و نیاز به مدل خطوط ۴ سیمه داشته باشیم، برای تبدیل خطوط سه فاز، سطر و ستون مربوط به سیم چهارم صفر خواهد شد و مرتبه ماتریس به صورت رابطه زیر، به ۴×۴ افزایش خواهد یافت [۱۸].

$$Z^{abcn} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & 0 \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & 0 \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۴-۲)$$

المان های صفر در ماتریس  $Z^{abcn}$ ، مربوط به سیم چهارم و المان های غیر صفر امپدانس های خودی و متقابل فازهای a، b و c می باشند.

## ۱-۱-۲-۲ تبدیل کرون

شکل زیر نمایشی از یک خط انتقال سه فاز با چهار رسانا را نشان می دهد که می توان آن را توسط یک ماتریس امپدانس با المان های خودی و متقابل توصیف نمود. باس ابتدا و انتها را به ترتیب p و q نام گذاری می کنیم.



<sup>۱</sup> Kron 's Transformation

شکل (۴-۲) - مدل یک خط توزیع سه فاز - چهار سیمه [۱۹]

با توجه به شکل (۴-۲) روابط زیر حاصل می شود:

$$\begin{bmatrix} V_p^{abc} \\ V_p^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_q^{abc} \\ V_q^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{pq}^{abc} & Z_{pq}^n \\ Z_{pq}^n & Z_{pq}^{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pq}^{abc} \\ I_{pq}^n \end{bmatrix} \quad (۵-۲)$$

در رابطه بالا:

$V_p^{abc}$ : ولتاژ فازهای a, b و c در باس p

$V_p^n$ : ولتاژ سیم خنثی در باس p

$V_q^{abc}$ : ولتاژ فازهای a, b و c در باس q

$V_q^n$ : ولتاژ سیم خنثی در باس q

$Z_{pq}^{abc}$ : ماتریس امپدانس سه فاز a, b, c بین باس های p و q

$Z_{pq}^{nn}$ : امپدانس خودی سیم خنثی بین باس های p و q

$Z_{pq}^n$  و  $Z_{pq}^{nn}$ : امپدانس های متقابل سیم خنثی و خطوط فاز

$I_p^{abc}$ : جریان فازهای a, b و c، بین باس های p و q

$I_{pq}^n$ : جریان سیم خنثی، بین باس های p و q

اگر سیم خنثی زمین شود، ولتاژ  $V_q^n$  و  $V_p^n$  با هم برابر خواهند شد در این صورت در معادله بالا

خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} V_p^{abc} - V_q^{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pq}^{abc} & Z_{pq}^n \\ Z_{pq}^n & Z_{pq}^{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pq}^{abc} \\ I_{pq}^n \end{bmatrix} \quad (۶-۲)$$

$$Z_{pq}^{abc} I_{pq}^{abc} + Z_{pq}^n I_{pq}^n = V_p^{abc} - V_q^{abc} \quad (۷-۲)$$

$$Z_{pq}^n I_{pq}^{abc} + Z_{pq}^{nn} I_{pq}^n = 0 \quad (۸-۲)$$

$$I_{pq}^n = -Z_{pq}^{nn-1} Z_{pq}^{nT} I_{pq}^{abc} \quad (۹-۲)$$

از رابطه (۹-۲) جریان سیم خنثی به دست می آید، با جایگزینی رابطه (۹-۲) در (۷-۲) رابطه کاهش

کرون را خواهیم داشت. در این صورت ماتریس امپدانس به صورت زیر کاهش خواهد یافت [۱۹]:

$$V_p^{abc} = V_q^{abc} + Z_{pq}^{abc} I_{pq}^{abc} \quad (۱۰-۲)$$

$$\begin{aligned} Z_{pq}^{abc} &= Z_{pq}^{abc} - Z_{pq}^n Z_{pq}^{nn-1} Z_{pq}^{nT} \\ &= \begin{bmatrix} Z_{pq}^{aa} & Z_{pq}^{ab} & Z_{pq}^{ac} \\ Z_{pq}^{ba} & Z_{pq}^{bb} & Z_{pq}^{bc} \\ Z_{pq}^{ca} & Z_{pq}^{cb} & Z_{pq}^{cc} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (۱۱-۲)$$

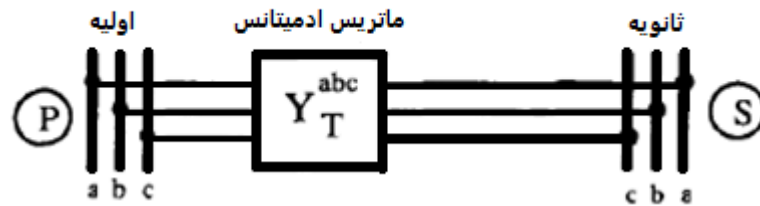
## ۲-۲-۲ ترانسفورماتورهای توزیع<sup>۱</sup>

ترانسفورماتورها یکی از اجزای مهم در مطالعات پخش بار می باشند. در نظر گرفتن عواملی چون نوع

اتصالات، تپ چنجرها<sup>۲</sup> و... نقش مهمی در حل مساله پخش بار بازی می کنند. ماتریس های ادمیتانس

( $Y_T^{abc}$ ) برای بدست آوردن مدل ترانسفورماتور مورد استفاده قرار می گیرند. شکل زیر مدل یک

ترانسفورماتور را نشان می دهد [۲۰]:



<sup>1</sup>Distriubution Transformer

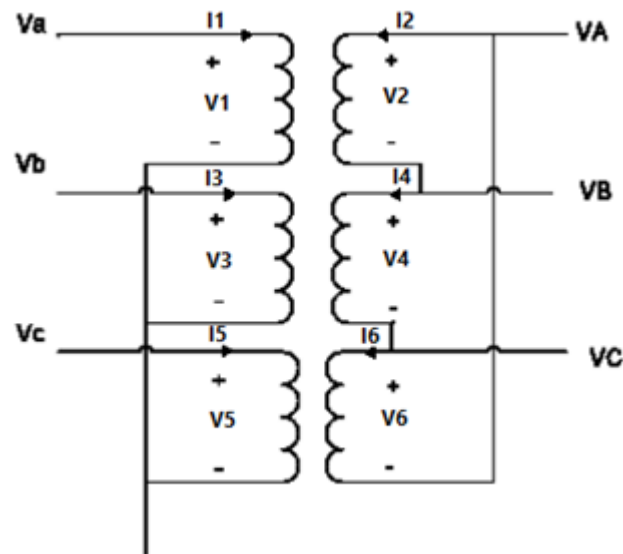
<sup>2</sup> Tap Changer

شکل (۵-۲) - مدل یک ترانسفورماتور [۲۰]

هدف از مدل سازی، دستیابی به ماتریس ادمیتانس گره برای توصیف ترانسفورماتور می باشد. شکل

(۶-۲) یک ترانسفورماتور ستاره - مثلث را نشان می دهد. در این شکل، سیم پیچ های ۱، ۲، ۳ سیم پیچ های

اولیه ترانسفورماتور و سیم پیچ های ۴، ۵، ۶ سیم پیچ های ثانویه می باشند.



شکل (۷-۲) - مدار معادل یک ترانسفورماتور ستاره - مثلث به همراه جریان ها و ولتاژها [۱۶]

رابطه بین ولتاژ و جریان با فرض اینکه ماتریس ادمیتانس اتصال کوتاه اولیه متقارن باشد، به صورت

زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_p & -Y_m & y'_m & y''_m & y'_m & y''_m \\ -Y_m & Y_s & y''_m & y'''_m & y''_m & y'''_m \\ y'_m & y''_m & Y_p & -Y_m & y'_m & y''_m \\ y''_m & y'''_m & -Y_m & Y_s & y''_m & y'''_m \\ y'_m & y''_m & y'_m & y''_m & Y_p & -Y_m \\ y''_m & y'''_m & y''_m & y'''_m & -Y_m & Y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (۱۲-۲)$$

که  $i_1$  تا  $i_6$  جریان شاخه های ترانسفورماتور و  $v_1$  تا  $v_6$  ولتاژ دو سر سیم پیچ های ترانسفورماتور می -

باشند.  $Y_p$  و  $Y_s$  به ترتیب ادمیتانس های خودی سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور می باشند و المان های

پریم دار ادمیتانس های متقابل بین سیم پیچ های اولیه و ثانویه می باشند. از طرف دیگر، ولتاژهای نقاط و ولتاژهای شاخه ها با ماتریس تلاقی زیر به هم ارتباط دارند:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad (۱۳-۲)$$

که  $v_1$  تا  $v_6$  ولتاژ دو سر سیم پیچ های ترانسفورماتور (ولتاژ شاخه ها) و  $v_a$  تا  $v_c$  ولتاژ نقاط در ترانسفورماتور می باشند.

به عبارت دیگر:

$$\bar{V}_{branch} = \bar{N} \bar{V}_{node} \quad (۱۴-۲)$$

ماتریس  $\bar{N}$  ماتریس تلاقی نامیده می شود. رابطه بین جریان شاخه ها و جریان گره های ترانسفورماتور نیز به صورت زیر می باشد:

$$\bar{I}_{branch} = \bar{N}^T \bar{I}_{node} \quad (۱۵-۲)$$

با استفاده از تبدیل کرون و ماتریس تلاقی  $\bar{N}$  رابطه زیر حاصل می گردد [۱۶]:

$$Y_{node} = \bar{N}^T \bar{Y}_{prim} \bar{N} \quad (۱۶-۲)$$

بنابراین، ماتریس ادمیتانس گره به صورت زیر خواهد بود:

$$Y_{node} = \begin{bmatrix} & y_s & y'_m & y''_m & & \\ & y'_m & y_s & y'_m & & \\ & y'_m & y'_m & y_s & & \\ - (y_m + y''_m) & 0 & (y_m + y''_m) & & & \\ (y_m + y''_m) & - (y_m + y''_m) & 0 & & & \\ 0 & (y_m + y''_m) & - (y_m + y''_m) & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} - (y_m + y''_m) & (y_m + y''_m) & 0 \\ 0 & - (y_m + y''_m) & - (y_m + y''_m) \\ - (y_m + y''_m) & 0 & - (y_m + y''_m) \\ 2(y_s - y''_m) & - (y_s - y''_m) & - (y_s - y''_m) \\ - (y_s - y''_m) & 2(y_s - y''_m) & - (y_s - y''_m) \\ - (y_s - y''_m) & - (y_s - y''_m) & 2(y_s - y''_m) \end{bmatrix}$$

(۱۷-۲)

ماتریس ادمیتانس گره در رابطه (۱۷-۲) را می توان به چهار بخش مطابق رابطه تقسیم کرد:

$$\bar{Y}_{node} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_p & \bar{Y}_{ps} \\ \bar{Y}_{sp} & \bar{Y}_s \end{bmatrix} \quad (۱۸-۲)$$

در رابطه بالا، هر عضو ماتریس، یک ماتریس  $3 \times 3$  می باشد، که با توجه به جدول (۱-۲)، به نوع

اتصال بستگی دارد. زیر ماتریس هایی که در جدول مشخص شده اند، به صورت زیر تعریف شده اند:

$$\bar{Y}_I = \begin{bmatrix} y_t & 0 & 0 \\ 0 & y_t & 0 \\ 0 & 0 & y_t \end{bmatrix} \quad \bar{Y}_{II} = \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix}$$

$$\bar{Y}_{III} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -y_t & y_t & 0 \\ 0 & -y_t & y_t \\ y_t & 0 & -y_t \end{bmatrix} \quad (۱۹-۲)$$

$y_t$  ادمیتانس نشتی پریونیت ترانسفورماتور در هر فاز می باشد [۱۶].

جدول (۱-۲) - زیر ماتریس های به کاررفته در ماتریس ادمیتانس ترانسفورماتور سه فاز برای اتصالات رایج [۱۶]

نوع اتصال		ادمیتانس خودی		ادمیتانس متقابل	
اولیه (p)	ثانویه (s)	$Y_p$	$Y_s$	$Y_{ps}$	$Y_{sp}$
$Y_g$	$Y_g$	$Y_I$	$Y_I$	$-Y_I$	$-Y_I$
$Y_g$	<b>Y</b>	$Y_{II}$	$Y_{II}$	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
$Y_g$	<b>D</b>	$Y_I$	$Y_{II}$	$Y_{III}$	$Y_{III}^t$
<b>Y</b>	$Y_g$	$Y_{II}$	$Y_{II}$	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
<b>Y</b>	<b>Y</b>	$Y_{II}$	$Y_{II}$	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
<b>Y</b>	<b>D</b>	$Y_{II}$	$Y_{II}$	$Y_{III}$	$Y_{III}^t$
<b>D</b>	$Y_g$	$Y_{II}$	$Y_I$	$Y_{III}^t$	$Y_{III}$

<b>D</b>	<b>Y</b>	$Y_{II}$	$Y_{II}$	$Y_{III}^t$	$Y_{III}$
<b>D</b>	<b>D</b>	$Y_{II}$	$Y_{II}$	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$

اگر نسبت تبدیل ترانسفورماتور به صورت  $\alpha: \beta$  باشد، که  $\alpha$  تعداد دور اولیه و  $\beta$  تعداد دور ثانویه است،

ماتریس ادمیتانس به صورت زیر اصلاح می گردد:

- کل آرایه های ماتریس ادمیتانس خودی اولیه تقسیم بر  $\alpha^2$

- کل آرایه های ماتریس ادمیتانس خودی ثانویه تقسیم بر  $\beta^2$

- کل آرایه های ماتریس ادمیتانس متقابل تقسیم بر  $\alpha\beta$

به طور مثال، برای یک ترانسفورماتور ستاره- ستاره که طرف اولیه و ثانویه آن زمین شده است، با

استفاده از جدول (۲-۱) داریم:

$$\bar{Y}^{abc} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_I & -\bar{Y}_I \\ -\bar{Y}_I & \bar{Y}_I \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} y_t & 0 & 0 & -y_t & 0 & 0 \\ 0 & y_t & 0 & 0 & -y_t & 0 \\ 0 & 0 & y_t & 0 & 0 & -y_t \\ \hline -y_t & 0 & 0 & y_t & 0 & 0 \\ 0 & -y_t & 0 & 0 & y_t & 0 \\ 0 & 0 & -y_t & 0 & 0 & y_t \end{array} \right] \quad (2-20)$$

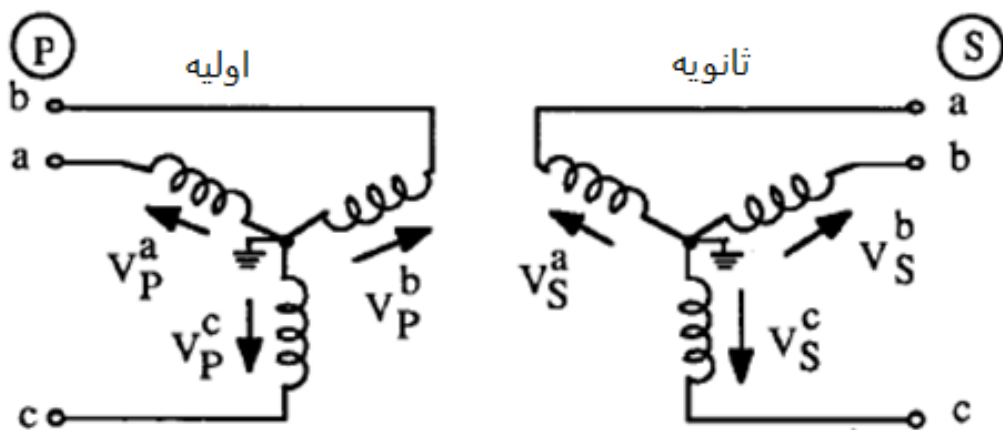
که  $\bar{Y}^{abc}$  ماتریس ادمیتانس ترانسفورماتور می باشد. اگر نسبت تبدیل های  $\alpha$  و  $\beta$  برابر با یک نباشد،

ماتریس ادمیتانس به صورت زیر اصلاح می گردد [۲۰]:



$$\bar{Y}^{abc} = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} \frac{y_t}{\alpha^2} & 0 & 0 & \frac{-y_t}{\alpha\beta} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{y_t}{\alpha^2} & 0 & 0 & \frac{-y_t}{\alpha\beta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{y_t}{\alpha^2} & 0 & 0 & \frac{-y_t}{\alpha\beta} \\ \hline \frac{-y_t}{\alpha\beta} & 0 & 0 & \frac{y_t}{\beta^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-y_t}{\alpha\beta} & 0 & 0 & \frac{y_t}{\beta^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-y_t}{\alpha\beta} & 0 & 0 & \frac{y_t}{\beta^2} \end{array} \right] = \left| \bar{Y}_{yg-yg} \right| \quad (21-2)$$

دیاگرام اتصال ترانسفورماتور ستاره - ستاره (زمین شده) سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل (۸-۲) - دیاگرام اتصال ترانسفورماتور ستاره- ستاره زمین شده سه فاز [۲۰]

اگر چه که مدل بالا تمام پارامترهای لازم برای مدل سازی ترانسفورماتور سه فاز را ارائه می کند اما در برخی محاسبات پخش بار، مدل دیگری نیز برای توصیف ترانسفورماتور به کار برده شده است که مدل توسعه داده شده نامیده می شود.

## ۱-۲-۲-۲ مدل توسعه داده شده برای ترانسفورماتور سه فاز

ایده اصلی این مدل بر اساس ارتباط بین جریان سیم پیچ ها و جریان ترمینال ها می باشد. برای شروع

مدل سازی به دو جزء اولیه نیاز خواهیم داشت:

۱- امپدانس اتصال کوتاه<sup>۱</sup> بین هر جفت سیم پیچ

۲- نسبت دور یا نسبت ولتاژ هر جفت سیم پیچ

برای دستیابی به این اطلاعات ماتریس امپدانس اتصال کوتاه  $Z_B$ ، توسط یکی از سیم پیچ ها به عنوان مرجع ساخته می شود. این عمل مشابه با به دست آوردن ماتریس اتصال کوتاه برای سیستم قدرت با باس بی نهایت به عنوان مرجع می باشد. امپدانس اتصال کوتاه بین سیم پیچ  $i$  و  $j$  که  $Z_{sc}$  نامیده می شود، به صورت درصدی از ولت آمپر بیس بیان می شود [۲۱]. برای مثال با تعیین سیم پیچ اول به عنوان مرجع، ماتریس امپدانس اتصال کوتاه برای یک ترانسفورماتور ستاره زمین شده سه فاز به صورت زیر می باشد:

$$Z_B = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

که عناصر قطری ماتریس  $Z_B$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$Z_{Bii} = Z_{SC(1,i+1)} \times Z_{base} \quad i = 1:m-1 \quad (2-23)$$

$m$  تعداد سیم پیچ ها می باشد.

گام بعدی تبدیل ماتریس  $Z_B$  به ماتریس ادمیتانس اولیه  $Y_1$  که اتصالات باس ها را در سیستم نشان می دهد. ماتریس  $B$ ، ماتریس تلاقی ست که دارای المان های ۱، ۰ و -۱ می باشد. این ماتریس جریان اتصال کوتاه را به جریان های سیم پیچ اولیه مرتبط می کند.

$$Y_1 = B Z_B^{-1} B^T \quad (2-24)$$

$N$  ماتریس تلاقی دیگری که عناصر آن معکوس تعداد دور سیم پیچ ها می باشد. این ماتریس جریان ها را در

<sup>1</sup> Short Circuit Impedance

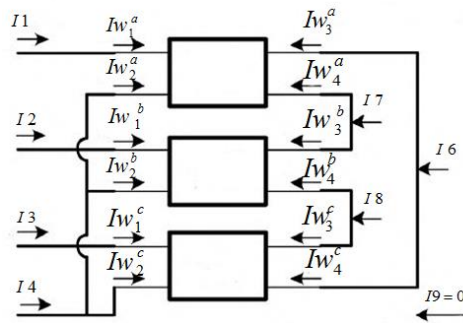
معادله  $Y_1$  به جریان های واقعی سیم پیچ متصل می کند و نتیجه ماتریس  $Y_W$  خواهد بود.

$$Y_W = N Y_1 N^T \quad (25-2)$$

ماتریس  $A$  ماتریس تلاقی دیگری است که دارای المان های ۱ و ۰ می باشد و جریان های سمت اولیه سیم پیچ را به جریان ترمینال ها مرتبط می سازد.

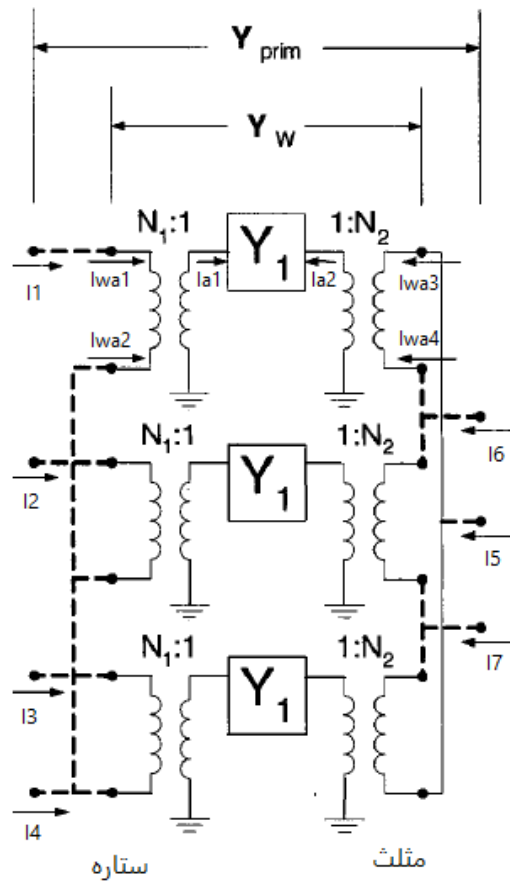
$$Y_{prim} = A N B Z_B^{-1} B^T N^T A^T \quad (26-2)$$

شکل زیر نمایشی از ارتباط بین جریان ترمینال ها و جریان سیم پیچ ها در ترانسفورماتور مثلث – ستاره را نشان می دهد [۲۱].



شکل (۹-۲) - ارتباط بین جریان سیم پیچ ها و ترمینال های ترانسفورماتور ستاره – مثلث [۲۲]

شماتیک مدل توسعه داده شده برای این ترانسفورماتور به صورت زیر می باشد:



شکل (۱۰-۲) - شماتیک مدل توسعه داده شده برای ترانسفورماتور ستاره- مثلث سه فاز [۲۲]

## ۲-۲-۳ رگولاتورهای ولتاژ

حفظ ولتاژ در یک سطح قابل قبول در سیستم های توزیع ولتاژ پایین، همواره مهم بوده است. رگولاتور ولتاژ یکی از تجهیزاتی است که سطح ولتاژ را در خط توزیع در مقدار از پیش تعیین شده ای ثابت نگه می دارد. تغییر ولتاژ در باس به دلیل نوساناتی است که بارها در توان نامی در سیستم ایجاد می کنند [۲۳]. رگولاتورها سه فاز به سه صورت به سیستم متصل می شوند:

۱- رگولاتورهای ستاره

۲- رگولاتورهای مثلث باز

<sup>۱</sup> Regulators

### ۳- رگولاتورهای مثلث بسته

رگولاتورها شامل اتوترانسفورماتورهایی هستند که می‌توانند ولتاژ را توسط نسبت تبدیل<sup>۱</sup> خود افزایش یا کاهش دهند. یک رگولاتور ولتاژ به کنترلرها و تجهیزاتی مجهز است که به‌طور خودکار تحت شرایط مختلف بار می‌توانند نسبت تبدیل خود را تغییر دهند. این تجهیزات به نوسانات ولتاژ حساس می‌باشند؛ به طوری که ولتاژ خروجی را در مقدار تعیین شده ثابت نگه می‌دارند. رگولاتورهای تک فاز به صورت عمده در سیستم‌های تک فاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سیستم‌های سه فاز توزیع، سه رگولاتور تک فاز می‌توانند به صورت ستاره زمین شده یا مثلث بسته، مطابق یک بانک رگولاتور سه فاز بسته شوند. روش دیگر اتصال این است که دو رگولاتور به صورت مثلث باز می‌باشد؛ در این مورد تنها دو فاز از سه فاز ولتاژ کنترل می‌شوند. رگولاتورهای ولتاژ همچنین در طول فیدر می‌توانند به صورت سری بسته شوند. حداکثر تعداد رگولاتورهایی که می‌توانند در روش ستاره متصل گردند توسط تلفات الکتریکی یا حد گرمایی خط محدود می‌شوند. در فیدرهای طولانی تنها دو رگولاتور و در برخی موارد تا سه رگولاتور می‌توانند متصل شوند. یک رگولاتور ولتاژ ستاره شامل مجموعه‌ای از رگولاتورهای تک فاز است که به صورت سری به سه فاز سیستم متصل می‌گردند. در رگولاتورهای مثلث باز، دو رگولاتور تک فاز به دو فاز سیستم متصل می‌گردد. ولتاژهای خروجی، ولتاژهای خط به خط می‌باشند. رگولاتور مثلث باز تنها قادر به تعدیل سازی دو سطح از سه سطح ولتاژ می‌باشد. در رگولاتور مثلث بسته، سه رگولاتور تک فاز به سیستم متصل می‌گردد و ولتاژ خروجی نیز ولتاژ خط به خط می‌باشد. در مواقعی که رگولاتورهای مثلث باز یا بسته مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولتاژهای خط به خط باید تبدیل به ولتاژهای خط به زمین گردند. حداکثر تعدیل سازی ولتاژهای رگولاتورهای مثلث بسته یا ستاره ۱۰٪ ولتاژ نامی می‌باشد. درحالی که برای رگولاتورهای مثلث باز این نسبت (مقدار) ۱۵٪ ولتاژ نامی می‌باشد. رگولاتورهای ولتاژ، قادر به کنترل ولتاژ

<sup>۱</sup> Tap

باسی که در آن قرار گرفته اند و باس‌های اطراف می‌باشند [۲۴].

## ۱-۳-۲-۲ مدل ریاضی رگولاتورهای ولتاژ

رگولاتورهای ولتاژ اتوترانسفورماتورهای<sup>۱</sup> با نسبت تبدیل دستی یا خودکار می‌باشند. تغییر ولتاژ توسط تغییر نسبت تبدیل به دست می‌آید و موقعیت تپ توسط مدار کنترل تعیین می‌شود. دو روش اتصال A و B بر اساس استاندارد ANSI/IEEE57-1986 وجود دارد که تفاوت این دو روش با توجه به جدول زیر در مقدار ولتاژ بهره‌برداری<sup>۲</sup> و ولتاژ شروع با سرویس<sup>۳</sup> می‌باشد [۲۴].

جدول (۲-۲) - رنج ولتاژ برای مبنای ۱۲۰ ولت بر اساس استاندارد ANSI C84.1 [۲۴]

	ولتاژ شروع		ولتاژ بهره‌برداری	
	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
نوع A	۱۱۴(-٪۵)	۱۲۶(+٪۵)	۱۱۰(-٪۸,۳)	۱۲۵(٪۴,۲)
نوع B	۱۱۰(-٪۸,۳)	۱۲۷(٪۵,۸)	۱۰۶(-٪۱۱,۷)	۱۲۷(٪۵,۸)

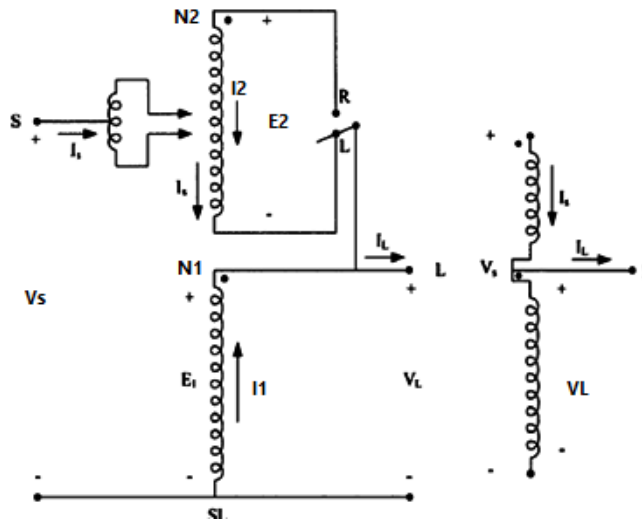
ولتاژ شروع، ولتاژ ابتدای فیدر یا پست و ولتاژ بهره‌برداری، ولتاژ ترمینال‌های خط یا ولتاژ مورد استفاده تجهیزات می‌باشد.

یک رگولاتور کاهنده از نوع B در شکل زیر نمایش داده شده است:

<sup>۱</sup> Autotransformers

<sup>۲</sup> Utilization Voltage

<sup>۳</sup> Service Voltage



شکل (۲-۱۱) - رگولاتور کاهنده ولتاژ نوع B [۲۴]

در این رگولاتور روابط زیر برقرار می باشد [۲۴]:

$$\frac{E_1}{n_1} = \frac{E_2}{n_2}$$

$$n_1 I_1 = n_2 I_2$$

$$V_s = E_1 + E_2, V_L = E_1$$

$$I_L = I_s + I_1, I_2 = I_s$$

$$E_2 = \frac{n_2}{n_1} E_1 = \frac{n_2}{n_1} V_L$$

$$I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2 = \frac{n_2}{n_1} I_s$$

$$V_s = (1 + \frac{n_2}{n_1}) V_L$$

$$I_L = (1 + \frac{n_2}{n_1}) I_s$$

$$V_s = a_R V_L$$

$$I_L = a_R I_s$$

$$a_R = 1 + \frac{n_2}{n_1}$$

(۲-۲۷)

در روابط بالا،  $n_1$  و  $n_2$  به ترتیب تعداد دور سیم پیچ اولیه و ثانویه می باشند که با ولتاژهای  $E_1$  و

$E_2$  در دو سر سیم پیچ اولیه متناسب اند.  $V_s$  ولتاژ منبع و  $V_L$  ولتاژ بار یا ثانویه می باشد. همچنین  $I_s$  جریان

منبع یا اولیه و  $I_L$  ولتاژ بار یا ثانویه می باشد.  $a_R$  ضریب تأثیر سیم پیچ می باشد. هر نسبت تبدیل می تواند

مقدار ولتاژ را ۵/۸٪ یا ۰/۰۶۲۵٪ پریونیت تغییر دهد. معادله ضریب تأثیر سیم پیچ را می توان به صورت

تابعی از نسبت تبدیل ترانسفورماتور به صورت زیر نوشت [۲۴]:

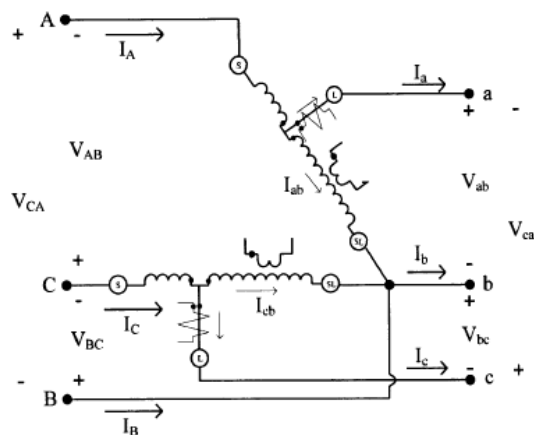
$$a_R = 1 \pm 0.00625 \text{Tap} \quad (2-28)$$

در معادله بالا ضریب مثبت و منفی افزایش و یا کاهش بودن رگولاتور را مشخص می کند [۲۴].

جدول (۳-۲): علامت تعیین عملکرد رگولاتور در نوع A و B [۲۴]

	نوع A	نوع B
افزاینده	+	-
کاهنده	-	+

رگولاتورهای سه فاز به صورت مکانیکی کوپل شده اند و نسبت تبدیل سیم پیچ ها در یک زمان یکسان تغییر می کنند. این رگولاتورهای فقط به صورت ستاره یا مثلث بسته و باز ساخته می شوند. شکل زیر یک رگولاتور مثلث باز را نشان می دهد [۲۴]:



شکل (۲-۱۲) - رگولاتور مثلث باز [۲۴]

در رگولاتورهای مثلث باز با توجه به شکل (۲-۱۲)، سه نوع اتصال وجود دارد:

- ۱- یک رگولاتور تک فاز بین فازهای AB و یک رگولاتور تک فاز بین فازهای CB
- ۲- یک رگولاتور تک فاز بین فازهای BC و یک رگولاتور تک فاز بین فازهای AC



### ۳- یک رگولاتور تک فاز بین فازهای CA و یک رگولاتور تک فاز بین فازهای BA

در هر یک از اتصال‌های بالا ولتاژ محاسبه شده ولتاژ خط به خط و جریان محاسبه شده جریان خط می‌باشد. چندین نکته در اتصال رگولاتورها وجود دارد که در هنگام نصب باید به آن‌ها توجه نمود:

۱- مقدار ولتاژ باسی که رگولاتور در آن نصب شده است نباید از مقدار حداکثر و حداقل ولتاژ شبکه تجاوز کند.

۲- اگر در باس دارای رگولاتور بار وجود نداشته باشد، ممکن است ولتاژ از حد قابل قبول فراتر شود، در این مواقع نیاز است که مقدار ولتاژ را در حد تعریف شده ثابت نگه داشته شود [۲۴].

### ۲-۲-۴ مدل سازی بارها در سیستم توزیع

اگرچه که برای بسیاری از تجهیزات مثل ترانسفورماتورها، خطوط و ... مدل دقیقی وجود دارد اما برای بارهای الکتریکی مدلی که بتواند رفتار آن‌ها را به صورت دقیق توصیف کند، وجود ندارد. مدل سازی دقیق بار می‌تواند از عملکرد نادرست سیستم جلوگیری کند. بنابراین حفظ تعادل بین بارهای سیستم و توان خروجی امری ضروری می‌باشد [۲۵]. بارها در سیستم‌های قدرت به دو دسته استاتیکی<sup>۱</sup> و دینامیکی<sup>۲</sup> تقسیم می‌گردند که برای محاسبات پخش بار مدل استاتیکی آن را در نظر می‌گیرند. در مدل استاتیکی رفتار گذرای<sup>۳</sup> بارها در نظر گرفته نمی‌شود و به صورت تابعی غیر وابسته<sup>۴</sup> به زمان تعریف می‌شوند [۲۶].

### ۲-۲-۴-۱ انواع مدل بار

مدل بار را می‌توان به صورت نمایش ریاضی از روابط بین ولتاژ و توان (راکتیو و اکتیو) یا جریان بار

---

<sup>۱</sup> Static

<sup>۲</sup> Dynamic

<sup>۳</sup> Transient

<sup>۴</sup> Independent

بیان نمود. منظور از مدل بار می تواند معادلات آن یا معادلات با مقادیر مشخص از پارامترها باشد. با استفاده از این معادلات، می توان توان یا جریان بار را محاسبه کرد.

دو دسته مرسوم از مدل بارهای استاتیکی استفاده شده در محاسبات پخش بار عبارت اند از:

الف) مدل نمایی<sup>۱</sup>

ب) مدل چندجمله ای<sup>۲</sup>

الف) مدل نمایی

در مدل نمایی توان اکتیو و راکتیو به صورت نماهای مختلفی از ولتاژ تغییر می کنند که به صورت روابط زیر بیان می شوند:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (۴۲-۲)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (۴۳-۲)$$

P و Q توان اکتیو و راکتیو بار، V دامنه ولتاژ ترمینال و زیرنویس صفر به معنای مقدار نامی ولتاژ می باشد. مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب جزء نمایی توان اکتیو و راکتیو می باشند که با اندازه گیری تعیین می گردند و با توجه به نوع بار متفاوت می باشند [۲۶].

ب) مدل چندجمله ای

مدل چندجمله ای به عنوان مدل ZIP شناخته می شود که با رابطه زیر نمایش داده می شود:

<sup>۱</sup> Exponential

<sup>۲</sup> Polynomial

$$P=P_0[p_1(\bar{V})^2 + p_2(\bar{V}) + p_3] \quad (29-2)$$

$$Q=Q_0[q_1(\bar{V})^2 + q_2(\bar{V}) + q_3] \quad (30-2)$$

ثوابت  $p$  و  $q$  سهم هر جزء را در مقدار ولتاژ نشان می‌دهند. در این رابطه  $P$  توان اکتیو و  $Q$  توان راکتیو،  $\bar{V}$  برابر  $V/V_0$  می‌باشد که  $V$  ولتاژ و زیر نویس صفر اشاره به مقدار نامی دارد. قیود رابطه بالا به صورت زیر می‌باشد [27].

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1, \quad q_1 + q_2 + q_3 = 1 \quad (31-2)$$

وابستگی به ولتاژ این بارها به سه قسمت تقسیم می‌شود:

۱-  $Z$ ، با ضریب  $V^2$ ، مربوط به بخش امپدانس ثابت<sup>۱</sup>

$$P \approx V^2 \Rightarrow \frac{P}{V^2} = \text{Cons} \Rightarrow \frac{I}{V} = \text{Cons} \quad (32-2)$$

$$Q \approx V^2 \Rightarrow \frac{Q}{V^2} = \text{Cons} \Rightarrow \frac{I}{V} = \text{Cons} \quad (33-2)$$

۲-  $I$  با ضریب  $V$ ، مربوط به بخش جریان ثابت<sup>۲</sup>

$$P \approx V \rightarrow \frac{P}{V} = \text{cons} \rightarrow I = \text{cons} \quad (34-2)$$

$$Q \approx V \rightarrow \frac{Q}{V} = \text{cons} \rightarrow I = \text{cons} \quad (35-2)$$

۳-  $P$  بدون وابستگی به  $V$ ، به عنوان بخش توان ثابت<sup>۳</sup> [26]

$$P = P_0 \quad (36-2)$$

$$Q = Q_0 \quad (37-2)$$

به طور معمول بارهایی که به سیستم توزیع متصل می‌گردند و برای الگوریتم‌های پخش بار استفاده می‌گردند، از نوع توان ثابت و یا چند جمله‌ای می‌باشند. اما در واقع اکثر بارها وابسته با ولتاژ می‌باشند. در

<sup>1</sup> Constant Impedance

<sup>2</sup> Constant Current

<sup>3</sup> Constant Power

نظر گرفتن مدل بار وابسته با ولتاژ، نتایج پخش بار بهتر و واقعی تری را ارائه می کند. اگر قسمت ثابت در روابط مربوط به مدل چندجمله ای یا قسمت توان ثابت حذف گردد، می توان روابط مربوط به بار وابسته به ولتاژ را به صورت زیر نوشت [۲۸]:

$$\frac{P(V)}{P_0} = C_Z \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + C_I \left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (38-2)$$

$$\frac{Q(V)}{Q_0} = C'_Z \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + C'_I \left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (39-2)$$

$$C_Z + C_I = 1, C'_Z + C'_I = 1 \quad (40-2)$$

در این حالت تنها یک متغیر وابسته وجود دارد. برای یافتن ثوابت  $C_Z, C_I, C'_Z$  و  $C'_I$  یک تابع بهینه سازی درجه دوم محدب استفاده می شود. تابع هدف حداقل اختلاف داده های تقریبی و داده های اندازه گیری شده برای توان اکتیو به صورت زیر می باشد [۲۸].

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^{Nv} [C_Z V_i^2 + C_I V_i - P(V_i)]^2 \quad (41-2)$$

Subject to

$$C_I + C_Z = 1 \quad (42-2)$$

$Nv$  تعداد نقاط انتخاب شد برای محدوده ولتاژ و  $(V_i, P(V_i))$  مقادیر اندازه گیری شده (ولتاژ، توان اکتیو) می باشد.  $C_Z$  و  $C_I$  متغیرهای نامشخص می باشند که باید محاسبه گردند. برای توان راکتیو نیز مشابه روابط بالا نوشته می شود. در بارهای وابسته به ولتاژ، در هر مرحله از محاسبه پخش بار مقدار توان اکتیو و راکتیو بار می بایست به روز گردد [۲۸].

## ۲-۴-۲-۲ نحوه اتصال بار به شبکه توزیع

بارهای شبکه توزیع می توانند به صورت متراکم<sup>۱</sup> یا توزیع شده و یا هر دو باشند. از تکنیک تزریق

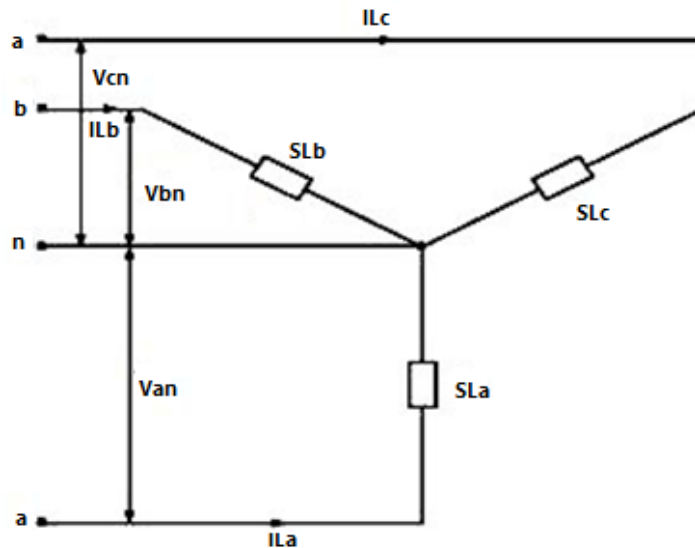
<sup>۱</sup> Spot

جریان<sup>۱</sup> در هر فاز می توان برای نمایش بارهای متراکم استفاده نمود [۲۹]. بارهای سه فاز به صورت ستاره و یا مثلث متصل می گردند. برای محاسبه جریان در این بارها نیاز به ولتاژ خط به خنثی است. همچنین بارهای تک فاز در سیستم نیز می توانند بین خط به خنثی و خط به خط متصل گردند.

### - بار با اتصال ستاره

شکل زیر مدل یک بار نامتعادل سه فاز را که به صورت ستاره متصل گردیده است را نشان می دهد.

در این مدل، ولتاژ خط به خنثی در هر مرحله تغییر می کند.



شکل (۲-۱۳) - بار با اتصال ستاره [۲۹]

جریان تزریق شده به  $k$  امین باس برای بارهایی که به صورت ستاره متصل گردیده اند و یا بارهای تک

فازی که بین خط و سیم خنثی متصل گردیده اند، به صورت زیر بیان می شود [۲۹]:

$$\begin{bmatrix} I_a^k \\ I_b^k \\ I_c^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{S_{La}^k}{V_a^k} \right)^* \\ \left( \frac{S_{Lb}^k}{V_b^k} \right)^* \\ \left( \frac{S_{Lc}^k}{V_c^k} \right)^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{La}^k - jQ_{La}^k}{V_a^{k*}} \\ \frac{P_{Lb}^k - jQ_{Lb}^k}{V_b^{k*}} \\ \frac{P_{Lc}^k - jQ_{Lc}^k}{V_c^{k*}} \end{bmatrix} \quad (۴۳-۲)$$

در رابطه بالا:

$S_{La}^k, S_{Lb}^k, S_{Lc}^k$ : توان های ظاهری بار در k امین باس در فازهای a, b و c

$P_{La}^k, P_{Lb}^k, P_{Lc}^k$  و  $Q_{La}^k, Q_{Lb}^k, Q_{Lc}^k$ : به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بار در k امین باس در فازهای a, b و c

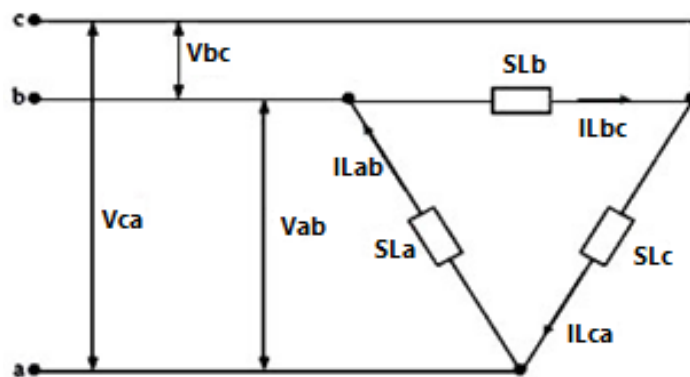
$V_a^k, V_b^k, V_c^k$ : ولتاژ فازهای a, b و c در باس K

$I_a^k, I_b^k, I_c^k$ : جریان فازهای a, b و c در باس K

این بارها می توانند به صورت توان ثابت، امپدانس ثابت، جریان ثابت و یا ترکیبی از این مدل ها باشند.

### – بار با اتصال مثلث

شکل زیر بار نامتعادلی را که به صورت مثلث متصل گردیده است و تزریقات جریان در k امین باس برای بارهای سه فاز که به صورت مثلث و تک فاز که بین دو خط متصل گردیده اند را نشان می دهد. مشابه با بار با اتصال ستاره، در این نوع اتصال نیز بارها می توانند به صورت توان ثابت، امپدانس ثابت، جریان ثابت و یا ترکیبی از این مدل ها باشند [۲۹].



شکل (۲-۱۴) - بار با اتصال مثلث [۲۹]

$$\begin{bmatrix} I_a^k \\ I_b^k \\ I_c^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{Lab}^k - jQ_{Lab}^k}{V_a^{k*} - V_b^{k*}} - \frac{P_{Lca}^k - jQ_{Lca}^k}{V_c^{k*} - V_a^{k*}} \\ \frac{P_{Lbc}^k - jQ_{Lbc}^k}{V_b^{k*} - V_c^{k*}} - \frac{P_{Lab}^k - jQ_{Lab}^k}{V_a^{k*} - V_b^{k*}} \\ \frac{P_{Lca}^k - jQ_{Lca}^k}{V_c^{k*} - V_a^{k*}} - \frac{P_{Lbc}^k - jQ_{Lbc}^k}{V_b^{k*} - V_c^{k*}} \end{bmatrix} \quad (۲-۴۴)$$

$P_{Lc}^k, P_{Lb}^k, P_{La}^k$ : توان اکتیو بار در kامین باس در فازهای a, b و c

$Q_{Lc}^k, Q_{Lb}^k, Q_{La}^k$ : توان راکتیو بار در kامین باس در فازهای a, b و c

$V_c^k, V_b^k, V_a^k$ : ولتاژ فازهای a, b و c در باس kام

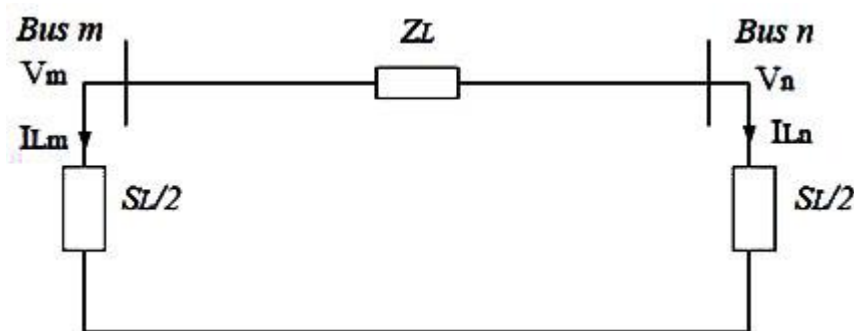
$I_c^k, I_b^k, I_a^k$ : جریان فازهای a, b و c در باس kام

### - بارهای توزیع شده<sup>۱</sup>

به‌طور مرسوم فیدرهای توزیع توسط ترانسفورماتورها که در طول خط قرار داده شده اند، بارها را

<sup>۱</sup> Distributed Load

تغذیه می کنند. بارهای توزیع شده در طول خط قرار دارند. اگر بارها را با توجه به تعداد زیاد آنها یکی یکی در نظر گرفته شود، تعداد گره ها افزایش می یابد. برای کاهش معادلات پخش بار، می توان بارها را به باس های دو طرف خط ( $m$  و  $n$ ) انتقال داد. بعد از انتقال بار، بارهای توزیع شده را می توان به صورت زیر نشان داد [۳۰]:



شکل (۲-۱۵) - بارهای توزیع شده پس از انتقال [۳۰]

$Z_L$  امپدانس خط و  $S_L$  توان ظاهری بار را نشان می دهد.  $V_m$  و  $V_n$  به ترتیب ولتاژ باس های  $m$  و  $n$  می

باشد.

## ۲-۲-۵ مدل تولیدات پراکنده<sup>۱</sup>

منابع تولید پراکنده به صورت مستقیم به شبکه توزیع متصل می گردند. در سالهای اخیر به دلیل مسائل اقتصادی و زیست محیطی علاقه به استفاده از این منابع افزایش یافته است. توسعه این منابع باعث افزایش امنیت در منابع انرژی، کاهش تلفات و هزینه های بهره برداری شده است [۳۱]. در صورتی که این منابع در شرایط نامناسبی اداره شوند، ممکن است باعث تأثیر بر سیستم توزیع شوند. برای مثال تزریق توان واحدهای تولید پراکنده ممکن است باعث افزایش تلفات گردد [۳۲]. از طرف دیگر، حضور منابع تولید پراکنده باعث آزاد شدن ظرفیت خطوط می شوند اما در بعضی نقاط خط ممکن است دارای اضافه

<sup>۱</sup> Distributed Generation



ولتاژ نیز گردد. با عملکرد این منابع به صورت باس کنترل ولتاژ<sup>۱</sup> می توان ولتاژ باس ها را در مقدار تعیین شده ای تنظیم نمود [۳۰]. برای دستیابی به شرایط عملکردی مناسب، واحدهای تولید پراکنده نیاز به کنترل مناسب و سیستم های مدیریت نیاز به مدل برنامه ریزی مناسب دارند [۳۳]. چند نمونه منابع تولید پراکنده که می توان به آن ها اشاره نمود به صورت زیر می باشند:

- توربین های بادی<sup>۲</sup>
- سلول های سوختی<sup>۳</sup>
- سیستم های فتوولتائیک<sup>۴</sup>
- موتورهای احتراق داخلی<sup>۵</sup>
- توربین های گازی<sup>۶</sup>
- میکروتوربین ها<sup>۷</sup> [۱۸].

## ۱-۵-۲-۲ مدل سازی منابع تولید پراکنده برای مطالعات پخش بار

به طور کلی منابع تولید پراکنده، به دو نوع PQ و PV مدل می شوند. تعیین مدل مناسب برای این منابع نیاز به شناخت عملکرد آن ها در سیستم هست.

### - واحدهای تولید پراکنده PQ

واحدهای تولید پراکنده PQ، دارای توان ثابت می باشند و در الگوریتم پخش بار به صورت یک بار منفی مدل می گردند که توان اکتیو و راکتیو آن برابر است با:

---

<sup>۱</sup> PV

<sup>۲</sup> Wind Turbin

<sup>۳</sup> Fuel Cell

<sup>۴</sup> Photovoltaic Systems

<sup>۵</sup> Internal Combustion Engines

<sup>۶</sup> Gas Turbine

<sup>۷</sup> Microturbines

$$\begin{cases} P = -P_{DG} \\ Q = -Q_{DG} \end{cases} \quad (۴۵-۲)$$

که  $P_{DG}$  و  $Q_{DG}$  توان اکتیو و راکتیو منبع تولید پراکنده می باشد [۱۸].

### – واحدهای تولید پراکنده PV

منابع تولید پراکنده PV یا کنترل ولتاژ، دارای توان و ولتاژ ثابت و مشخص می باشند. برای وارد کردن واحدهای تولید پراکنده که به صورت باس PV کنترل می شوند نیاز به مراحل اضافه تری در حل پخش بار می باشد. روش های مختلفی برای مدل سازی منابع تولید پراکنده کنترل ولتاژ در پخش بار وجود دارد. یکی از این روش ها تحلیل ماتریس حساسیت نامیده می شود که نسبت به روش های دیگر دارای محاسبات بیش تری می باشد اما نتایج دقیق تری در شبیه سازی ها ارائه خواهد داد [۳۴ – ۳۵].

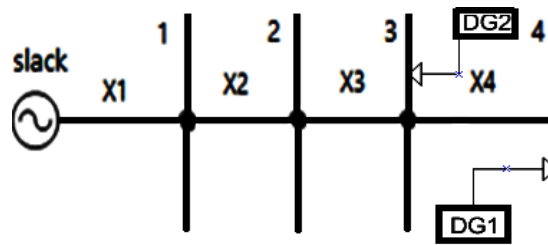
#### ۲-۵-۲-۲ نحوه محاسبه ماتریس حساسیت<sup>۱</sup>

شکل زیر یک فیدر ساده با ۴ باس را نشان می دهد. با فرض اینکه دو منبع تولید پراکنده PV به باس ۳ و ۴ متصل گردد، آنگاه برای محاسبه ماتریس حساسیت به صورت زیر عمل می کنیم:

ابعاد ماتریس حساسیت  $n_{pv} \times n_{pv}$  می باشد، که  $n_{pv}$  تعداد گره های PV می باشد که ولتاژ آن ها به مقدار تعیین شده همگرا نشده است. بنابراین در این مثال ماتریس حساسیت  $۲ \times ۲$  خواهد بود [۳۷].

- عناصر قطری X: مجموع راکتانس شاخه های بین هر گره PV همگرا نشده و گره منبع
- عناصر غیر قطری X: مجموع راکتانس شاخه های مشترک بین دو گره PV همگرا نشده و گره منبع

<sup>۱</sup> Sensitivity Matrix



شکل (۱۶-۲) - یک فیدر ساده توزیع

در این صورت خواهیم داشت:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix}$$

$$x_{11} = X_1 + X_2 + X_3$$

$$x_{22} = X_1 + X_2 + X_3 + X_4$$

$$x_{12} = x_{21} = X_1 + X_2 + X_3 \quad (۴۶-۲)$$

که  $X_1$  تا  $X_4$  راکتانس خطوط فیدر و  $x_{11}$ ،  $x_{22}$ ،  $x_{12}$  و  $x_{21}$  عناصر ماتریس حساسیت  $X$  می باشند.

### ۳-۵-۲ گام های مورد نیاز برای مدل سازی باس کنترل ولتاژ در الگوریتم پخش بار

۱- اختلاف ولتاژ باس کنترل ولتاژ را از مقدار تعیین شده محاسبه می گردد.

$$\Delta V^i = |V_{sp}^i| - |V_{cal}^i| \leq 0 \quad , \quad (۴۷-۲)$$

$$i = 1:n_{PV}$$

$\Delta V^i$  = عدم تطابق ولتاژ در گره  $i$

$n_{PV}$  = تعداد گره های PV همگرا نشده

$V_{sp}^i$  = مقدار تعیین شده دامنه ولتاژ باس  $i$

$V_{cal}^i$  = مقدار محاسبه شده برای دامنه ولتاژ در باس  $i$

۲- اگر عدم تطابق ولتاژ در محدوده معین باشد، ولتاژ گره PV به مقدار تعیین شده همگرا شده است. در غیر این صورت، با جبران سازی توان راکتیو تولید شده توسط ژنراتور این باس، ولتاژ در مقدار تعیین شده ثابت می گردد.

میزان توان راکتیو لازم برای جبران سازی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta V = X \cdot \Delta Q \quad (48-2)$$

$X$  = ماتریس حساسیت راکتانس گره PV

$\Delta Q$  = بردار تزریق توان راکتیو و سائز آن  $n_{PV} \times 1$  می باشد.

$\Delta V$  = بردار عدم تطابق ولتاژ گره های PV و سائز آن  $n_{PV} \times 1$  می باشد.

۳- اگر  $\Delta V > 0$  باشد، ژنراتور باید برای ثابت نمودن ولتاژ در مقدار تعیین شده باید توان راکتیو تولید کند. اگر  $\Delta V < 0$  باشد، ژنراتور باید برای ثابت نمودن ولتاژ در مقدار تعیین شده باید توان راکتیو جذب کند، بنابراین رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$Q_{new-cal}^i = Q_{old}^i \pm |\Delta Q^i| \quad i=1:n_{PV} \quad (49-2)$$

$Q_{new-cal}^i$  = مقدار جدید محاسبه شده برای تزریق ژنراتور باس  $i$

$Q_{old}^i$  = مقدار محاسبه شده تولید توان راکتیو ژنراتور باس  $i$  در تکرار قبلی

۴- در بعضی از شین های کنترل ولتاژ محدودیت تزریق و جذب توان راکتیو وجود دارد. بنابراین پس از تعیین مقدار  $Q$  می بایست شرط زیر بررسی گردد:

$$Q_{G,min}^i \leq Q_{new-cal}^i \leq Q_{G,max}^i \quad (50-2)$$

$Q_{G,max}^i, Q_{G,min}^i$  = حدود پایین و بالای تولید توان راکتیو ژنراتور باس  $i$

اگر رابطه (۲-۵۰) برقرار نباشد، مقدار  $Q$  تولیدی ژنراتور در حدی که  $Q_{new-cal}^i$  آن‌ها نقض نموده تنظیم و در غیر این صورت در  $Q_{new-cal}^i$  تنظیم می‌شود. مسئله پخش بار تا رسیدن به همگرایی مطلوب تکرار می‌شود [۳۷].



## فصل سوم

پنخ‌بار در سیستم‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و انواع مدل‌بار

### ۳-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا مقایسه کوتاهی بین روش های پیشنهادی پخش بار در سیستم توزیع صورت گرفته است. سپس نحوه انجام الگوریتم پسر-پیشرو به عنوان روشی مؤثر در پخش بار سیستم های توزیع توضیح داده می شود. در ادامه، نحوه عملکرد این الگوریتم در شرایط مختلف بررسی می گردد و در هر مرحله برای درک بهتر روند شمار الگوریتم رسم می گردد.

### ۳-۲ مقایسه روش های تحلیل پخش بار در سیستم های توزیع

افزایش تقاضای توان و افزایش ولتاژ خط و ... مسائل چالش برانگیزی برای مهندسين برق قدرت شده است. همچنین ادغام منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع به سرعت در حال افزایش می باشد که نقش مؤثری در مدیریت توان راکتیو در سیستم بازی می کند. منابع تولید پراکنده ممکن است تأثیر مهمی بر پروفیل ولتاژ داشته باشند [۳۸]. بنابراین تعیین رفتار سیستم امری ضروری می باشد. تحلیل پخش بار از جمله راه حل هایی می باشد که ممکن است تک فاز یا سه فاز انجام گیرد.

روش نیوتن-رافسون<sup>۱</sup> و تعدیل یافته های آن، روش های پخش بار سریع<sup>۲</sup> در بسیاری از موارد برای تحلیل پخش بار سیستم های توزیع به کار برده شدند، اما این روش ها در سیستم های توزیع بزرگ زیاد مؤثر واقع نشدند. از طرف دیگر در روش نیوتن-رافسون در هر مرحله نیاز به برزورسانی ماتریس ژاکوبین<sup>۳</sup> می باشد که از لحاظ محاسباتی مشکل خواهد بود. همچنین روش های جبران سازی برای شبکه های حلقوی ضعیف گسترش یافتند، این روش با انتخاب نقطه شکست مناسب شبکه حلقوی را به شعاعی تبدیل می کند و جریان از دو سمت به شبکه تزریق می گردد [۳۹]. جدول زیر یک مقایسه ای از روش های

---

<sup>۱</sup> Newton-Raphson

<sup>۲</sup> Fast Load Flow

<sup>۳</sup> Jacobin



مورد استفاده در پخش بار شبکه های توزیع ارائه می دهد:

جدول (۱-۳) - دسته بندی و مقایسه روش های مورد استفاده در پخش بار سیستم های توزیع [۱۷]، [۶]

مزایا	معایب	پخش بار در سیستم توزیع شعاعی
۱- میزان همگرایی بالایی در فیدرهای دارد.	۲- در سیستم های بزرگ همگرایی مطلوب را ندارد. ۳- نیاز به ماتریس ژاکوبین ویژه دارد.	نیوتن-رافسون
۱- برای اجرا کردن ساده می باشد.	۱- در شبکه های پیچیده، نیاز به محاسبات زیاد دارد.	الگوریتم ژنتیک <sup>۱</sup> (GA)
۱- سریع تر از GA <sup>۳</sup> می باشد.	۲- دارای همگرایی آهسته می باشد. ۳- در شبکه پیچیده ناموفق است.	بهینه سازی اجتماع ذرات PSO <sup>۲</sup>
۱- حداقل زمان محاسبات را دارد.	۱- نیاز به روش های دیگر در تحلیل خود دارد.	شبکه عصبی
۱- به ماتریس ژاکوبین نیاز ندارد. ۲- دارای حجم محاسبات کم می باشد.	۱- برای شبکه های حلقوی ضعیف ناموفق می باشد.	روش پیشرو- پسرو

### ۳-۳ الگوریتم روش پیشرو- پیشرو

در حال حاضر روش مؤثری که در تحلیل پخش بار سیستم های توزیع شناخته شده است، روش

پسرو- پیشرو می باشد. در روش پسرو- پیشرو در حضور بارهای جریان ثابت تنها با یک تکرار به همگرایی

<sup>۱</sup>Genetic Algorithm

<sup>۲</sup> Particle Swarm Optimization

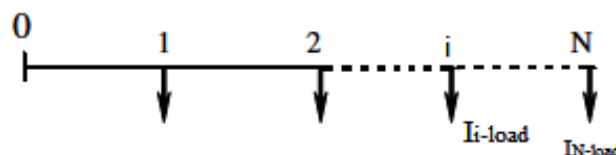
لازم خواهیم رسید اما در حضور بارهای دیگر (توان ثابت، امپدانس ثابت و...) به تعداد تکرار بیشتری نیاز می باشد. روش پسرو- پیشرو از دو مرحله تشکیل شده است:

- مرحله جاروب پسرو<sup>۱</sup>

- مرحله جاروب پیشرو<sup>۲</sup>

### ۳-۳-۱ مرحله جاروب پسرو

در مرحله اول یا جاروب پسرو ابتدا یک باس به عنوان باس مرجع با ولتاژ و زاویه مشخص (به طور معمول  $1 < 0$ ) انتخاب می گردد. با فرض اینکه باس های دیگر مقدار دامنه ولتاژی برابر با دامنه باس مرجع دارند، مقدار جریان هر باس را محاسبه می گردد. برای محاسبه جریان، از روشی که جریان تجمعی نامیده می شود، استفاده می شود. در واقع جریان تجمعی مسیر هر باس را تا باس مرجع را مشخص می کند. در روش جریان تجمعی، باس ها به دو دسته تقسیم می گردند: باس های انتهایی و باس های میانی. جریان در باس های انتهایی تنها برابر است با مقدار جریان بار متصل به آنها، اما مقدار جریان در باس های میانی، مساوی است با مجموع مقدار جریان کشیده شده توسط بار متصل به باس میانی و جریان باس های بعد از این باس تا باس انتهایی می باشد. برای مثال در فیدر ساده زیر که دارای  $N$  باس می باشد،  $N$  باس انتهایی و  $i$  باس میانی می باشد.



شکل (۳-۱) - شماتیک یک فیدر ساده توزیع

<sup>۱</sup> Backward

<sup>۲</sup> Forward

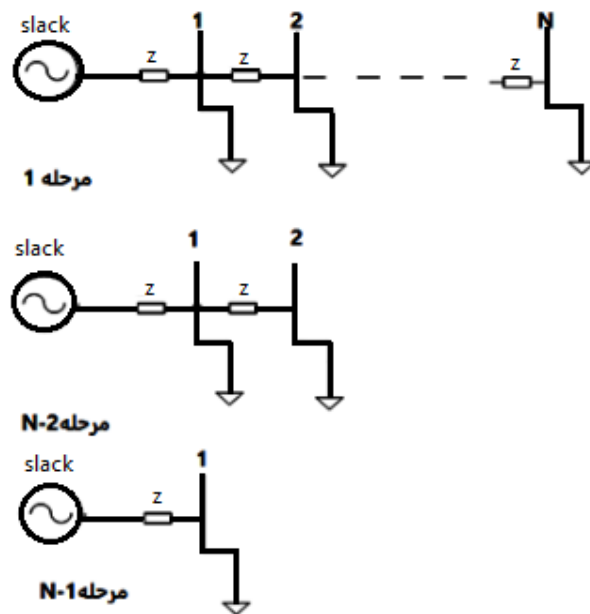
مقدار جریان در این باس ها برابر است با:

$$I_N = I_{N-load} \quad (3-1)$$

$$I_i = I_{i-load} + \sum_{j=i:N} I_{j+1} \quad j = i:N \quad (3-2)$$

که  $N$  تعداد باس ها می باشد. همچنین  $I_{i-load}$  جریان بار متصل به باس  $i$  و  $I_{N-load}$  جریان بار

متصل به باس  $N$  است. شکل زیر نمایشی از مرحله پسرو را نشان می دهد:



شکل (۲-۳) - مراحل مختلف جاروب پسرو در الگوریتم پسرو- پیشرو

برای تشخیص باس های انتهایی از ماتریس ادمیتانس شبکه استفاده می شود. در ماتریس ادمیتانس

شبکه، سطر مربوط به این باس ها تنها دارای دو المان غیر صفر می باشد. در این مرحله باس مرجع

شرایطی مشابه با باس های انتهایی خواهد داشت که باید حذف گردد.

### ۲-۳-۳ مرحله جاروب پیشرو

در مرحله دوم یا جاروب پیشرو هدف محاسبه مقدار ولتاژ هر باس با استفاده از امپدانس خط می-

باشد. برای مثال، مقدار ولتاژ باس  $i$  مساوی است با مقدار ولتاژ باس  $i-1$ ، منهای مقدار امپدانس خط

ضرب در جریان تزریقی باس  $i$  می باشد. جریان باس  $i$  از مرحله قبل یا جاروب پس رو محاسبه می گردد. به عبارت دیگر:

$$V_i = V_{i-1} - Z_{i-1,i} I_i, \quad i = 2:N \quad (3-3)$$

در این رابطه:

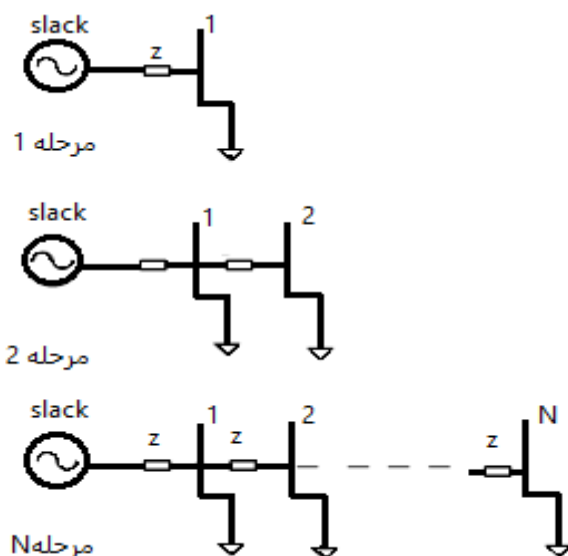
$N$ : تعداد باس ها

$V_i$  و  $V_{i-1}$ : به ترتیب ولتاژ باس های  $i$  و  $i-1$

$I_i$ : جریان باس  $i$

$Z_{i-1,i}$ : امپدانس خط بین باسهای  $i$  و  $i-1$

محاسبه ولتاژ تا باس انتهایی یا  $N$  ادامه می یابد. سپس شرط همگرایی بررسی می گردد. اگر شرط همگرایی برقرار شود مقادیر ولتاژ همگرا شده و الگوریتم پخش بار پایان می یابد در غیر این صورت بار دیگر مقدار جریان در هر باس با ولتاژهای جدید محاسبه شده، به روز رسانی می گردد و تا رسیدن به همگرایی مراحل بالا تکرار می شود. شکل زیر نمایشی از مرحله پیشرو را نشان می دهد:



شکل (۳-۳) - مراحل مختلف جاروب پیشرو در الگوریتم پسرو- پیشرو

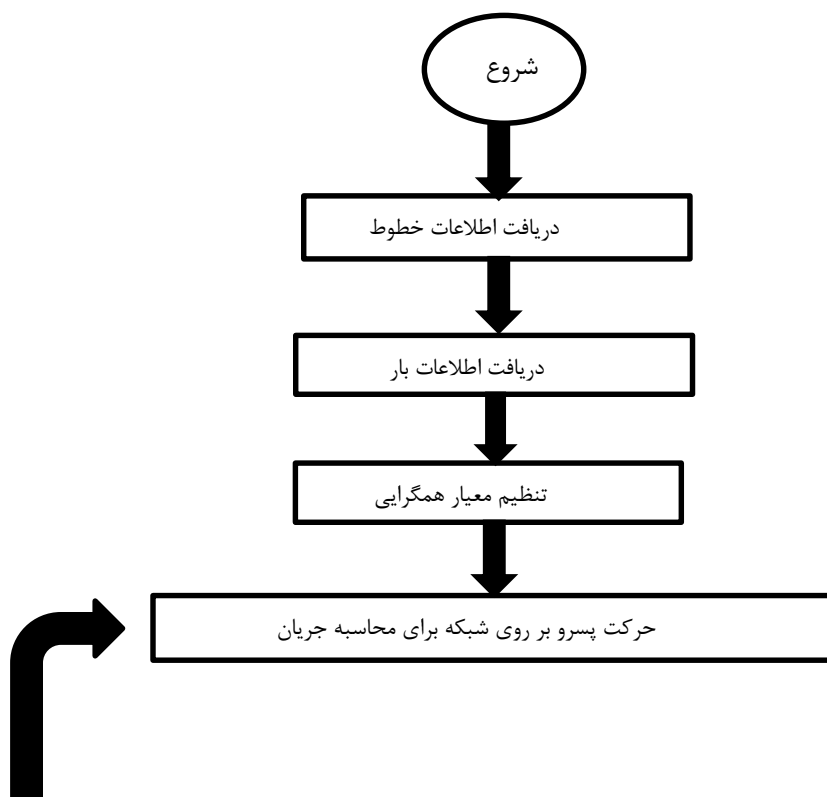
مقدار جریان به روزرسانی برای هر نوع بار متفاوت می باشد. برای مثال برای بارهای توان ثابت با توان

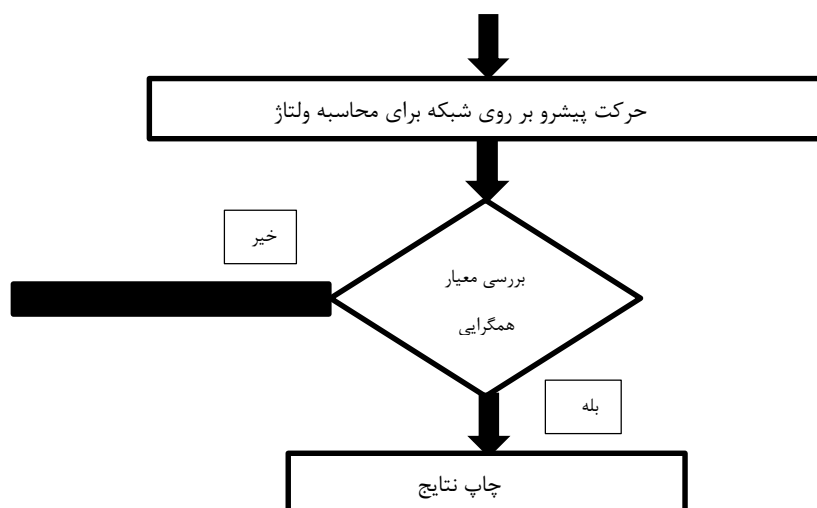
$S$  در هر مرحله جریان با رابطه زیر بروز رسانی می گردد:

$$I_i = \left(\frac{S_i}{V_i}\right)^* \quad (3-4)$$

که  $V_i$  مقدار ولتاژ هر باس و  $S_i$  توان بار می باشد. تمامی مراحل انجام این روش در روند شمار زیر

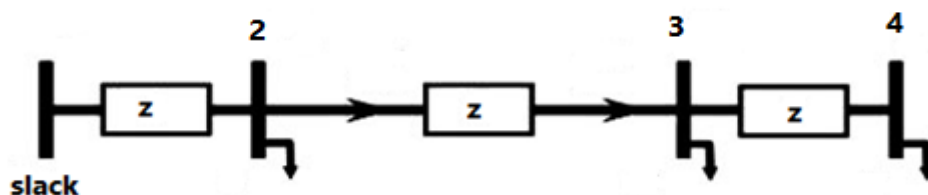
خلاصه شده است [۲۸]:





شکل (۳-۴) - فلوچارت روش پسرو- پیشرو در پخش بار سیستم های توزیع [۲۸]

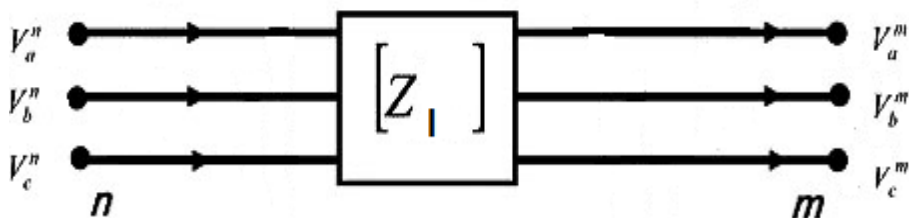
همان طور که در فصل های قبل توضیح داده شد، یک سیستم توزیع به صورت شبکه ای از باس ها که به خطوط توزیع، ترانسفورماتورها، رگولاتورها و ... متصل شده است، نشان داده می شود. خطوط توزیع ممکن است تک فاز، سه فاز و یا دارای سیم خنثی باشند. هر باس سیستم نیز ممکن است دارای بارهایی متعادل یا نامتعادل باشد. تأثیر برخی از این ویژگی ها ممکن است باعث نامتعادلی سیستم گردد [۱]. برای انجام پخش بار نیاز به استفاده از مدل خط می باشد. مشابه با سیستم متعادل، در شبکه های سه فاز نامتعادل خطوط انتقال، ترانسفورماتورها، رگولاتورها و ... با ماتریس ها توصیف می شوند [۲۹]. شکل (۳-۵) و (۳-۶) به ترتیب یک مدل خط تک فاز با ۴ باس و یک مدل خط سه فاز و شکل (۳-۷) یک مدل خط سه فاز با سیم چهارم را نشان می دهد.



شکل (۳-۵) - مدل خط تک فاز با ۴ باس [۲۹]

امپدانس توصیف خط تک فاز به صورت زیر خواهد بود:

$$Z_l = z \quad (5-3)$$

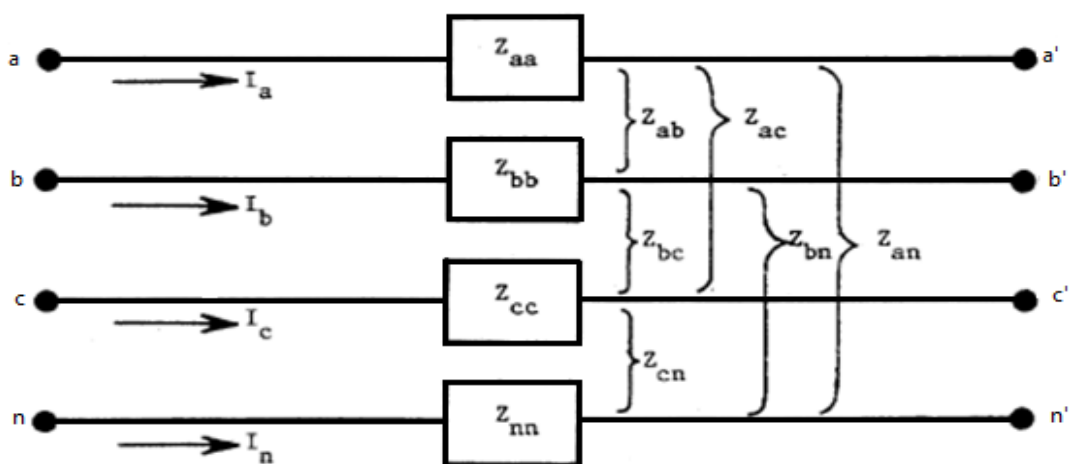


شکل (۶-۳) - مدل خط سه فاز سیستم توزیع [۲۹]

$$Z_l = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

عناصر قطری ماتریس بالا امپدانس های خودی خط سه فاز و عناصر غیر قطری امپدانس های متقابل

بین خطوط می باشد.



شکل (۷-۳) - مدل خط سه فاز چهار-سیمه [۴۰]

ماتریس امپدانس این خط به صورت زیر نوشته می شود.

$$Z_l = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (۷-۳)$$

مشابه با حالت قبل عناصر قطری امپدانس های خودی خطوط و عناصر غیر قطری امپدانس های متقابل بین خطوط می باشند. در الگوریتم پسرو-پیشرو، مدل امپدانس خط در مرحله پیشرو مورد استفاده قرار می گیرد.

### ۳-۴ در نظر گرفتن ترانسفورماتور در الگوریتم پخش بار

یکی از موضوعات مهم در الگوریتم پسرو - پیشرو مدل سازی ترانسفورماتورهای توزیع می باشد. در ابتدا برای مدل سازی این تجهیزات روش تزریق جریان به کار گرفته شد، اما این روش ها نیاز به استخراج فرمول هایی برای اتصالات مختلف سیم پیچ ها داشت. روش دیگر ادغام ترانسفورماتورها و بارهای متصل به آن ها به صورت بارهای معادل بود. در این روش شبکه توزیع تنها در یک سطح ولتاژ، به طور مثال سطح ولتاژ متوسط تحلیل می شد [۴۰].

ترانسفورماتورهای سه فاز را می توان با ادمیتانس گره توصیف نمود. در الگوریتم مورد نظر در مرحله پسرو هدف دستیابی به جریان های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور می باشد. در هر ترانسفورماتور سه فاز رابطه زیر را خواهیم داشت [۴۱]:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (۸-۳)$$

در رابطه بالا، بردارهای سه فاز  $I_p$  و  $V_p$ ، مقدار جریان تزریقی و ولتاژ خط به خنثی اولیه ترانسفورماتور و بردارهای  $I_s$  و  $V_s$ ، مقدار جریان تزریقی و ولتاژ خط به خنثی ثانویه را نشان می دهد.  $Y_{ss}$  و  $Y_{sp}$ ،  $Y_{ps}$ ،  $Y_{pp}$  زیر ماتریس های ادمیتانس گره ترانسفورماتور می باشند که در فصل قبل توصیف شده اند.

در الگوریتم پسرو - پیشرو، برای کنترل ترانسفورماتور توزیع باید گام های زیر را طی کنیم:



در گام پس رو هدف یافتن مقدار جریان اولیه ترانسفورماتور است. مقدار ولتاژ و جریان ثانویه ترانسفورماتور مشخص می باشد. بنابراین با استفاده از رابطه زیر مقدار ولتاژ اولیه آن را محاسبه می کنیم.

$$V_p = Y_{sp}^{-1}(I_s - Y_{ss}V_s) \quad (9-3)$$

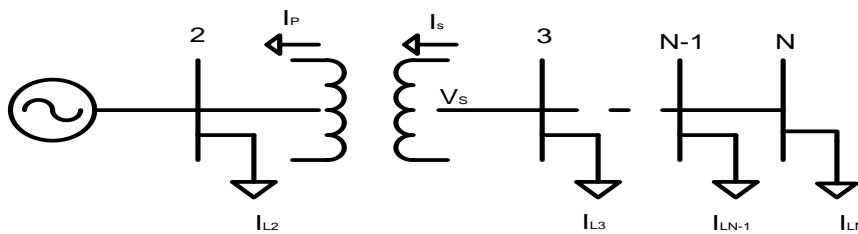
و در نهایت با رابطه زیر مقدار جریان اولیه محاسبه می گردد:

$$I_p = Y_{pp}V_p + Y_{ps}V_s \quad (10-3)$$

در گام پیش رو هدف یافتن ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور است. مقدار ولتاژ و جریان اولیه ترانسفورماتور مشخص می باشد. بنابراین با استفاده از رابطه زیر می توان مقدار ولتاژ ثانویه را محاسبه نمود:

$$V_s = Y_{ps}^{-1}(I_p - Y_{pp}V_p) \quad (11-3)$$

اگر ترانسفورماتور در شاخه های فرعی سیستم قرار گرفته باشد، در مرحله محاسبه جریان تجمعی می توان به این صورت عمل نمود که ابتدا مقدار جریان تجمعی را بدون در نظر گرفتن شاخه دارای ترانس محاسبه می شود و سپس مقدار جریان  $I_p$  که از رابطه (10-3) به دست آمده است را به تمامی باس های قبل از ترانسفورماتور اضافه می شود [40]. شکل زیر نمایشی از ترانس در فیدر را نشان می دهد.

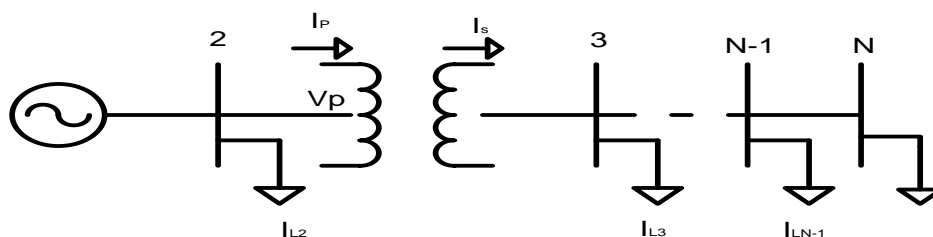


شکل (۸-۳) - مدل ترانسفورماتور در مرحله پس رو

- مرحله پس رو:

$$V_p = Y_{sp}^{-1}((I_{LN} + \dots + I_{LN-1} + I_3) - Y_{ss}V_s) \quad (12-3)$$

$$I_p = Y_{pp}V_p + Y_{ps}V_s \quad (13-3)$$

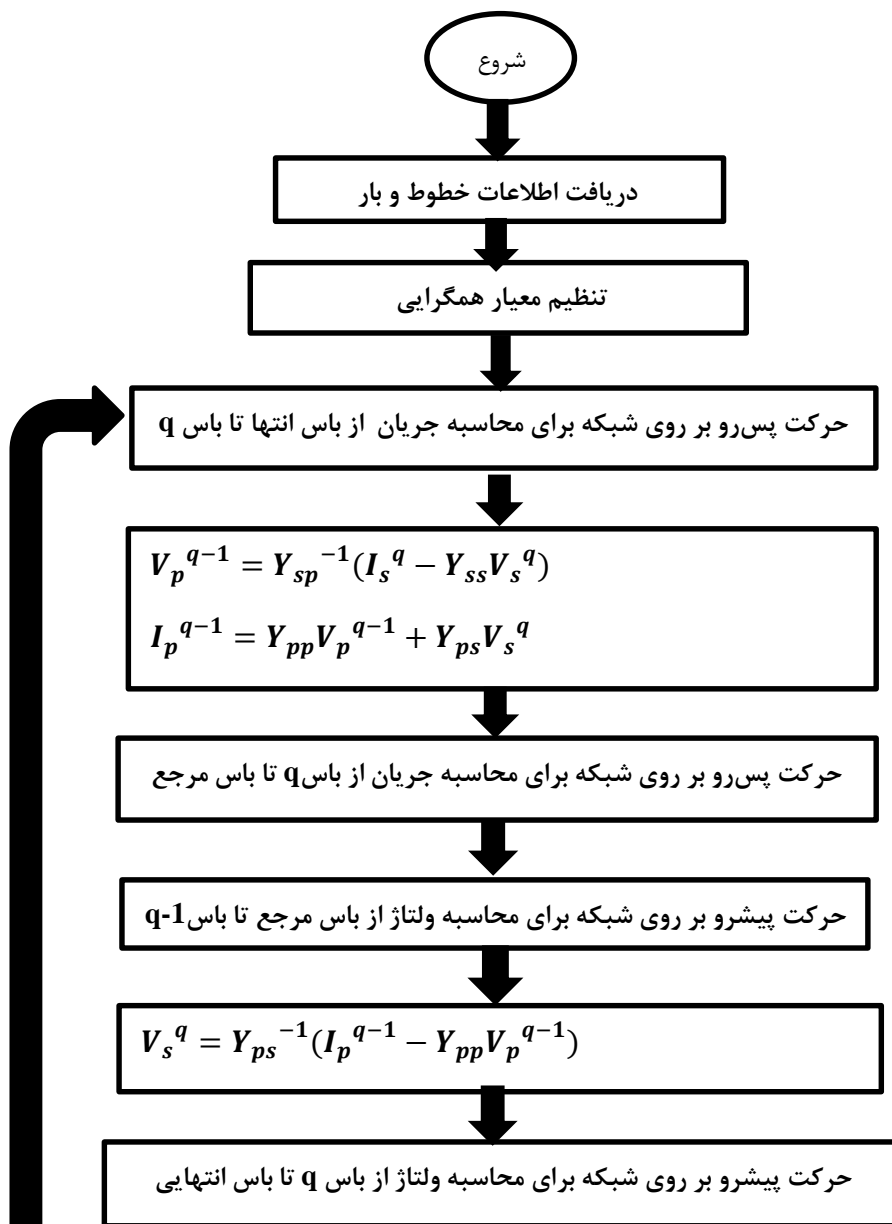


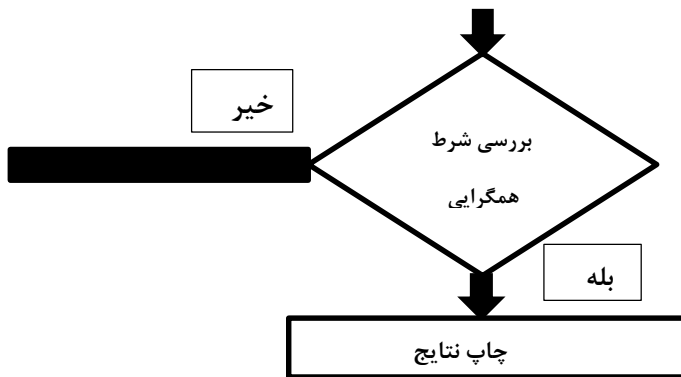
شکل (۹-۳) مدل ترانسفورماتور در مرحله پیشرو

- مرحله پیشرو:

$$V_s = Y_{ps}^{-1}(I_p - Y_{pp}V_p) \quad (۱۳-۳)$$

با فرض وجود ترانسفورماتور در بین باس های  $q-1$  و  $q$  روند شمار الگوریتم به صورت زیر خواهد بود:





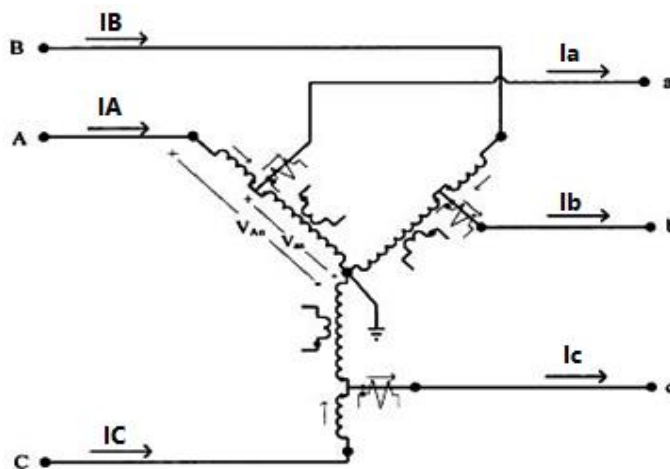
شکل (۱۰-۳) - فلوچارت الگوریتم پسر-پیشرو در حضور ترانسفورماتورهای توزیع

### ۳-۵ در نظر گرفتن رگولاتورهای ولتاژ در الگوریتم پخش بار

بارهای نامتعادل موجود در سیستم باعث ایجاد نوساناتی در ولتاژ باس می گردند به همین دلیل از رگولاتورهای ولتاژ برای ثابت نگه داشتن ولتاژ در یک سطح معین استفاده می کنند. با توجه به فصل قبل معادله ضریب تأثیر سیم پیچ به صورت زیر تعریف می شود [۲۴]:

$$a_R = 1 \pm 0.0625 \text{Tap} \quad (3-14)$$

شکل زیر نحوه اتصال سیم پیچ رگولاتور ستاره را نشان می دهد. این رگولاتور حالت افزایشده را نشان می دهد برای تغییر حالت به کاهنده سیم پیچ را به صورت سری متصل می کند.



شکل (۱۱-۳) - رگولاتور افزاینده با اتصال ستاره [۲۴]

در حالت افزاینده رابطه ولتاژ و جریان در فاز a به صورت زیر می باشد [۲۴]:

$$\frac{I_a}{I_A} = a_{Ra} \quad , \quad \frac{V_A}{V_a} = a_{Ra} \quad (۱۵-۳)$$

که  $I_A$  و  $V_A$  به ترتیب مقدار جریان و ولتاژ در سمت اولیه و  $I_a$  و  $V_a$  به ترتیب مقدار جریان و ولتاژ در سمت ثانویه رگولاتور می باشند.  $a_{Ra}$  نیز ضریب تاثیر سیم پیچ می باشد. برای سه فاز a, b و c می توان روابط را به صورت ماتریسی مطابق روابط زیر نوشت [۲۴]:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{Ra} & 0 & 0 \\ 0 & a_{Ra} & 0 \\ 0 & 0 & a_{Ra} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (۱۶-۳)$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{Ra}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{Ra}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{a_{Ra}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} \quad (۱۷-۳)$$

$I_A, I_B, I_C$  = جریان فازهای a, b و c در سمت اولیه رگولاتور

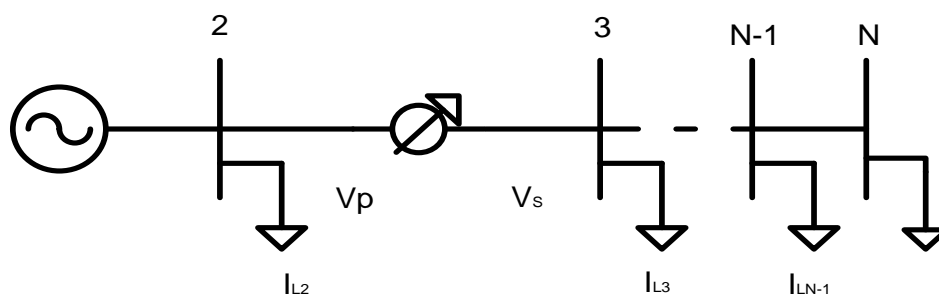
$I_a, I_b, I_c$  = جریان فازهای a, b و c در سمت ثانویه رگولاتور

$V_A, V_B, V_C$  = ولتاژ فازهای a, b و c در سمت اولیه رگولاتور

$V_a, V_b, V_c$  = ولتاژ فازهای a, b و c در سمت ثانویه رگولاتور

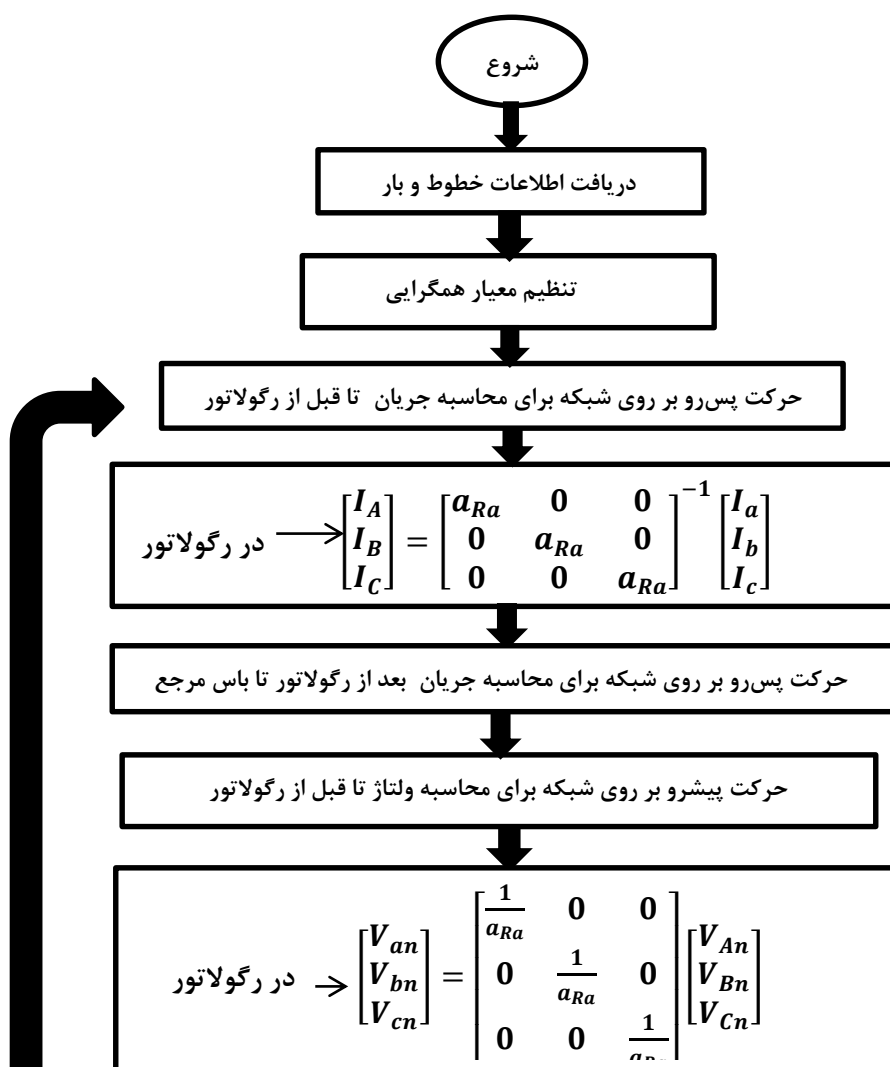
در الگوریتم پس رو - پیش رو در مرحله محاسبه جریان تجمعی در حضور رگولاتور به این صورت عمل می شود که ابتدا مقدار جریان تجمعی باس انتهایی تا قبل از باس دارای رگولاتور را محاسبه می کنیم. سپس جریان باس دارای رگولاتور از رابطه (۱۶-۳) محاسبه می گردد. بار دیگر مقدار جریان تجمعی باس

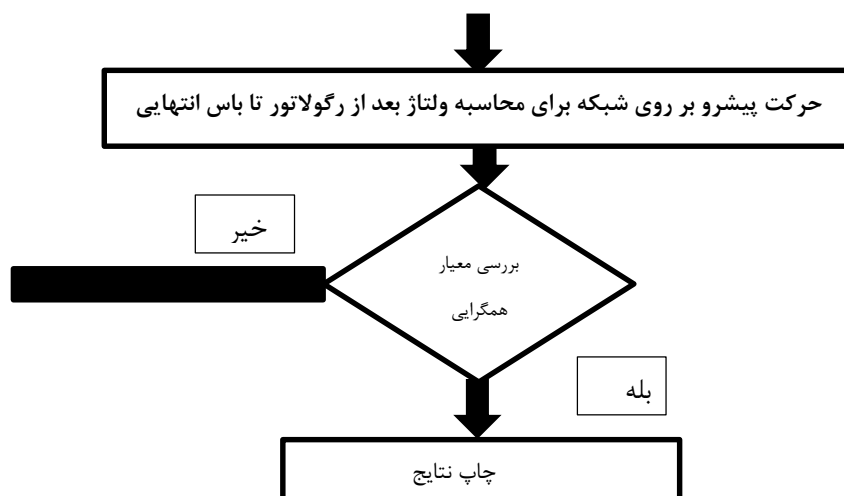
بعد از رگولاتور تا باس مرجع محاسبه می شود. شکل زیر نمایشی از رگولاتور در فیدر را نشان می دهد:



شکل (۱۲-۳) مدل رگولاتور در الگوریتم پسر و - پیشرو

با فرض وجود رگولاتور مشابه شکل (۱۲-۳)، روند شمار الگوریتم به صورت زیر خواهد بود:



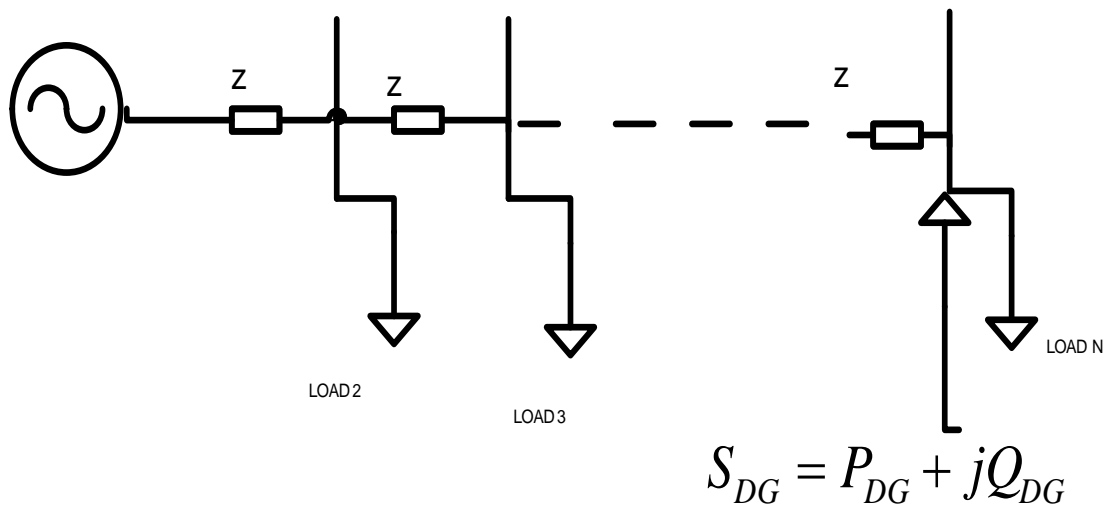


شکل (۳-۱۳) - فلوچارت الگوریتم پس رو - پیشرو در حضور رگولاتورهای ولتاژ

### ۳-۶ در نظر گرفتن تولیدات پراکنده در الگوریتم پخش بار

تولیدات پراکنده به دو صورت به سیستم های توزیع متصل می گردند. نوع اول منابع تولید پراکنده PQ ثابت و نوع دوم مدل کنترل ولتاژ یا PV ثابت می باشند. در الگوریتم مورد نظر در حضور منابع تولید پراکنده PQ، این منابع به صورت بار منفی مدل می شود. اما در حضور منابع تولید پراکنده PV، در هر گام نیاز به محاسبه توان راکتیو تزریقی یا جذب شده توسط DG می باشد، سپس باس PV به باس PQ تبدیل خواهد شد.

برای محاسبه مقدار توان راکتیو تزریقی از روش ماتریس حساسیت استفاده می شود که در فصل قبل نحوه محاسبه آن توضیح داده شد. شکل زیر اتصال منبع تولید پراکنده در سیستم توزیع را نشان می دهد:



شکل (۳-۱۴) - ساختار کلی از حضور منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع

مقدار جریان تزریق شده توسط منبع تولید پراکنده به باس  $i$  از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$I_{DG} = \left( \frac{S_{DG}}{V_i} \right)^* \quad (۳-۱۸)$$

در رابطه بالا،  $S_{DG}$  توان منبع تولید پراکنده،  $V_i$  ولتاژ باس و  $I_{DG}$  جریان منبع تولید پراکنده می باشد. در باس های کنترل ولتاژ، مقدار ولتاژ و توان اکتیو مشخص می باشد. برای باسی که دارای منبع تولید پراکنده می باشد مقدار ولتاژی معین قرار داده می شود. بنابراین برای محاسبات پخش بار، پس از اینکه پخش بار همگرا گردید، مقدار اختلاف ولتاژ، باس کنترل ولتاژ از مقدار تعیین شده محاسبه می گردد. در صورت برقرار نبودن معیار همگرایی، با استفاده از ماتریس حساسیت مقدار توان تزریقی منبع را محاسبه می شود. مقدار توان راکتیو محاسبه شده به باس تزریق می شود و بار دیگر مسال پخش بار حل می گردد.

در بعضی از باس های کنترل ولتاژ محدودیت تزریق و جذب توان راکتیو وجود دارد. پس در این مرحله در صورت وجود محدودیت، مقدار توان راکتیو محاسبه شده را مقایسه می شود. اگر مقدار توان

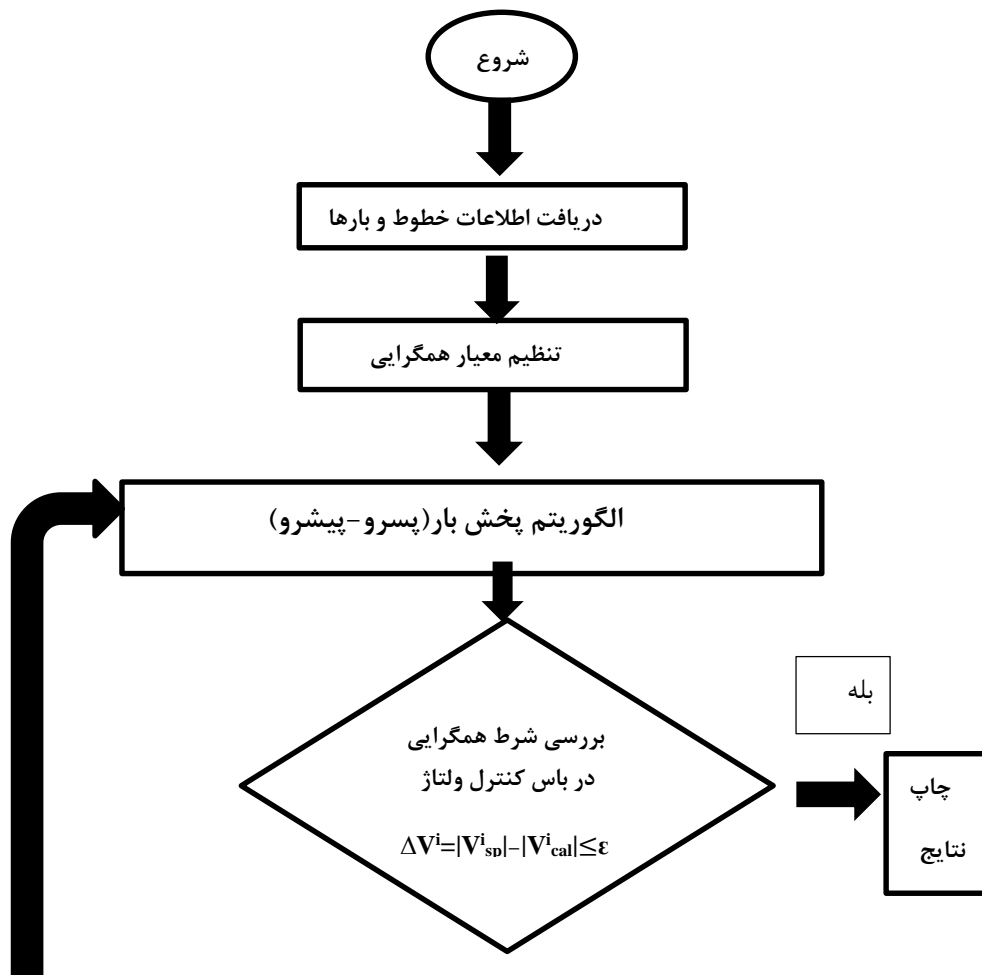
حداکثر تولیدی در باس کنترل ولتاژ را با  $Q_{max}$ ، حداکثر توان راکتیو قابل جذب در باس کنترل ولتاژ را با  $Q_{min}$  و مقدار توان راکتیو محاسبه شده را با  $Q^c$  نشان داده شود در این صورت، اگر  $Q^c$  کوچکتر از  $Q_{max}$  و بزرگتر از  $Q_{min}$  باشد، به این معنی است که مقدار توان راکتیو محاسبه شده در محدوده قابل قبول قرار دارد و توان منبع برابر با مقدار توان محاسبه شده خواهد بود. در صورتی که مقدار توان راکتیو محاسبه شده از حداکثر مقدار توان باس تجاوز کند مقدار توان منبع برابر با  $Q_{max}$  خواهد بود و در حالتی که مقدار توان راکتیو محاسبه شده از مینیمم مقدار توان باس کمتر باشد، مقدار توان منبع برابر با  $Q_{min}$  خواهد بود. این توضیحات در روابط زیر خلاصه شده است:

$$Q_{min} \leq Q^c \leq Q_{max} \quad Q^{DG} = Q^c \quad (۱۹-۳)$$

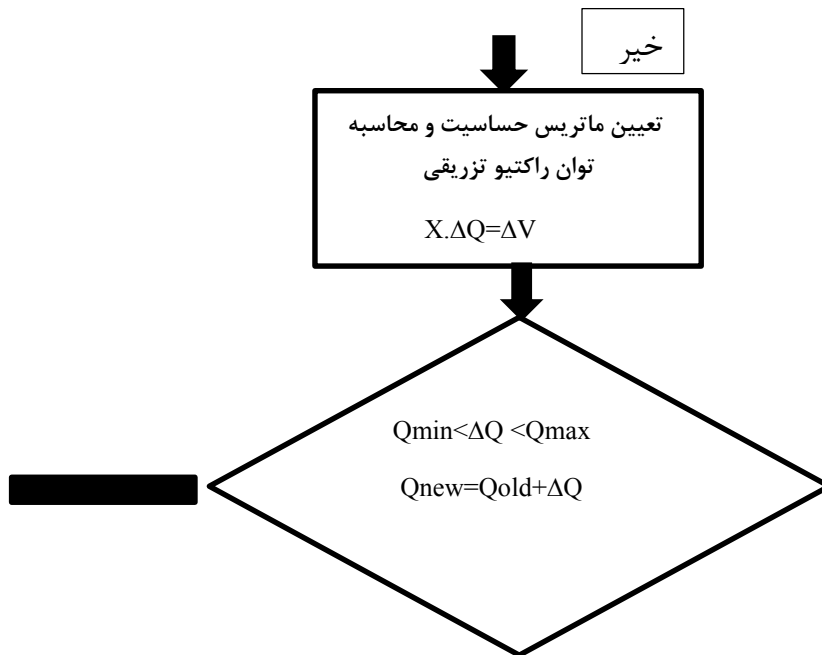
$$Q^c \geq Q_{max} \quad Q^{DG} = Q_{max} \quad (۲۰-۳)$$

$$Q_{min} \geq Q^c \quad Q^{DG} = Q_{min} \quad (۲۱-۳)$$

روند شمار الگوریتم پس-رو-پیشرو در حضور منابع تولید پراکنده به صورت زیر خواهد بود:







شکل (۳-۱۵) - فلوچارت الگوریتم پس-رو-پیشرو در حضور منابع تولید پراکنده کنترل ولتاژ

### ۷-۳ تأثیر بار در الگوریتم پس-رو-پیشرو

مدل سازی بار به دلیل بهره‌برداری مناسب از سیستم قدرت اهمیت زیادی در مطالعات پخش بار دارد. در پخش بار سیستم توزیع مدل‌های استاتیکی بار استفاده می‌شود. بارهای امپدانس ثابت، جریان ثابت، توان ثابت و یا ترکیبی از این بارها (ZIP)، مدل‌های بار معمول استفاده شده در الگوریتم‌های پخش بار می‌باشند. در مرحله پس‌رو برای محاسبه جریان بارهای ZIP روابط زیر را خواهیم داشت:

$$1- \text{ برای بارهای جریان ثابت با جریان } I: I_i = I$$

$$2- \text{ برای بارهای توان ثابت با توان } S: I_i = \frac{V}{Z}$$

$$3- \text{ برای بارهای امپدانس ثابت با امپدانس } Z: I_i = \left(\frac{S}{V}\right)^*$$

در صورت در نظر گرفتن ویژگی وابستگی بار به ولتاژ در الگوریتم پس-رو-پیشرو در هر مرحله علاوه

بر جریان مقدار توان نیز باید به روزرسانی گردد. برای مثال در بارهای ذکر شده در بخش (۲-۲-۴) فصل قبل پس از محاسبه ولتاژ، مقدار توان اکتیو و راکتیو از روابط زیر بروز رسانی می شود [۲۸].

$$\frac{P(V)}{P_0} = C_Z \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + C_I \left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (۲۲-۳)$$

$$\frac{Q(V)}{Q_0} = C_Z' \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + C_I' \left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (۲۳-۳)$$

$$C_Z + C_I = 1 \quad C_Z' + C_I' = 1 \quad (۲۴-۳)$$

ضرایب  $C$  و  $C'$  ثابت می باشند که می توان برای محاسبه آنها از یک تابع بهینه درجه دوم محدب

ساده استفاده کرد [۲۸]:

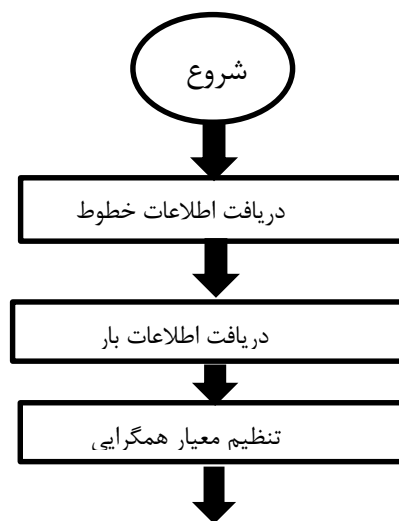
$$\text{Minimize } f(C_Z) = \sum_{i=1}^{N_V} (C_Z (V_i^2 - V_i) - P(V_i) + V_i)^2 \quad (۲۵-۳)$$

با به کار بردن شرایط  $KKT^1$ ، از تابع  $f$  بر حسب  $C_Z$ ، مشتق گرفته و مساوی صفر قرار داده می شود.

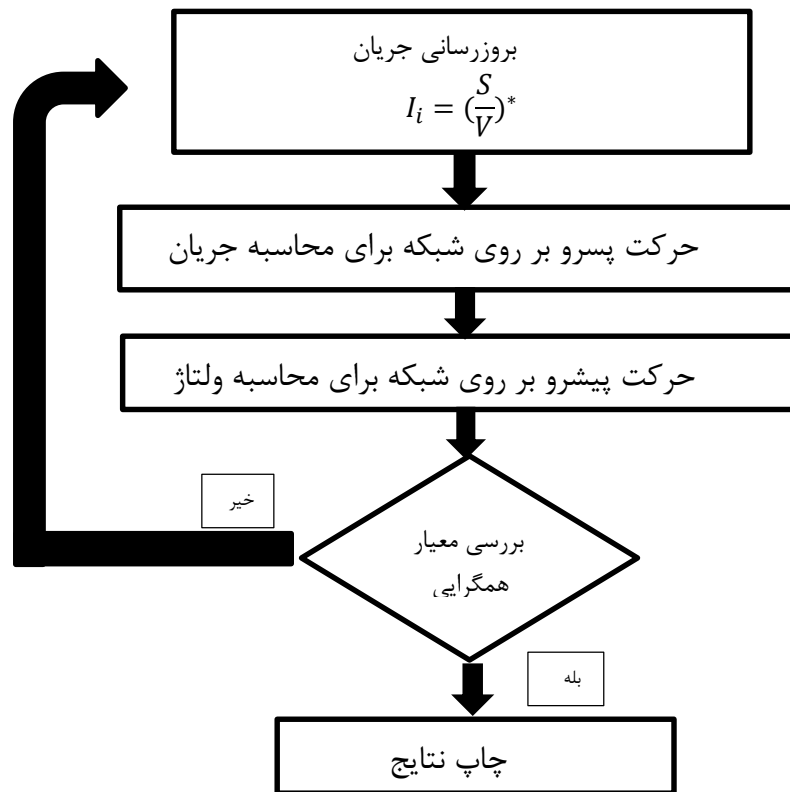
$$C_Z = \frac{\sum_{i=1}^{N_V} (V_i^2 - V_i)(P(V_i) - V_i)}{\sum_{i=1}^{N_V} (V_i^2 - V_i)^2} \quad (۲۶-۳)$$

فلوچارت الگوریتم پسرو - پیشرو حضور بارهای توان ثابت و وابسته به ولتاژ در شکل (۳-۱۷) و

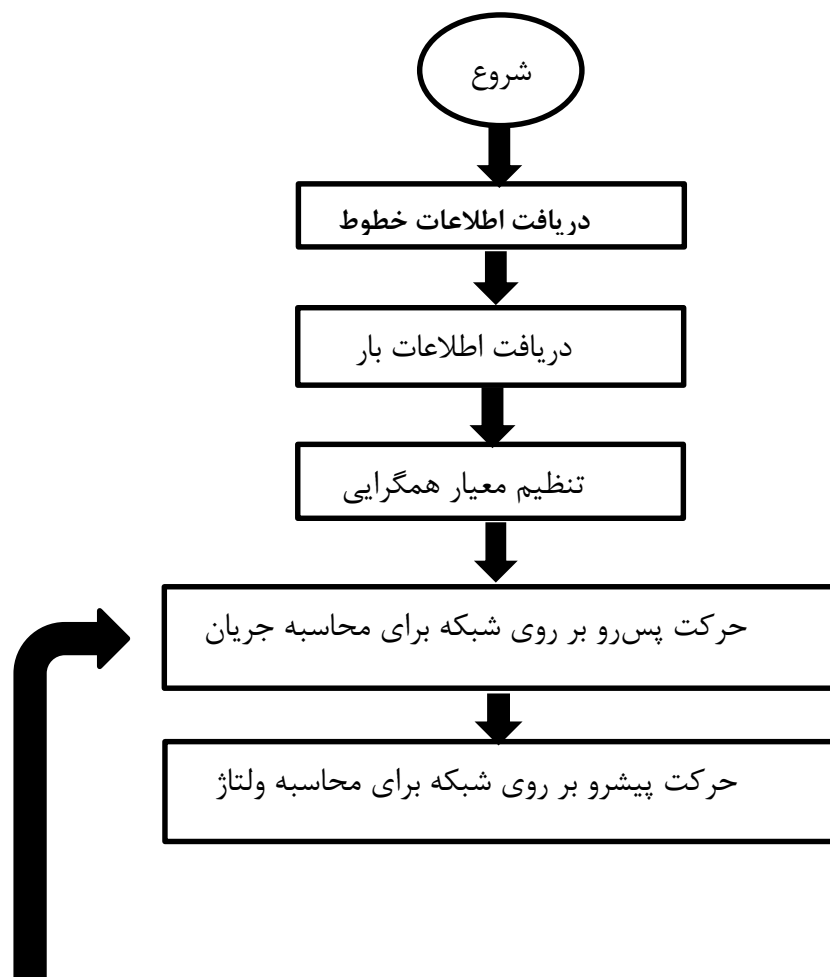
(۳-۱۸) نشان داده شده است.

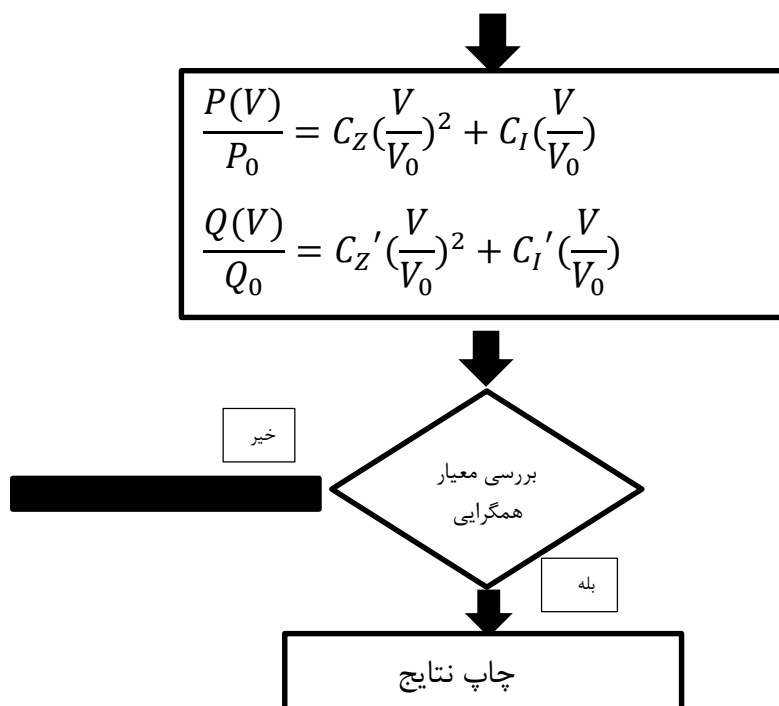


<sup>1</sup> Karush –Kuhn–Tucker Conditions



شکل (۱۶-۳) - فلوچارت الگوریتم پسرو - پیشرو در حضور بارهای توان ثابت





شکل (۳-۱۷) - فلوچارت الگوریتم پسرو - پیشرو در حضور بارهای وابسته به ولتاژ





## فصل چهارم

### شیء سازی و تحلیل نتایج

## ۴-۱ مقدمه

در این فصل سه سیستم تست برای بررسی عملکرد الگوریتم پسر - پیشرو انتخاب گردید است. در سیستم تست اول به مقایسه نتایج در حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده پرداخته می شود و در سیستم تست دوم وجود انواع مدل های مختلف بار بررسی می گردد. در انتها یک سیستم تست تک فاز ساده نیز برای تحلیل پخش بار سیستم توزیع در حضور بارهای وابسته به ولتاژ نیز بررسی می گردد.

## ۴-۲ معرفی سیستم های تست مورد مطالعه

از میان روش های ذکر شده در فصل قبل روش پسر - پیشرو به عنوان روشی قابل اعتماد و مؤثر در سیستم های توزیع انتخاب شد. از طرف دیگر، در تحلیل پخش بار وجود مدل های مختلف بار در سیستم به عنوان یکی از عوامل نامتعادلی سیستم و تأثیر منابع پراکنده از جمله مواردی بودند که می بایست در تحلیل سیستم لحاظ گردند.

## ۴-۲-۱ سیستم ۱۹ با سه توزیع

این سیستم دارای ۱۹ باس و تمامی خطوط سه فاز است. همه باس ها دارای بار می باشند. بارها از نوع معمول توان ثابت انتخاب شده اند. در بارهای توان ثابت جریان در باس  $i$ ، در هر تکرار توسط رابطه زیر به روزرسانی می گردند:

$$I_i = \left(\frac{S_i}{V_i}\right)^* \quad (4-1)$$

که  $S_i$  و  $V_i$  به ترتیب توان بار و ولتاژ باس می باشند. این سیستم به منظور بررسی تأثیر انواع منابع تولید پراکنده انتخاب گردید است. در این سیستم موارد زیر لحاظ می گردد:

۱- پخش بار بدون حضور منابع تولید پراکنده



۲- پخش بار در حضور منابع تولید پراکنده از نوع PQ ثابت

۳- پخش بار در حضور منابع تولید پراکنده کنترل ولتاژ یا PV ثابت

در مورد دوم برای نمایش بهتر تأثیر این مد عملکردی از دو نوع منبع با توان متفاوت ۲۰ کیلووات و ۱۲۰ کیلووات استفاده شده است. در هر مرحله برای مقایسه بهتر نمودار پروفیل ولتاژ رسم گردیده است.

#### ۴-۲-۲ سیستم ۳۴ باسه توزیع

این سیستم دارای ۳۴ باس می باشد. شاخه اصلی این سیستم دارای خطوط سه فاز است در حالی که خطوط فرعی تک فاز می باشند. این سیستم به منظور بررسی تأثیر بارهای مختلف در تحلیل پخش بار انتخاب شده است. هر دو نوع بار متعادل و نامتعادل با اتصال ستاره و مثلث در باس های این سیستم وجود دارد. وجود این دو نوع بار باعث ایجاد نوسانات زیادی در سیستم می شود. در این سیستم موارد زیر لحاظ می گردد:

۱- پخش بار در حضور بارهای متعادل

۲- پخش بار در حضور بارهای متعادل و نامتعادل

۳- تأثیر وجود رگولاتور در سیستم

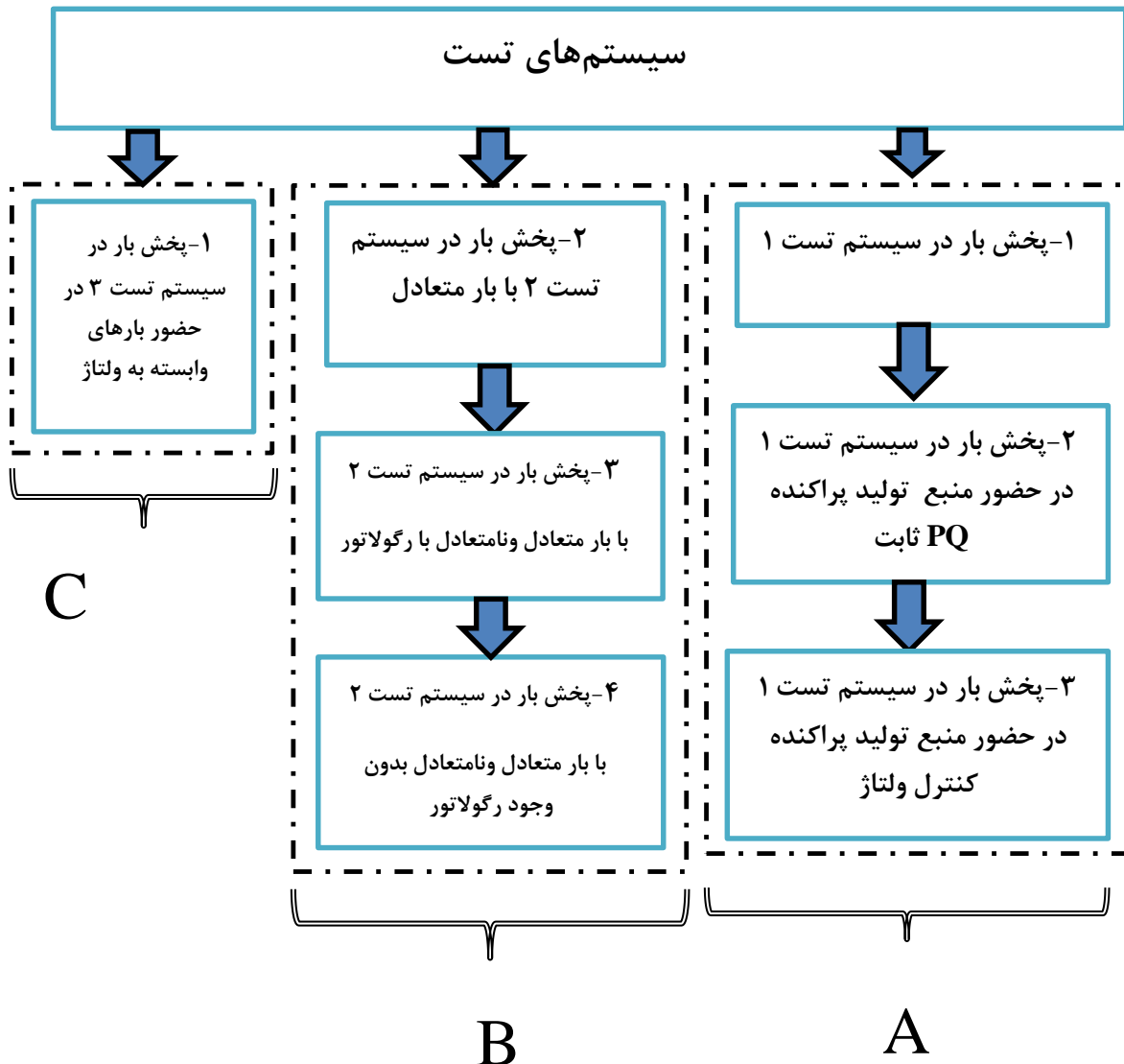
از طرف دیگر در باس ۲۱ این سیستم افزایش ولتاژ شدیدی رخ خواهد داد که برای متعادل نمودن آن از ترانسفورماتور استفاده شده است.

#### ۴-۲-۳ سیستم ۳۰ باسه توزیع

این سیستم دارای ۳۰ باس می باشد که باس یک به عنوان باس مرجع در نظر گرفته می شود. توان مبنا ۱۰ مگاوات و ولتاژ مبنا در این سیستم ۱۱ کیلوولت می باشد. تمامی باس ها دارای بار می باشند. شبیه سازی در این سیستم در حضور بارهای وابسته به ولتاژ انجام می گردد. نمودار پروفیل ولتاژ برای

نمایش عملکرد این سیستم رسم گردیده است.

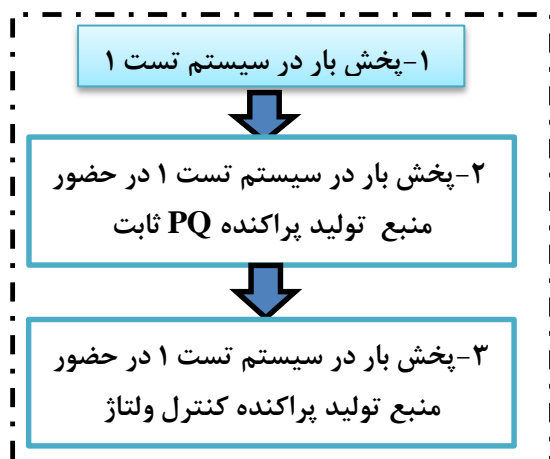
روند شمار زیر خلاصه‌ای از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این فصل را نشان می‌دهد. در این فلوچارت شبیه‌سازی‌های مختلف با نماد A، B و C نشان داده شده است. در هر مرحله، شبیه سازی مورد نظر پررنگ<sup>۱</sup> نمایش داده شده است.



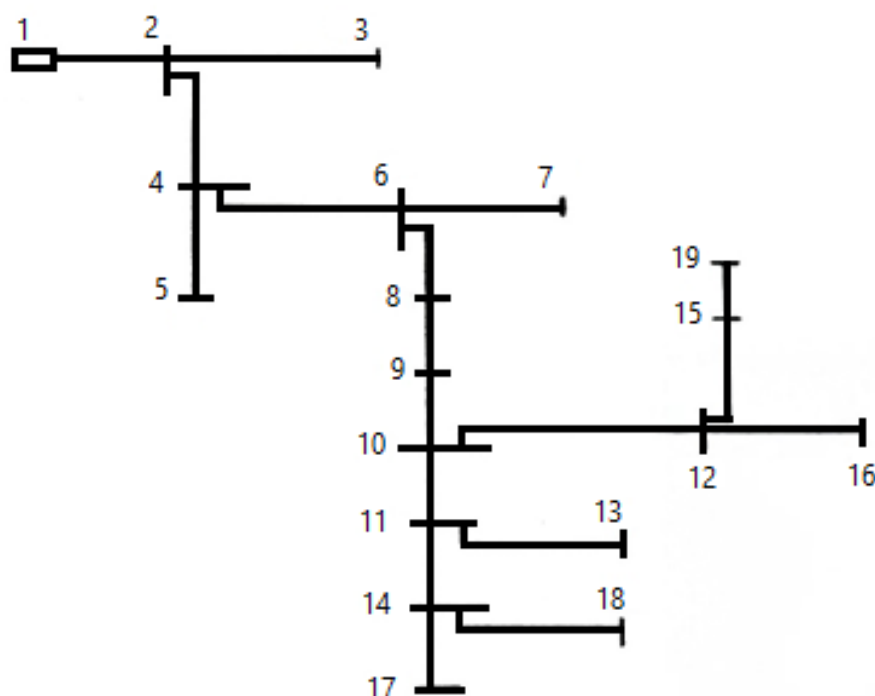
شکل (۱-۴) - فلوچارت پخش بارهای انجام شده در سیستم‌های تست

<sup>۱</sup> Highlight

### ۳-۴ پخش بار در سیستم تست (A-۱)



در این قسمت شبیه سازی مرحله A-۱ را نشان میدهد و روش پخش بار پسرو - پیشرو بر روی سیستم تست ۱ پیاده سازی می گردد. شماتیک تک خطی این سیستم در شکل (۴-۱) نشان داده شده است:



شکل (۴-۲) - شماتیک تک خطی سیستم تست ۱

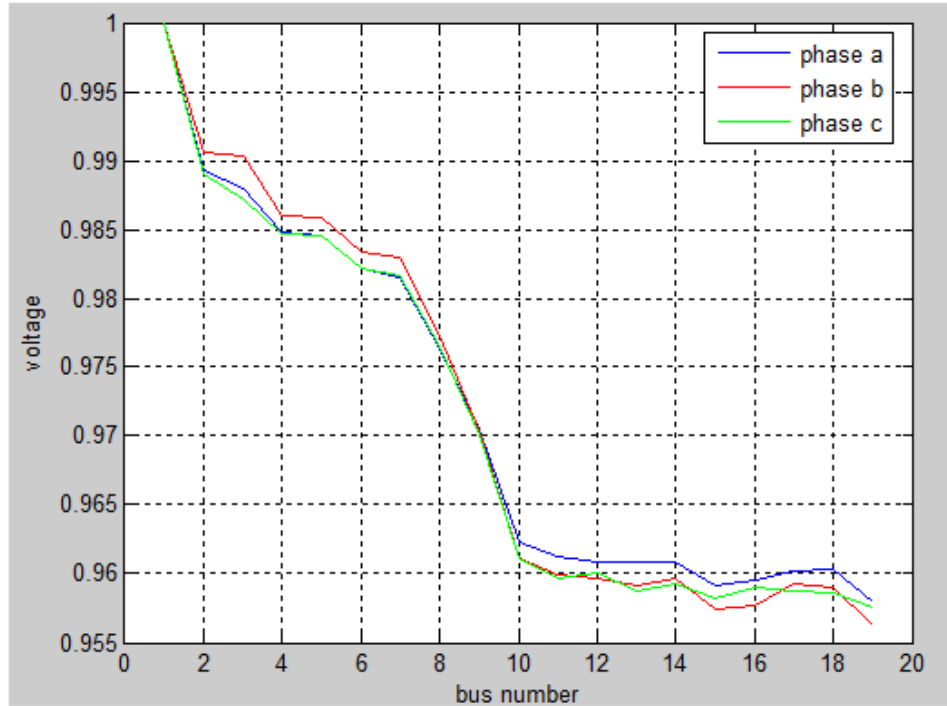
الگوریتم پخش بار بر روی سیستم تست ۱ با معیار همگرایی اختلاف ولتاژها در یک تکرار نسبت به

تکرار قبل در ۵ مرحله همگرا می گردد.

$$\Delta v = v_i - v_{i-1} \quad (۲-۴)$$

که  $\Delta v$  اختلاف ولتاژها،  $v_i$  مقدار ولتاژ در مرحله  $i$  و  $v_{i-1}$  ولتاژ در مرحله  $i-1$  می باشد. شکل (۲-۴)

پروفیل ولتاژ سه فاز a، b و c را نشان می دهد.



شکل (۳-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) در فازهای مختلف سیستم تست ۱

در یک نگاه کلی، ولتاژ در طول شاخه اصلی فیدر کاهش می یابد. از باس ۶ تا انتها مقدار ولتاژ به

دلیل زیاد شدن شاخه های فرعی کاهش بیشتری داشته است. جدول زیر شامل مقادیر ولتاژ را در فازهای

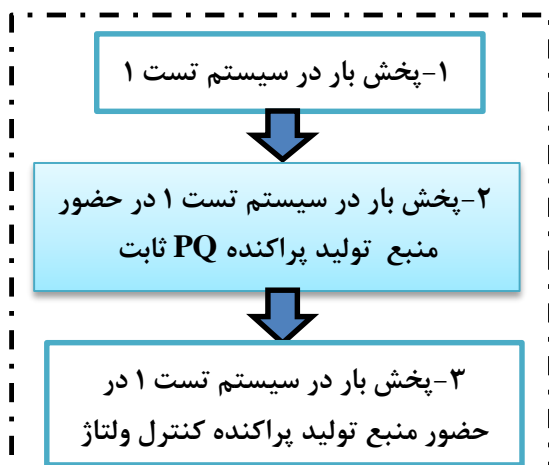
مختلف سیستم می باشد.

جدول (۱-۴) - ولتاژ در فازهای مختلف سیستم تست ۱

شماره باس	Phase a	Phase b	Phase c
۱	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۲	۰/۹۸۹۰	۰/۹۹۰۵	۰/۹۸۹۳

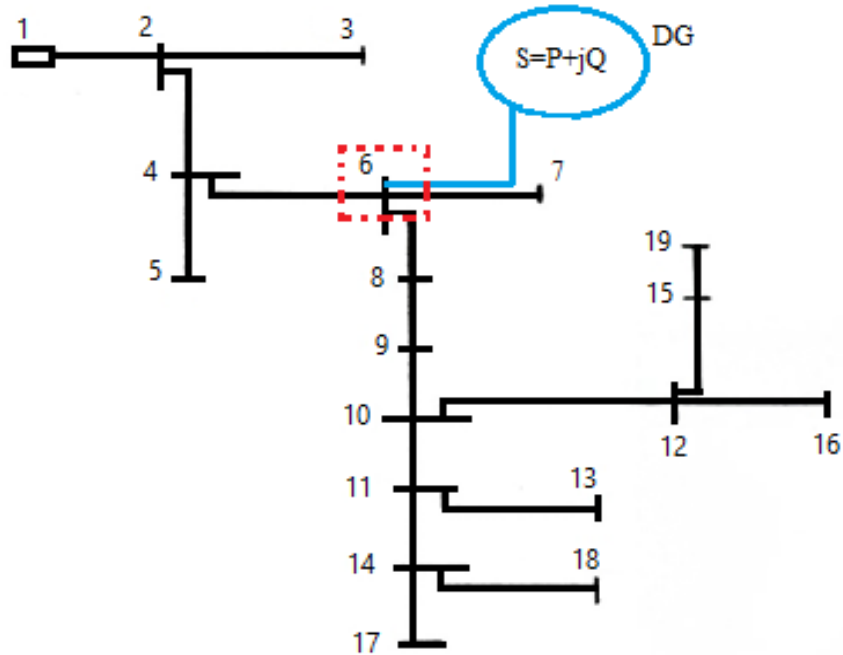
۳	۰/۹۸۷۲	۰/۹۹۰۳	۰/۹۸۷۹
۴	۰/۹۸۴۷	۰/۹۸۶۰	۰/۹۸۴۸
۵	۰/۹۸۴۵	۰/۹۸۵۹	۰/۹۸۴۵
۶	۰/۹۸۲۱	۰/۹۸۳۴	۰/۹۸۲۱
۷	۰/۹۸۱۷	۰/۹۸۳۰	۰/۹۸۱۵
۸	۰/۹۷۶۵	۰/۹۷۷۳	۰/۹۷۶۴
۹	۰/۹۷۰۱	۰/۹۷۰۳	۰/۹۷۰۴
۱۰	۰/۹۶۱۲	۰/۹۶۱۱	۰/۹۶۲۲
۱۱	۰/۹۵۹۷	۰/۹۶۰۰	۰/۹۶۶۳
۱۲	۰/۹۶۰۰	۰/۹۵۹۷	۰/۹۶۰۹
۱۳	۰/۹۵۸۸	۰/۹۵۹۱	۰/۹۶۰۹
۱۴	۰/۹۵۹۳	۰/۹۵۹۶	۰/۹۶۰۹
۱۵	۰/۹۵۸۲	۰/۹۵۷۴	۰/۹۵۹۱
۱۶	۰/۹۵۹۱	۰/۹۵۷۷	۰/۹۵۹۵
۱۷	۰/۹۵۸۸	۰/۹۵۹۳	۰/۹۵۹۵
۱۸	۰/۹۵۸۷	۰/۹۵۹۰	۰/۹۶۰۳
۱۹	۰/۹۵۷۶	۰/۹۵۶۳	۰/۹۵۸۵

#### ۴-۴ پخش بار در سیستم تست ۱ (A-۲)



در این قسمت شبیه سازی قسمت A-۲ را نشان می‌دهد و روش پخش بار پسرو - پیشرو بر روی

سیستم تست ۱ در حضور منبع تولید پراکنده PQ ثابت پیاده سازی می گردد. برای بررسی تأثیر منابع تولید پراکنده PQ ثابت در شبکه موردنظر یک منبع ۲۰ کیلوواتی با ضریب قدرت ۰/۸۹ پس فاز در باس ۶ اضافه می شود. بار دیگر منبع دیگری با توان ۱۲۰ کیلووات با ضریب قدرت ۰/۸۹ پس فاز اضافه می شود. شکل زیر نمایشی از اتصال منبع تولید پراکنده را به سیستم نشان می دهد:



شکل (۴-۴) - شماتیک سیستم تست ۱ در حضور منبع تولید پراکنده [۴۲]

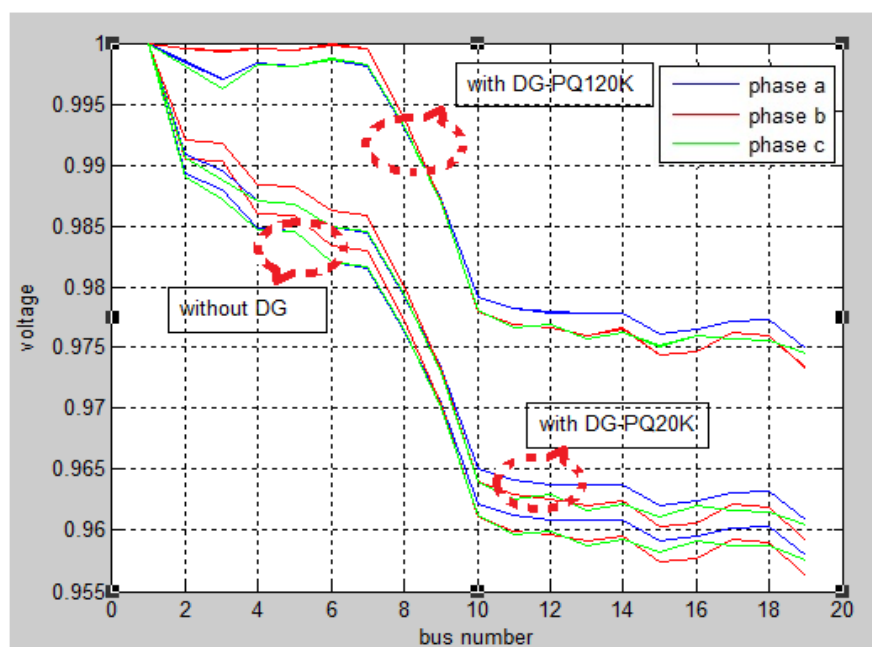
جدول زیر مقایسه مقدار ولتاژ باس ۶ را در حضور و بدون حضور منبع تولید پراکنده PQ ثابت نشان

می دهد:

جدول (۲-۴) - مقایسه نتایج ولتاژ (بر حسب پریونیت) در حضور منبع تولید پراکنده PQ ثابت

مقدار ولتاژ بر حسب پریونیت	فاز a (pu)	فاز b (pu)	فاز c (pu)
بدون حضور منبع تولید پراکنده	۰/۹۸۲۱	۰/۹۸۳۴	۰/۹۸۲۱
در حضور منبع ۲۰ کیلوواتی	۰/۹۸۴۹	۰/۹۸۶۲	۰/۹۸۴۹
در حضور منبع ۱۲۰ کیلوواتی	۰/۹۹۸۷	۰/۹۹۹۹	۰/۹۸۸۷

در محاسبات پخش بار این دو منبع را به صورت بار منفی مدل می کنیم. همان طور که مشاهده می شود مقدار ولتاژ در حضور منبع افزایش یافته است و پروفیل ولتاژ بهبود یافته است. نمودار زیر مقایسه پروفیل ولتاژ سیستم تست ۱ را در صورت وجود و عدم وجود دو منبع ذکر شده را نشان می دهد:



شکل (۵-۴) - پروفیل ولتاژ در حضور و بدون حضور منبع تولید پراکنده PQ ثابت

#### ۵-۴ پخش بار سیستم تست ۱ (A-۳)



در این قسمت شبیه سازی قسمت A-۳ را نشان می دهد و روش پخش بار پسرو - پیشرو را بر روی

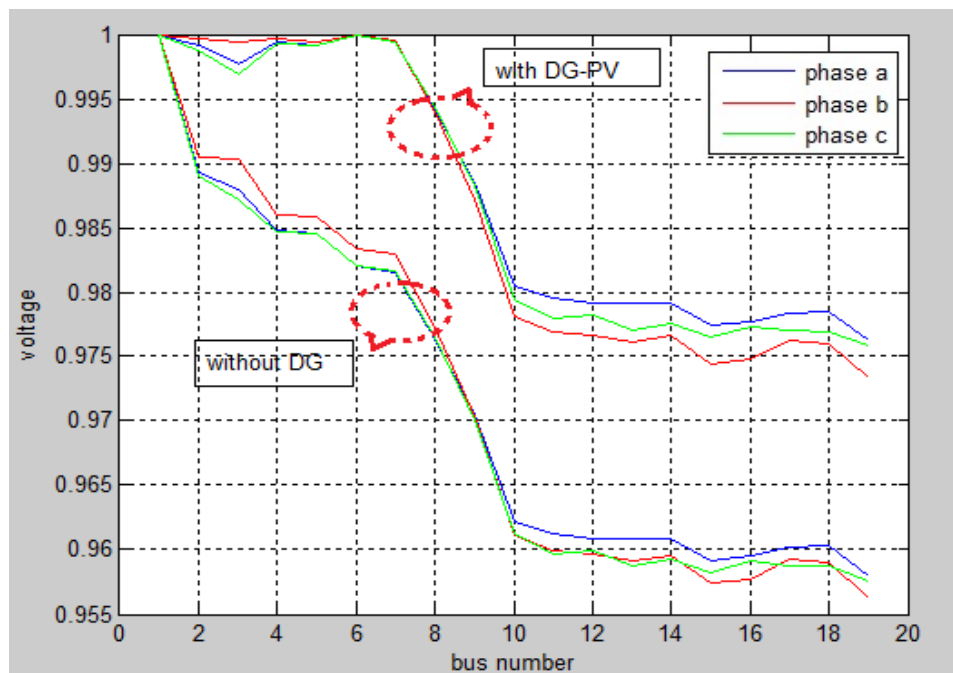
سیستم تست ۱ در حضور منبع تولید پراکنده PV ثابت پیاده سازی می‌شود. در این مرحله منبع تولید پراکنده ۱۲۰ کیلووات را در باس ۶ را به منبع کنترل ولتاژ<sup>۱</sup> تبدیل می‌شود. توان اکتیو مشابه حالت قبل می‌باشد. مقدار ولتاژ را در ۱ پریونیت ثابت می‌گردد. برای باس کنترل ولتاژ در این مثال محدودیتی در نظر گرفته نشده است. جدول زیر مقدار ولتاژ باس ۶ را در حالت کنترل ولتاژ نشان می‌دهد:

جدول (۳-۴) - مقایسه نتایج پخش بار سیستم ۱۹ باسه در حضور منبع تولید پراکنده کنترل ولتاژ

فاز c	فاز b	فاز a	مقدار ولتاژ برحسب پریونیت
۰/۹۸۲۱	۰/۹۸۳۴	۰/۹۸۲۱	بدون حضور منبع تولید پراکنده
۰/۹۹۹۹	۱	۰/۹۹۹۹	در حضور منبع کنترل ولتاژ

همان‌طور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، مقدار ولتاژ فازها به حدود یک پریونیت ثابت شده است.

شکل زیر پروفیل ولتاژ سیستم را در حضور منابع تولید پراکنده PV نشان می‌دهد:



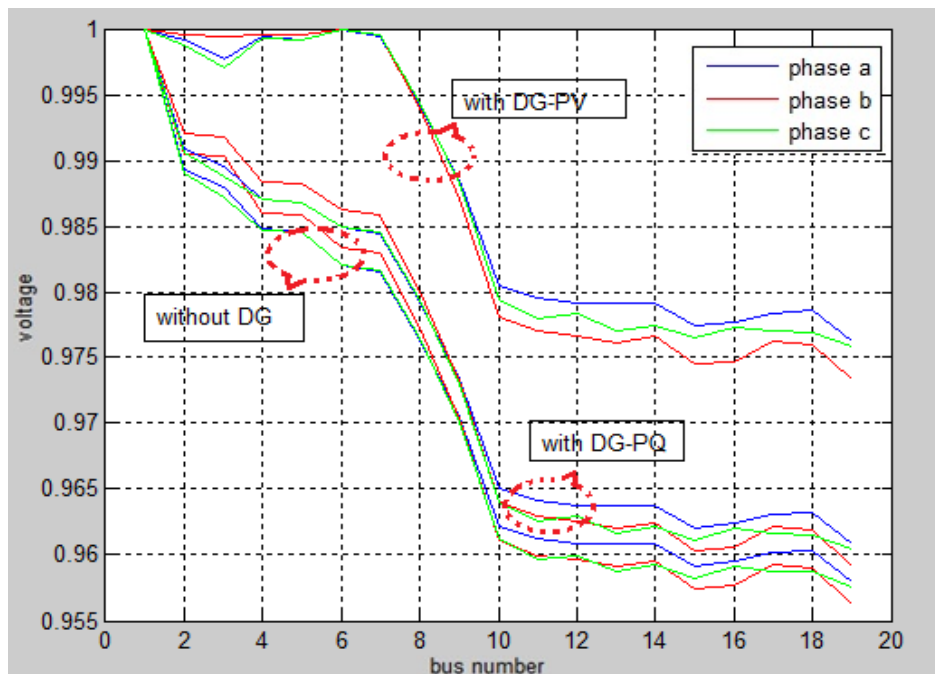
شکل (۴-۶) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) در حضور و بدون حضور منبع تولید پراکنده کنترل ولتاژ

<sup>۱</sup> PV



با توجه به شکل بالا، پروفیل ولتاژ در حضور منبع تولید پراکنده PV بهبود یافته است. شکل زیر

مقایسه دیگری را بین منبع تولید پراکنده PQ ثابت و PV ثابت را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۴) - مقایسه پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) سیستم ۱۹ باسه در حالت بدون حضور منبع تولید پراکنده و در حضور منبع تولید پراکنده PQ و PV

با مقایسه پروفیل ولتاژ در حالتی که منبع تولید پراکنده PQ در سیستم حضور دارد و حالتی که منبع تولید پراکنده به PV مدل می‌شود مشاهده می‌گردد که مقدار ولتاژ باس‌ها در حضور منبع تولید پراکنده PV افزایش بیشتری یافته است. منبع تولید پراکنده ۱۲۰ کیلوواتی کنترل ولتاژ در سیستم تست ۱ به‌منظور مقایسه نتایج در باس ۶ قرار دادیم اما به‌طور کلی منابع تولید پراکنده PQ، به‌طور معمول در باس‌های ابتدایی متصل می‌گردند در حالی که منابع تولید پراکنده PV دلیل افت ولتاژ در باس‌های انتهایی متصل می‌گردد.

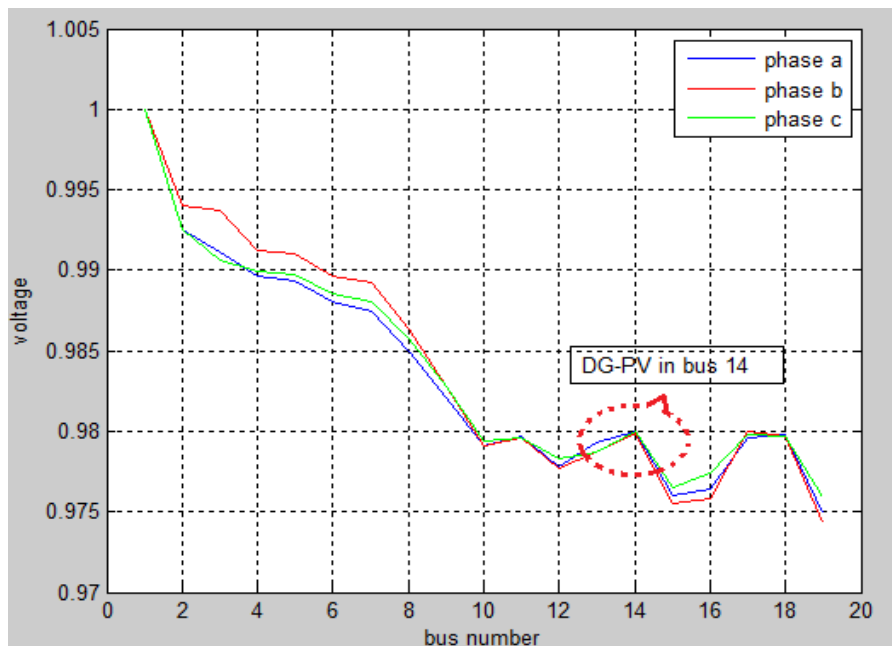
برای عملکرد بهتر سیستم منبع ۲۰ کیلووات کنترل ولتاژ را برای تثبیت ولتاژ در ۰/۹۸ پریونیت در

باس ۱۴ قرار داده می شود.

جدول (۴-۴) - مقایسه نتایج پخش بار باس ۱۴ از سیستم تست ۱ در حضور منبع تولید پراکنده کنترل ولتاژ

فاز c	فاز b	فاز a	مقدار ولتاژ بر حسب پریونیت
۰/۹۵۹۳	۰/۹۵۹۶	۰/۹۶۰۹	بدون حضور منبع تولید پراکنده
۰/۹۸۰۰	۰/۹۸۰۰	۰/۹۸۰۰	در حضور منبع کنترل ولتاژ

پروفیل ولتاژ در حضور منبع تولید پراکنده PV در باس ۱۴ به صورت زیر خواهد بود:

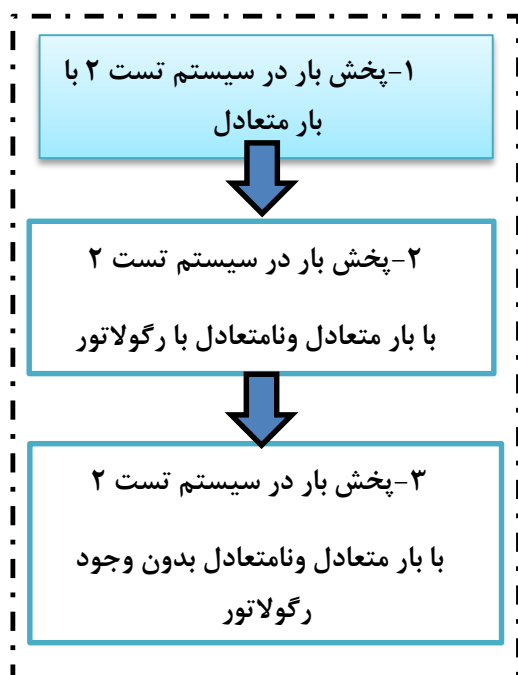


شکل (۸-۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) در سیستم تست ۱ در حضور منبع تولید پراکنده کنترل ولتاژ در باس

۱۴

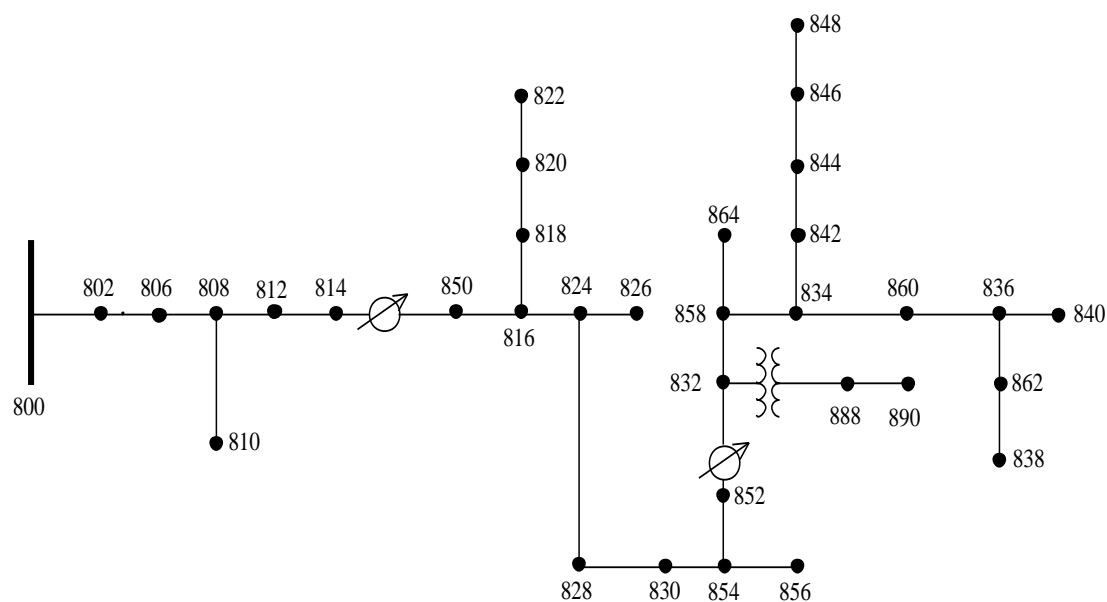
با توجه به شکل بالا مقدار ولتاژ در فازهای مختلف باس ۱۴ به ۰/۹۸ رسیده است. از طرف دیگر، باس ۱۸ شاخه فرعی باس ۱۴ می باشد و نزدیک به این باس است، همان طور که مشاهده می شود مقدار ولتاژ این باس نیز به میزان زیادی افزایش خواهد یافت در حالی که به طور مثال مقدار ولتاژ باس ۱۶ اختلاف بیشتری نسبت به باس ۱۴ خواهد داشت.

#### ۴-۶ پخش بار در سیستم تست ۲(B-۱)



سیستم تست دوم سیستم ۳۴ باسه IEEE می باشد. شماتیک تک خطی این سیستم در شکل (۴-۸)

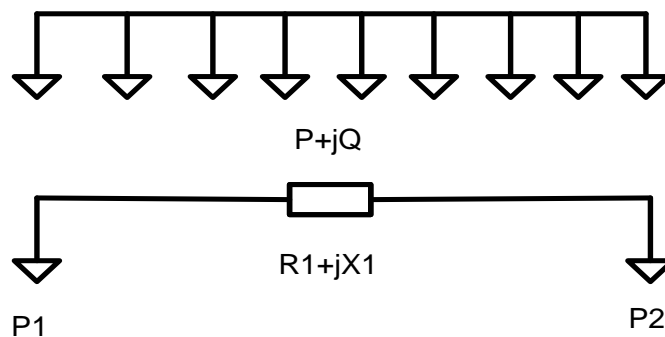
نشان داده شده است.



شکل (۴-۹) - شماتیک تک خطی سیستم ۳۴ باسه IEEE [۴۳]

دو نوع اتصال بار در این سیستم وجود دارد: ۱- بارهای متعادل ستاره و مثلث ۲- بارهای توزیع شده بارهای توزیع شده در طول خط حضور دارند. اگر هر یک از این بارها به تنهایی در نظر گرفته شود تعداد باس‌های سیستم زیاد خواهد شد. رابطه زیر نحوه تبدیل بارهای توزیع شده را به بارهای متراکم نشان می‌دهد.

شکل زیر نمایشی از بارهای توزیع شده و متراکم را نشان می‌دهد:



شکل (۴-۱۰) مدل بارهای توزیع شده برای تبدیل به بارهای متراکم [۲۷]

با توجه به شکل بارهای توزیع شده را می‌توان به صورت روابط زیر نوشت:

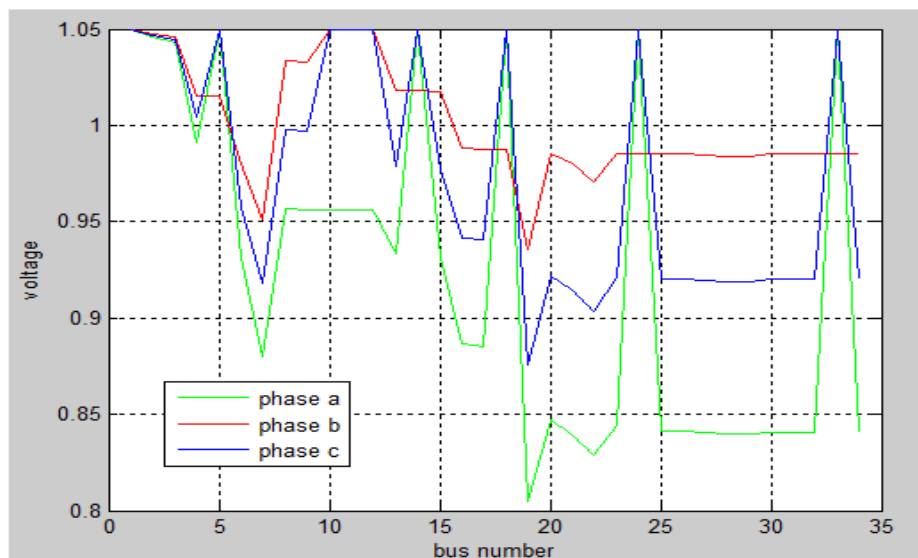
$$P_1 = (1 - \eta)(P + jQ) \quad , \quad P_2 = \eta(P + jQ) \quad (۳-۴)$$

$$\eta = \frac{V_1^2}{(V_2 + V_1)} \left[ V_1 L n \frac{V_1}{V_2} + (V_2 + V_1) \right] , \quad 0 < \eta < 1 \quad (۴-۴)$$

P توان اکتیو و Q توان راکتیو بار می باشد.  $V_1$  و  $V_2$  ولتاژ باس‌های اطراف خط می‌باشند.  $\eta$  مقدار تاثیر بار می‌باشد. با فرض اینکه  $V_1 \cong V_2$  ،  $\eta$  تقریباً برابر با ۰/۵ می‌شود. بنابراین نیمی از بار فیدرهای توزیع در انتها و نیمی دیگر در قسمت اولی قرار دارد [۲۱].

ابتدا تنها در حضور بارهای متعادل سیستم شبیه‌سازی می‌گردد. شکل زیر پروفیل ولتاژ سیستم را

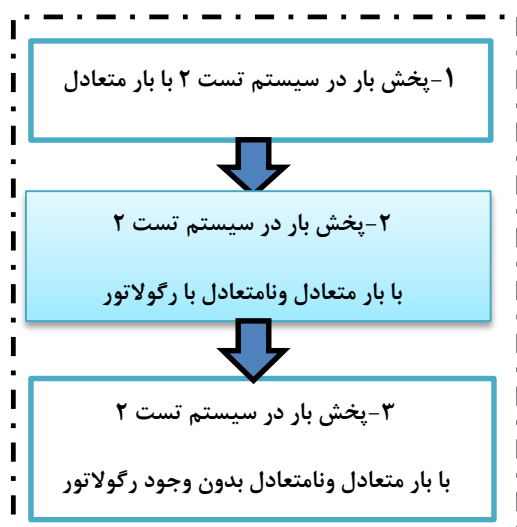
نشان می دهد.



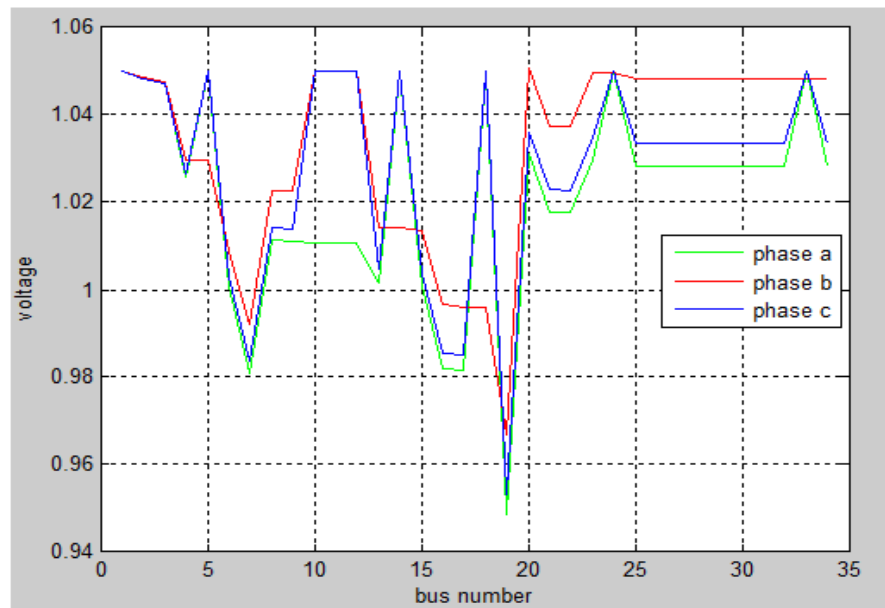
شکل (۴-۱۱) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) سیستم تست ۲ با بار متعادل

بارهای متعادل در این سیستم به صورت ستاره و مثلث در باس های ۱۶، ۲۲، ۲۷، ۲۹، ۳۰ و ۳۴ قرار گرفته اند. وجود باس هایی دارای ولتاژ مساوی با ولتاژ مرجع در فازهای مختلف به دلیل تک فاز بودن خطوط در شاخه های فرعی سیستم می باشد. بنابراین نمی توان ولتاژ سه فاز را نمی توان بر روی هم رسم نمود. شکل بالا به منظور ایجاد دید کلی تر از باس های سیستم رسم گردیده است.

#### ۴-۷ پخش بار در سیستم تست ۲ (B-۲)



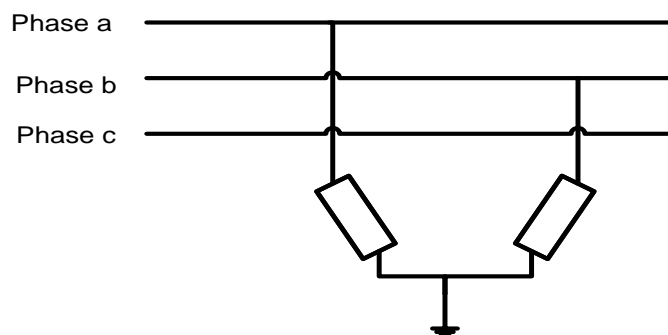
شکل زیر پروفیل ولتاژ در حضور بارهای متعادل و نامتعادل در سیستم را نشان می‌دهد:



شکل (۴-۱۲) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) سیستم ۳۴ باسه در حضور بارهای متعادل و نامتعادل

بارهای نامتعادل به صورت ستاره و یا مثلث در برخی از باس متصل گردیداند. شکل زیر نمونه ای از

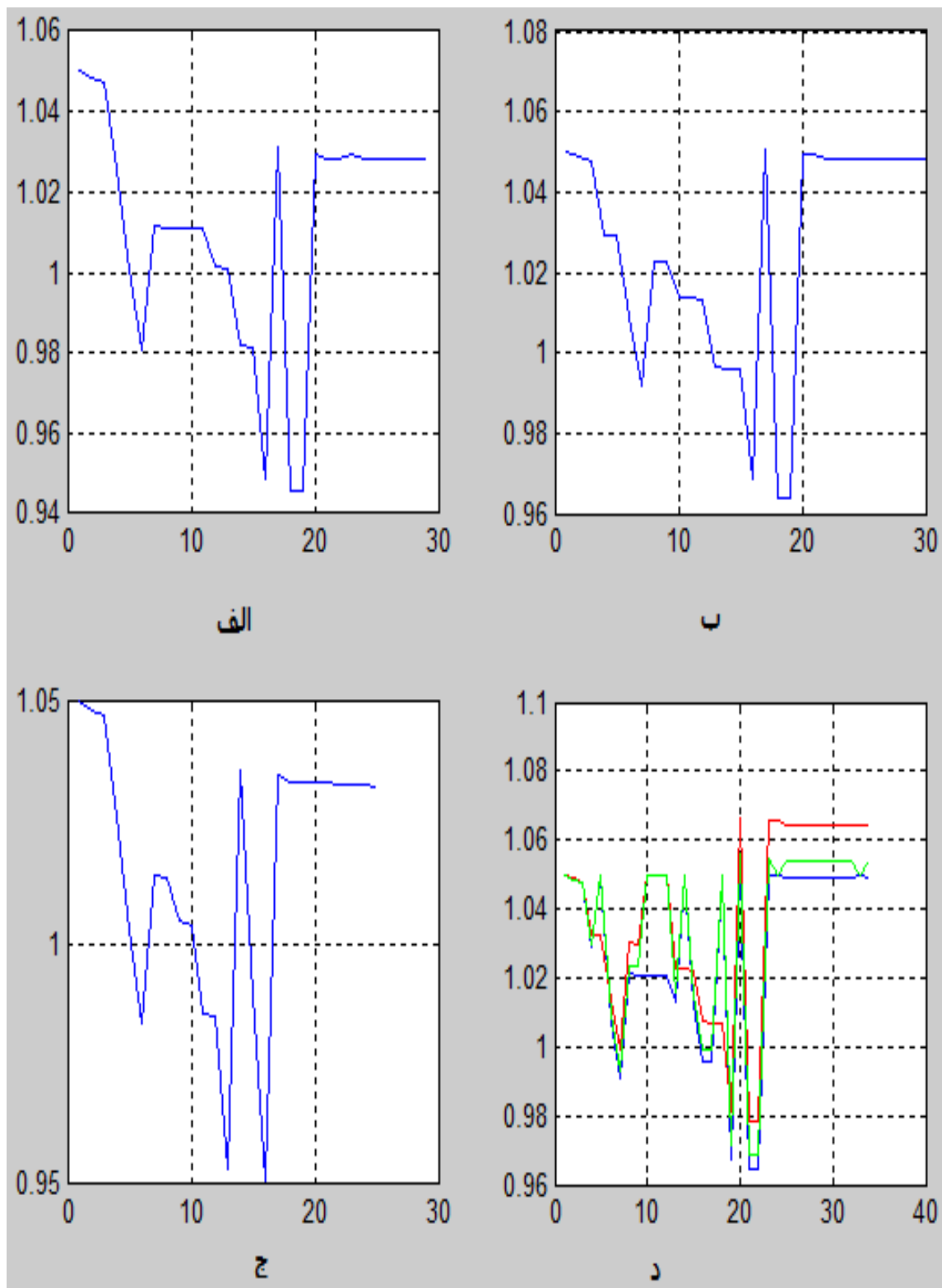
یک بار نامتعادل را نشان می‌دهد که مقدار بار در فاز c صفر می‌باشد.



شکل (۴-۱۳) - یک بار سه فاز ستاره نامتعادل

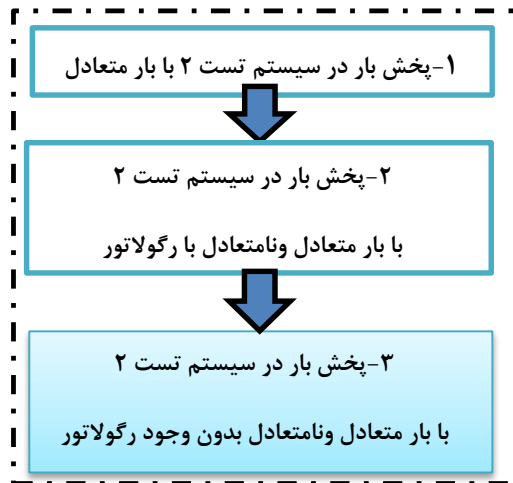
برای نمایش واقعی‌تر از مقدار ولتاژ در باس‌ها، پروفیل ولتاژ هر یک از فازها در شکل‌های زیر نمایش

داده شده است.

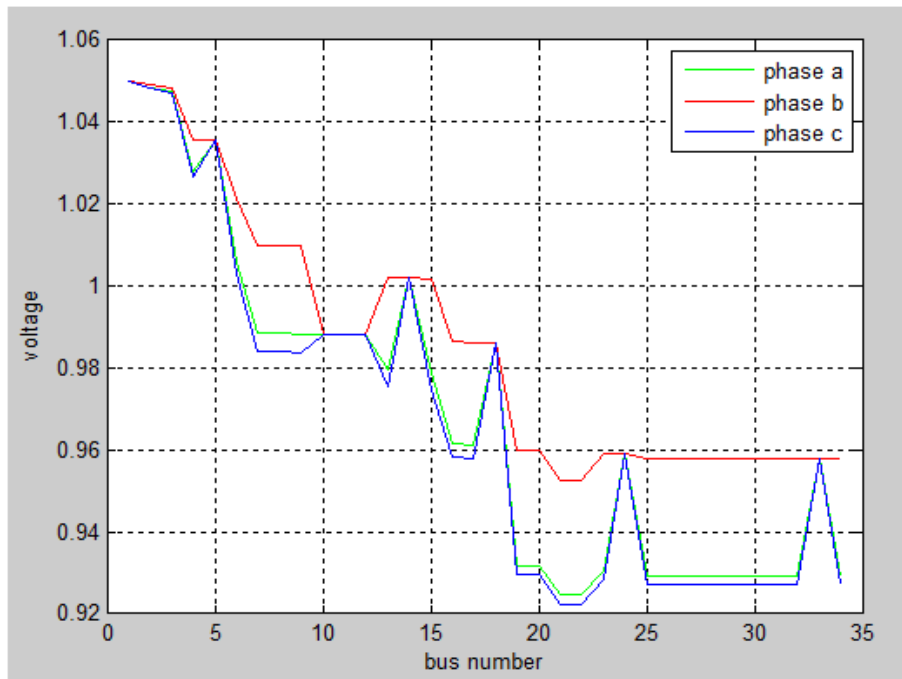


شکل (۴-۱۴) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) در فازهای مختلف سیستم ۳۴ باسه IEEE الف) پروفیل ولتاژ فاز a  
ب) پروفیل ولتاژ فاز b ج) پروفیل ولتاژ فاز c د) پروفیل ولتاژ فازهای a, b, c

## ۸-۴ پخش بار در سیستم تست ۲ (۳-۲-B)



در سیستم ۳۴ باسه مورد نظر، یک رگولاتور بین باس‌های ۷ و ۸ و یک رگولاتور بین باس‌های ۱۹ و ۲۰ قرار دارد. وظیفه این دو رگولاتور ثابت نگه داشتن ولتاژ باس‌های ۸ و ۲۰ در مقدار مرجع می‌باشد. در این قسمت نیز با توجه به روابط ارائه شده در فصل سوم به منظور شبیه سازی تأثیر رگولاتور، در مرحله محاسبه جریان تجمعی می‌بایست در صورت وجود رگولاتور مقدار جریان را به صورت جداگانه محاسبه و به سایر باس‌های متصل به آن اضافه نمود. شکل زیر نمایش سیستم در حالت بدون رگولاتور می‌باشد.



شکل (۴-۱۵) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پریونیت) سیستم ۳۴ باسه در حالت بدون رگولاتور



با توجه به شکل بالا، مقدار ولتاژ در باس‌های ۸ و ۲۰ روند کاهشی داشته است.

جدول (۵-۴) - نتایج حاصل از پخش بار سیستم ۳۴ باسه

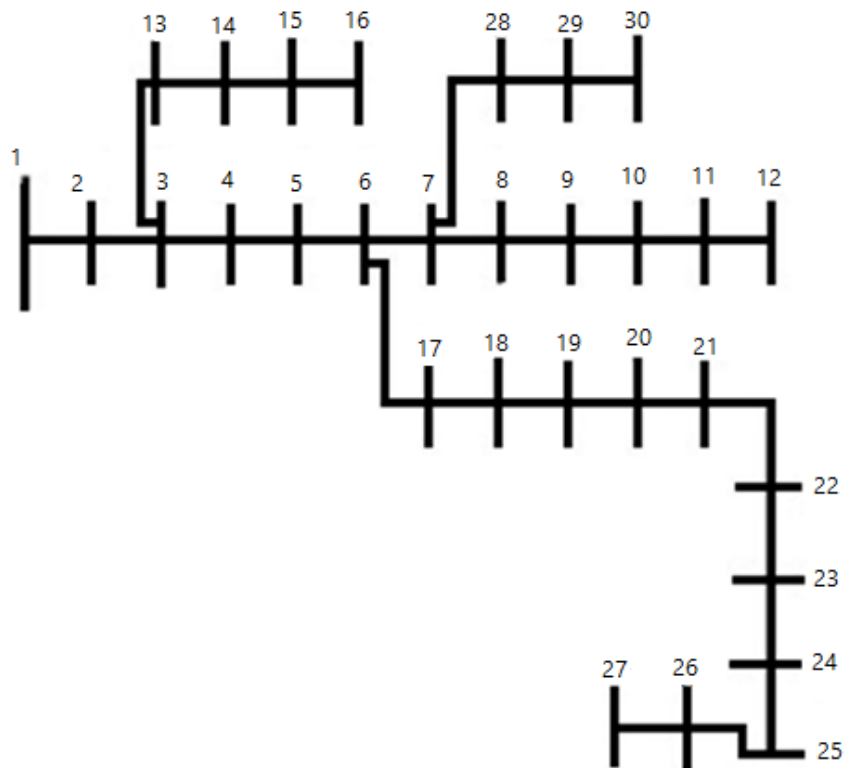
شماره باس IEEE	شماره باس	فاز a	فاز b	فاز c
۸۰۰	۱	۱/۰.۵	۱/۰.۵	۱/۰.۵
۸۰۲	۲	۱/۰.۴۸۳	۱/۰.۴۸۶	۱/۰.۴۸۳
۸۰۶	۳	۱/۰.۴۷۱	۱/۰.۴۷۶	۱/۰.۴۷۲
۸۰۸	۴	۱/۰.۲۵۷	۱/۰.۲۹۵	۱/۰.۲۶۶
۸۱۰	۵		۱/۰.۲۹۵	
۸۱۲	۶	۱/۰.۰۰۹	۱/۰.۰۸۸	۱/۰.۰۲۸
۸۱۴	۷	۰/۹۸۰.۹	۰/۹۹۲.۰	۰/۹۸۳.۶
۸۵۰	۸	۱/۰.۱۱۳	۱/۰.۲۲۷	۱/۰.۱۴۱
۸۱۶	۹	۱/۰.۱۱۰	۱/۰.۲۲۵	۱/۰.۱۳۸
۸۱۸	۱۰	۱/۰.۱۰۹		
۸۲۰	۱۱	۱/۰.۱۰۹		
۸۲۲	۱۲	۱/۰.۱۰۹		
۸۲۴	۱۳	۱/۰.۰۱۶	۱/۰.۱۴	۱/۰.۰۴۶
۸۲۶	۱۴		۱/۰.۱۴	
۸۲۸	۱۵	۱/۰.۰۰۸	۱/۰.۱۳۴	۱/۰.۰۳۹
۸۳۰	۱۶	۰/۹۸۲.۰	۰/۹۹۶.۵	۰/۹۸۵.۶
۸۵۴	۱۷	۰/۹۸۱.۵	۰/۹۹۶.۱	۰/۹۸۵.۱
۸۵۶	۱۸		۰/۹۹۶.۱	
۸۵۲	۱۹	۰/۹۴۸.۵	۰/۹۶۸.۵	۰/۹۵۳.۱
۸۳۲	۲۰	۱/۰.۳۱	۱/۰.۵۰۸	۱/۰.۳۶
۸۸۸	۲۱	۰/۹۴۵.۹	۰/۹۶۴.۱	۰/۹۸۹.۶
۸۹۰	۲۲	۰/۹۴۵.۸	۰/۹۶۴.۰	۰/۹۵۰.۵
۸۵۸	۲۳	۱/۰.۲۹۷	۱/۰.۴۹۷	۱/۰.۳۴۸
۸۶۴	۲۴		۱/۰.۴۹۷	
۸۳۴	۲۵	۱/۰.۲۸۳	۱/۰.۴۸۴	۱/۰.۳۳۴
۸۴۲	۲۶	۱/۰.۲۸۳	۱/۰.۴۸۴	۱/۰.۳۳۴
۸۴۴	۲۷	۱/۰.۲۹۵	۱/۰.۴۸۳	۱/۰.۳۳۴
۸۴۶	۲۸	۱/۰.۲۸۳	۱/۰.۴۸۳	۱/۰.۳۳۴
۸۴۸	۲۹	۱/۰.۲۸۲	۱/۰.۴۸۳	۱/۰.۳۳۱
۸۶۰	۳۰	۱/۰.۲۸۳	۱/۰.۴۸۴	۱/۰.۳۳۱
۸۳۶	۳۱	۱/۰.۲۸۲	۱/۰.۴۸۴	۱/۰.۳۳۱
۸۶۲	۳۲	۱/۰.۲۸۲	۱/۰.۴۸۴	۱/۰.۳۲۴
۸۳۸	۳۳		۱/۰.۴۸۴	
۸۴۰	۳۴	۱/۰.۲۸۲		

خانه‌های رنگی جدول نشان‌دهنده تک فاز بودن خط در شاخه‌های فرعی می‌باشد.

#### ۹-۴ پخش بار در سیستم تست ۳(C-۱)

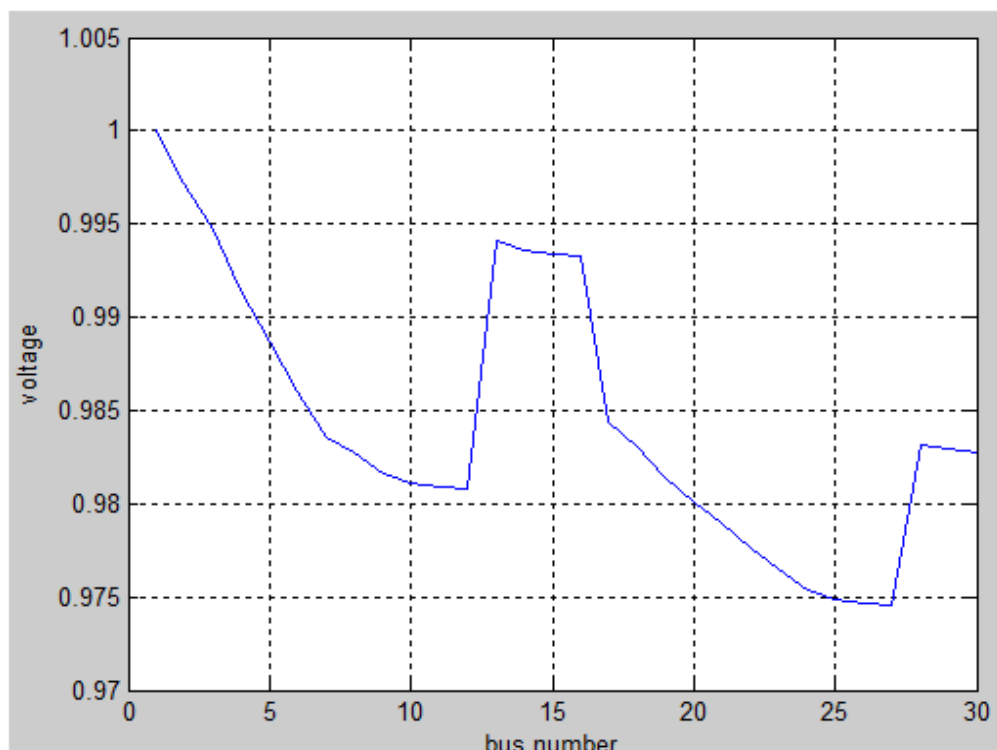
۱- پخش بار در سیستم  
تست ۳ در حضور بارهای  
وابسته به ولتاژ

همان‌طور که در فصل‌های قبل توضیح داده شده اکثر بارها وابسته به ولتاژ می‌باشند. در نظر گرفتن این ویژگی، باعث می‌شود که نتایج پخش بار به واقعیت نزدیک‌تر گردد. سیستم تست در نظر گرفته شده برای این بخش یک سیستم ۳۰ باسه می‌باشد. شماتیک تک‌خطی این سیستم در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل (۹-۴) - شماتیک تک‌خطی سیستم ۳۰ باسه [۴۴]

همان طور که در بخش ۳-۷ فصل قبل توضیح داده شد، تفاوت الگوریتم تحلیل پخش بار در صورت وجود بارهای وابسته به ولتاژ و عدم حضور این بارها در این است که در هر مرحله می‌بایست علاوه بر جریان، مقدار توان اکتیو و راکتیو بروز گردد. در این بخش شبیه‌سازی در حضور مدل بار وابسته به ولتاژ، انجام می‌گیرد. شکل زیر پروفیل ولتاژ سیستم را نشان می‌دهد:



شکل (۴-۱۷) - پروفیل ولتاژ (بر حسب پیرونیت) سیستم ۳۰ باسه در حضور بارهای وابسته به ولتاژ

همان طور که در شماتیک تک‌خطی مشاهده می‌شود که در باس‌های ۱ تا ۱۲ به دلیل افت ولتاژ در خط، ولتاژ روند کاهشی در بر دارد. باس‌های ۱۳ تا ۱۶ شاخه فرعی باس ۳ می‌باشند که نسبت به باس‌های قبل مقدار ولتاژ بیشتری خواهند داشت. به همین ترتیب در باس‌های ۱۶ تا ۲۷ به عنوان شاخه فرعی باس ۶ افت ولتاژ خواهیم داشت اما در باس‌های ۲۸ تا ۳۰ به دلیل نزدیکی به باس ۷ مقدار ولتاژ بیشتری

نسبت به باس‌های قبل خواهند داشت. مقدار پیک ولتاژ در باس‌های ۱۳ تا ۱۵ به دلیل نزدیکی به باس مرجع می‌باشد.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و تحلیل نتائج

## ۵-۱ نتیجه گیری

مسائل و مشکلات مربوط به شبکه‌های توزیع نسبت به شبکه‌های انتقال متفاوت و در عین حال منحصر به فرد است. این امر به خاطر ساختار شعاعی، تعدد و پراکندگی بارهای متصل به شبکه ولتاژ پایین، دوری از منابع تولید و گستردگی شبکه توزیع می‌باشد. به همین دلیل روش‌های پخش بار در شبکه‌های توزیع متفاوت از روش‌های پخش بار که برای شبکه‌های انتقال به کار می‌رود، می‌باشد. در شبکه‌های توزیع مسائلی از قبیل عدم تعادل، مدل بار و وجود واحدهای تولید پراکنده نقشی اساسی در تعیین ولتاژ باس‌ها و توان عبوری از خطوط ایفا می‌کنند. تاکنون روش‌های زیادی برای انجام پخش بار در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در بعضی از این روش‌ها مدل سازی واحدهای تولید پراکنده مدنظر قرار گرفته است و بعضی از روش‌ها برای شبکه‌های نامتعادل توسعه داده شده‌اند. بنابراین ارائه‌ی روشی که همه‌ی مسائل مذکور را به طور همزمان پوشش دهد کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در این پایان‌نامه با توسعه‌ی روش پسرو - پیشرو که به طور متداول برای پخش بار شبکه‌های توزیع به کار می‌رود، روشی ارائه شده است که می‌تواند به طور همزمان عدم تعادل شبکه توزیع (پخش بار سه فاز)، وجود واحدهای تولید پراکنده در شبکه (در هر دو مود عملکرد کنترل توان راکتیو و کنترل ولتاژ) و مدل‌های مختلف بار را در نظر گرفته و یک تحلیل جامع از وضعیت استاتیک شبکه توزیع ارائه دهد.

## ۵-۲ پیشنهادات

۱- استفاده از روش ماتریس حساسیت در مدل‌سازی منابع تولید پراکنده کنترل ولتاژ در سیستم‌های بزرگ‌تر دارای محاسبات زیادی خواهد بود. لذا روشی که بتواند به‌طور ساده‌تر و در عین حال دقیق به مدل‌سازی این منابع بپردازد، یکی از اهداف بهبود الگوریتم پسرو - پیشرو می‌باشد.

- ۲- الگوریتم پسرو - پیشرو در حضور بارهای نامتعادل که نوسانات زیادی به سیستم وارد می‌سازند بسیار پیچیده خواهد شد. در نظر گرفتن محدودیت‌هایی که علاوه بر حفظ دقت نتایج، محاسبات را کاهش دهد از جمله روش‌های بهبود این الگوریتم می‌باشد.
- ۳- اگر شبکه توزیع کاملاً شعاعی نباشد، الگوریتم پسرو - پیشرو پاسخگو نمی‌باشد بنابراین می‌بایست در روش موردنظر در حضور این شبکه‌ها تغییراتی حاصل گردد.
- ۴- خطوط شبکه‌های سه فاز مورد مطالعه در این پایان‌نامه، شبکه‌ای دارای سه سیم می‌باشد. این روش همچنین می‌تواند بر روی شبکه‌هایی با ۴ سیم پیاده‌سازی گردد.





مراجع

1. Giridhar, M.S. and S. Sivanagaraju, *Analysis Of Three Phase Unbalanced Radial Distribution Networks With Interval Arithmetic*. Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008 p. 1-6.
2. Costa, V.M.d., N. Martins, and J.L.R. Pereira, *Developments in the Newton–Raphson Power Flow Formulation Based on Current Injections*. IEEE Trans. on Power Systems, 1999. 14.
3. Rajicic, D. and A. Bose, *A modification to the fast decoupled power flow for networks with high R/X ratios*. IEEE Transactions on Power Systems, 1988. 3: p. 743-746.
4. Ou, T.C. and W.M. Lin, *A novel Z-matrix algorithm for distribution power flow solution*. IEEE Bucharest PowerTech, 2009: p. 1-8.
5. Kersting, W.H., *A Method to Teach the Design and Operation of a Distribution System*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984. PAS-103: p. 1945-1952.
6. Ivic, D., et al ., *Weakly meshed distribution networks with distributed generation - power flow analysis using improved impedance matrix based algorithm*. International Symposium on Industrial Electronics (INDEL), 2016: p. 1-6.
7. Goswami, S.K. and S. K. Basu, *Direct solution of distribution systems*. IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution, 1991 :١٣٨ .p. 78-88.
8. Chiang, H., *A decoupled load flow method for distribution power networks: algorithms, analysis and convergence study*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1991. 13(3): p. 130-138.
9. Ghosh, S. and D. Das, *Method for load-flow solution of radial distribution networks*. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1999. 146: p. 641-648.
10. P. A. N. Garcia, J. L. R. Pereira, S. Carneiro, V. M. da Costa and N. Martins, *Three-phase power flow calculations using the current injection method*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000. 15: p. 508-514.
11. Teng, J., *A direct approach for distribution system load flow solutions*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003. 18: p. 882-887.

12. Shirmohammadi, D., et al., *A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks*. in IEEE Transactions on Power Systems, 1988. 3: p. 753-762.
13. Bathini, V., R. Nagaraja, and K. Parthasarathy, *A generalized three phase power flow program for electrical power and distribution system analysis*. International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO), 2015: p. 1-6.
14. Eminoglu, U. and M.H. Hocaoglu, *A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models*. Electric Power Systems Research, 2005. 76: p. 106-114.
15. Ackermann, T., G. Andersson, and L. Sder, *Distributed generation: a definition*. Electric power systems research, 2001. 57: p. 195-204.
۱۶. جی. سی. داس، ۱۳۸۵، *بررسی سیستم های قدرت*، جلد دوم، وحیدی ب، بانک توکلی م، البرزی م، شریعتی نسب ر، انتشارات گل آفتاب، مشهد، ص ۶۸۹-۷۱۸.
17. Martinez, J.A. and J. Mahseredjian, *Load flow calculations in distribution systems with distributed resources. A review*. IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 2011: p. 1-8.
18. Mashhour, E. and S.M. Moghaddas-Tafreshi, *Three-phase backward/forward power flow solution considering three-phase distribution transformers*. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009: p. 1-5.
19. Ciric, R.M., A.P. Feltrin, and L.F. Ochoa, *Power flow in four-wire distribution networks-general approach*. IEEE Transactions on Power Systems, 2003. 18: p. 1283-1290.
20. Chen, T.H., et al., *Three-phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991. 6: p. 1671-1681.
21. Dugan, R.C. and S. Santoso, *An example of 3-phase transformer modeling for distribution system analysis*. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition 2003. 3: p. 1028-1032
22. Alam, M.J.E., K.M. Muttaqi, and D. Sutanto, *A Three-Phase Power Flow Approach for Integrated 3-Wire MV and 4-Wire Multigrounded LV Networks With Rooftop*

- Solar PV*. IEEE Transactions on Power Systems, 2013. 28: p. 1728-1737.
23. Watson. J.D, N.R. Watson, and B. Das, *Effectiveness of power electronic voltage regulators in the distribution network*. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016. 10: p. 3816-3823.
  24. Gallego, L.A. and A. Padilha-Feltrin, *Voltage regulator modeling for the three-phase power flow in distribution networks*. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 200 :^p. 1-6.
  25. Louie, K.W. and J.R. Marti, *A method to improve the performance of conventional static load models*. IEEE Transactions on Power Systems, 2005. 20: p. 507-508.
  26. Palm, S. and P. Schegner, *Static and transient load models taking account voltage and frequency dependence*. Power Systems Computation Conference (PSCC), 2016: p. 1-7.
  27. Kumar, K.V. and M.P. Selvan, *A Simplified Approach for Load Flow Analysis of Radial Distribution Network*. International Journal of Computer, Information, and Systems Science, and Engineering, 2008. 2: p. 271-282.
  28. Marti, J.R., H. Ahmadi, and L. Bashualdo, *Linear Power-Flow Formulation Based on a Voltage-Dependent Load Model*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013. 28: p. 1682-1690.
  29. Segura, S., L.C.P.D. Silva, and R. Romero, *Generalised single-equation load flow method for unbalanced distribution systems*. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011. 5: p. 347-355.
  30. Abapour, S., K. Zare, and B. Mohammadi-Ivatloo, *Dynamic planning of distributed generation units in active distribution network*. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015. 9: p. 1455-1463.
  31. Singh, R.K. and S.K. Goswami, *Optimum allocation of distributed generations based on nodal pricing for profit, loss reduction, and voltage improvement including voltage rise issue*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010. 32(6): p. 637-644.
  32. Elsaiah, S., M. Benidris, and J. Mitra, *A three-phase power flow solution method for unbalanced distribution networks*. North American Power Symposium, 2011: p. 1-8.

33. Hadjsaid, N., J.F. Canard, and F. Dumas, *Dispersed generation impact on distribution networks*. IEEE Computer Applications in Power, 1999. 12: p. 22-28.
34. Cheng, C., et al., *Calculation method and analysis of power flow for distribution network with distributed generation*. 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015: p. 2020-2024.
35. Jagtap, K.M. and D.K. Khatod, *Loss allocation in radial distribution networks with various distributed generation and load models*. 173-186, 2016. 75.
38. Zhao, J., et al., *Unbalanced three-phase continuation power flow for distribution networks with distributed generation*. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015: p. 1-5.
39. Balamurugan, K. and D. Srinivasan, *Review of power flow studies on distribution network with distributed generation*. IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2011: p. 411-417.
40. Alinjak, T., I. Pavić, and M. Stojkov, *Improvement of backward/forward sweep power flow method by using modified breadth-first search strategy*. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017. 11: p. 102-109.
41. Mamdouh, A. and M. Karar, *Implementation of three-phase transformer model in radial load-flow analysis*. Ain Shams Engineering Journal, 2013. 4(1): p. 65-73.
42. R. Ranjan, B. Venkatesh, A. Chaturvedi, D. Das, *Electric Power Components And Systems*, 2004. 32.
43. Radial Test Feeders-IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, available at: [www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html](http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html). Nov 2016.

۴۴. مشهور ا، تفرشی م، "پخش بار شبکه توزیع در حضور منبع تولید پراکنده"، چهارمین کنفرانس شبکه های

توزیع نیروی برق، تهران



پوست‌ها

## پیوست A:

## اطلاعات شبکه تست ۱: شبکه ۱۹ باسه

جدول زیر مقدار توان ظاهری بار هر باس (Sa، Sb، Sc)، طول خط (L)، نوع ماتریس امپدانس

خطوط (Type-z) و باس‌های مبدا (bus1) و مقصد (bus2) را مشخص می‌کند.

جدول (پ-۱)-اطلاعات شبکه تست ۱ (شبکه ۱۹ باسه)

bus1	bus2	Type-z	L	Sa	Sb	Sc
1	1	2	1	3	10.38+5.01i	5.19+2.52i
10.38+5.01i						
2	2	3	1	5	11.01+5.34i	5.19+2.52i
9.72+4.71i						
3	2	4	1	1.5	4.05+1.95i	5.67+2.76i
6.48+3.15i						
4	4	5	1	1.5	6.48+3.15i	5.19+2.52i
4.53+2.19i						
5	4	6	1	1	4.20+2.04i	3.09+1.5i
2.91+1.41i						
6	6	7	1	2	9.72+4.71i	8.1+3.93i
8.1+3.93i						
7	6	8	1	2.5	7.44+3.60i	5.34+2.58i
3.39+1.65i						
8	8	9	1	3	12.3+5.97i	14.91+7.23i
13.29+6.42i						
9	9	10	1	5	3.39+1.65i	4.20+2.04i
2.58+1.26i						
10	10	11	1	1.5	7.44+3.60i	7.44+3.60i
11.01+5.34i						
11	10	12	1	1.5	9.72+4.71i	8.1+3.93i
8.1+3.93i						
12	11	13	1	5	4.38+2.13i	5.34+2.58i
6.48+3.15i						
13	11	14	1	1	3.09+1.50i	3.09+1.5i
4.05+1.95i						
14	12	15	1	5	4.38+2.13i	4.86+2.34i
6.96+3.36i						
15	12	16	1	6	7.77+3.78i	10.38+5.01i
7.77+3.78i						
16	14	17	1	3.5	6.48+3.15i	4.86+2.34i



4.86+2.34i							
17	14	18	1	4	5.34+2.58i	5.34+2.58i	
5.52+2.67i							
18	15	19	1	4	8.76+4.23i	10.05+4.86i	
7.14+3.45i							

ماتریس امپدانس خطوط به صورت زیر خواهد بود:

Configuration :

15609+67155i	5203+22385i	5203+22385i
5203+22385i	15609+67155i	5203+22385i
5203+22385i	5203+22385i	15609+67155i

پیوست B:

### اطلاعات شبکه تست ۱: شبکه ۳۴ باسه

اطلاعات شبکه ۳۴ باسه شامل طول خطوط (Length)، نوع ماتریس خطوط (Config)، گره مبدا

(Node A) و گره مقصد (Node B) در جدول زیر نمایش داده شد است:

جدول (پ-۲)-اطلاعات شبکه تست ۲ (شبکه ۳۴ باسه)

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
800	802	2580	300
802	806	1730	300
806	808	32230	300
808	810	5804	303
808	812	37500	300
812	814	29730	300
814	850	10	301
816	818	1710	302
816	824	10210	301
818	820	48150	302
820	822	13740	302
824	826	3030	303
824	828	840	301
828	830	20440	301

830	854	520	301
832	858	4900	301
832	888	0	XFM-1
834	860	2020	301
834	842	280	301
836	840	860	301
836	862	280	301
842	844	1350	301
844	846	3640	301
846	848	530	301
850	816	310	301
852	832	10	301
854	856	23330	303
854	852	36830	301
858	864	1620	303
858	834	5830	301
860	836	2680	301
862	838	4860	304
888	890	10560	300

شکل خطوط در سیستم ۳۴ باسه به صورت زیر می باشد. بعضی از خطوط سیستم تک فاز و برخی

سه فاز می باشند:

جدول (پ-۳) - اطلاعات خطوط شبکه تست ۲

B A C N	300
B A C N	301
A N	302
B N	303
B N	304

اطلاعات مربوط به بارهای متراکم و بارهای توزیع شده در جدول های (پ-۴) و (پ-۵) خلاصه شده

است:

جدول (پ-۴) - اطلاعات بارهای متراکم شبکه تست ۲

Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-4
	Model	Kw	kVAr	Kw	kVAr	Kw	kVAr

860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105
848	D-PQ	20	16	20	16	20	16
890	D-I	150	75	150	75	150	75
830	D-Z	10	5	10	5	25	10

جدول (پ-۵)- اطلاعات بارهای توزیع شده شبکه تست ۲

Node	Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
A	B	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22
836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0

ماتریس‌های امپدانس در خطوط مختلف سیستم ۳۴ باسه به صورت زیر می‌باشند. این ماتریس‌ها

مقارن می‌باشند و عناصر مقارن در ماتریس نشان داده نشده است.

Configuration 300:

1.3368 1.3343 0.2101 0.5779 0.2130 0.5015  
 1.3238 1.3569 0.2066 0.4591  
 1.3294 1.3471

Configuration 301:

1.9300 1.4115 0.2327 0.6442 0.2359 0.5691  
 1.9157 1.4281 0.2288 0.5238  
 1.9219 1.4209

Configuration 302:

2.7995 1.4855 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000  
 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000  
 0.0000 0.0000

Configuration 303:

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000  
 2.7995 1.4855 0.0000 0.0000  
 0.0000 0.0000

Configuration 304:

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000  
 1.9217 1.4212 0.0000 0.0000  
 0.0000 0.00

پیوست C:

### اطلاعات شبکه تست ۳: شبکه ۳۰ باسه

جدول زیر اطلاعات سیستم تست ۳ (شبکه ۳۰ باسه) شامل باس مبدا (Bus1) باس مقصد (Bus2)،

امپدانس خط (Z)، توان‌های اکتیو و راکتیو (P و Q) را نشان می‌دهد:

جدول (پ-۶) - اطلاعات شبکه تست ۳

Bus1	Bus2	Z	P	Q
1	2	0.0967+0.0397i	0.0042	0.0026
2	3	0.0886+0.0364i	0	0
3	4	0.1359+0.0377i	0.0042	0.0026
4	5	0.1236+0.0343i	0.0042	0.0026
5	6	0.1236+0.0343i	0	0
6	7	0.2598+0.0446i	0	0
7	8	0.1732+0.0298i	0.0042	0.0026

8	9	0.2598+0.0446i	0.0042	0.0026
9	10	0.1732+0.0298i	0.0041	0.0025
10	11	0.1083+0.0186i	-0.0064	-0.0028
11	12	0.0866+0.0149i	0.0025	0.0015
3	13	0.1299+0.0223i	0.0011	0.0007
13	14	0.1732+0.0298i	0.0011	0.0007
14	15	0.0866+0.0149i	0.0011	0.0007
15	16	0.0433+0.0074i	0.0002	0.0001
6	17	0.1483+0.0412i	0.0044	0.0027
17	18	0.1359+0.0377i	0.0044	0.0027
18	19	0.1718+0.0391i	0.0044	0.0027
19	20	0.1562+0.0355i	0.0044	0.0027
20	21	0.1562+0.0355i	-0.0241	-0.0066
21	22	0.1562+0.0355i	0.0044	0.0027
22	23	0.2165+0.0372i	0.0044	0.0027
23	24	0.2598+0.0446i	0.0044	0.0027
24	25	0.1732+0.0298i	0.0044	0.0027
25	26	0.1083+0.0186i	-0.0136	-0.0031
26	27	0.0866+0.0149i	0.0026	0.0016
7	28	0.1299+0.0223i	0.0017	0.0011
28	29	0.1299+0.0223i	0.0017	0.0011
29	30	0.1299+0.0223i	0.0017	0.0011



## **Abstract**

Power flow is one of the major issues in the steady state system analysis which is used for planning operations and evaluation of the performance of a power system. In the presence of distributed generation (DG) sources and with respect to the characteristics of a distribution network, it is not feasible to use conventional power flow methods. Hence, it is necessary to find an effective method with simple and accurate calculation is sensible. Generally, of the loads considered to be constant power. However, some of them are voltage dependent load that are approximated by exponential functions and polynomials. Moreover, existence of unbalanced loads, makes the system to be unbalanced. The imbalance increases with load increasing.

In this thesis, the backward-forward approach is used as one of the most widespread methods with low computational complexity and proper accuracy in flow analysis of distribution systems. The proposed approach consists of two main steps. In the first step (the backward step), current calculations is started from the end of the system to the reference point and. In the second step (the forward step) the voltage calculations is started from the reference point to the end of the system. The approaches repeated until the suitable convergence is attained. In the power flow computations the required components in flow analysis of distribution systems will be modeled. In the equations of the power flow the load models and unbalanced loads as well as DG sources are considered. The proposed algorithm is implemented on three standard test systems and all simulations are performed in MATLAB. The simulation results show that the proposed algorithm is fully capable to perform power flow considering load models, unbalanced loads and DG resources.

**Keywords:** Distrubtion system, power flow, Distributed generation, Load models, Three phase lines, Voltage regulators



**Faculty of Electrical Engineering and Robotic**  
**M.Sc. Thesis in electrical Power Systems Engineering**

**Load Flow in Distribution Networks in the Presence of  
Distributed Generation Considering Load Model**

**By: Sedigheh Askari**

**Supervisor:**

**Dr.Mahdi Banejad**

**Advisor:**

**Dr.Mohammad Jafarian**

**January 2017**



