دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی برق- قدرت

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق - قدرت

عنوان

حل مسأله پخش بار با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند

استادان راهنما

پروفسور مهرداد طرفدار حق

دکتر سعید قاسم‌زاده

پژوهشگر

الناز داودی

بهمن ماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به پدر و مادر نازنینم به پاس تمام زحمات بی دریغشان

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم ودانش تلاش نمایم . والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چراکه این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی ام بوده اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند...

تقدیم با بوسه بر دستان مادرم...

دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

عمری خستگی ها را به جان خریدی تا اکنون توانستی طعم خوش

پیروزی را به من بچشانی

تقدیم با عشق به پدرم...

به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا مردانگی، سخاوت، سکوت، مهربانی و.....

اکنون حاصل دستان خسته ات رمز موفقیتم شد

و

تقدیم به برادر و خواهرانم

که با خنده من خندیدند و با گریه من گریستند

تقدیر و تشکر

بنام او که هر چه دارم از اوست...

ای هستی بخش، وجود مرا بر نعمات بی کرانت توان شکر نیست، ذره ذره وجودم برای تو و نزدیک شدن به تو می تپد.

الهی مرا مدد کن تا دانش اندکم نه نردبانی باشد برای فزونی تکبر و غرور، نه حلقه ای برای اسارت و نه دستمایه ای برای تجارت، بلکه گامی باشد برای تجلیل از تو و متعالی ساختن زندگی خود و دیگران.

به پایان رسیدن پژوهش حاضر پس از لطف و عنایت خدای بزرگ، مرهون یاری عزیزانی است که کریمانه بذر عنایت بر فشاندند و ذکر نامشان را نه به جبران زحمات بی دریغشان بلکه اظهار مراتب قدرشناسی ام از آن بزرگواران بر خود واجب می دانم.

در ابتدا صمیمانه ترین تقدیرها تقدیم به **پدر، مادر، برادر و خواهران** عزیز و مهربانم که همواره حامی و مشوق من بوده اند و پیمودن روزهای دشوار و سهل زندگی ام بدون دعای خیر و برکت وجودشان غیر ممکن بود.

از استاد راهنمای اولم جناب آقای **پروفسور مهردار طرفدار حق** که با سعه صدر و صبوری مرا راهنمایی نموده و با ارائه نظرات سازنده و رهنمودهای بی-دریغشان در پیشبرد این پایان نامه سعی تمام مبذول داشتند، صمیمانه سپاسگذارم.

از استاد راهنمای دوم جناب آقای **دکتر سعید قاسم زاده** به پاس رهنمودهای ارزنده و همکاری صمیمانه شان، کمال تشکر را دارم.

از داور محترم جناب آقای **دکتر کاظم زارع** که زحمت بازخوانی و داوری این مجموعه را بر عهده داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

از جناب آقای **مهندس نادر حقی** بسیار سپاسگذارم چرا که بدون راهنمایی های ایشان تأمین این پایان نامه بسیار مشکل می نمود.

و در نهایت از تمامی دوستان و همکلاسهای عزیزم که با هم اندیشی برخی گره های ناگشوده را برگشودند و در طول این مدت افتخار آشنایی و مصاحبت با آن ها را داشتم، به پاس محبت های بی دریغشان سپاسگذارم.

نام خانوادگی: داودی **نام:** الناز

عنوان پایان‌نامه: حل مسأله پخش بار با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند

استاد راهنمای اول: پروفسور مهرداد طرفدار حق

استاد راهنمای دوم: دکتر سعید قاسم‌زاده

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق قدرت **گرایش:** الکترونیک‌قدرت **دانشگاه:** تبریز

دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر **تاریخ فارغ‌التحصیلی: ۹۰/۱۱/۱۵ تعداد صفحه:**۸۷

کلید واژه‌ها: پخش بار، شرایط بحرانی، الگوریتم‌های هوشمند، IQPSO، QPSO، PSO، NM، پاسخ‌های ولتاژ پایین، محدودیت توان راکتیو ژنراتورها

چکیده:

مطالعات پخش بار، بخش مهمی از تجزیه و تحلیل سیستم قدرت را تشکیل می‌دهد. مسأله پخش بار به محاسبه کمیت-های الکتریکی سیستم قدرت در حالت ماندگار به ازاء بارهای مشخص و معلوم می پردازد. این کمیت‌ها شامل ولتاژشین‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورها وقدرت‌های اکتیو و راکتیو جاری در خطوط انتقال می‌باشند. بهترین شیوه نظارت بر چنین حجم عملیات بزرگی استفاده از روش‌های کامپیوتری در حل مسأله پخش بار است. روش‌های متداولی نظیر نیوتن-رافسون و مشتقات آن در مطالعات سیستم‌های قدرت برای زمان طولانی خوب رفتار کرده‌اند و در حل بیشتر مسائل پخش بار با قدرت عمل می‌کنند، ولی در سیستم‌های بدساختار (سیستم‌های با نسبت $\frac{R}{X}$ بالا) و یا در حضور بارهای غیرخطی و برخی شرایط بحرانی شبکه (نظیر افزایش مقدار بارگذاری سیستم) کارآیی ندارند و یا پاسخ‌های غیرعملی می‌دهند. این امر به دلیل وجود ماتریس ژاکوبین این روش‌ها می باشد که در بعضی شرایط به سوی منفرد شدن پیش می‌رود. لذا روش‌های جدیدتر، که مشکلات مربوط به ماتریس ژاکوبین را نداشته باشند مورد نیاز است.

در این پایان‌نامه، روش تکاملی جدیدی بر مبنای الگوریتم ترکیبی IQPSO و نلدر- مید، برای تحلیل پخش بار معرفی می‌شود. به منظور عملکرد بهتر الگوریتم، یک پارامتر کنترلی منحصربه‌فرد و ابداعی جدید در این الگوریتم طراحی شده که موجب بهبود کارایی روش QPSO شده است. الگوریتم به دست آمده تحت عنوان IQPSO نامگذاری شده است. همچنین به منظور افزایش دقت همگرایی قابل اطمینان و غلبه بر محدودیت‌ها و معایب الگوریتم IQPSO، آن را با روش نلدر- مید که یک نوع الگوریتم ریاضی بر مبنای جستجوی محلی است، ترکیب کرده‌ایم. روش پیشنهادی جدید که آن را الگوریتم هیبریدی IQPSO-NM نامیده‌ایم تا کنون در هیچ زمینه‌ای استفاده نشده و روش جدیدی است.

هدف از ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی IQPSO و الگوریتم نلدر- مید، به دست آوردن الگوریتمی است که علاوه بر دارا بودن مزیت‌های دو الگوریتم فوق، محدودیت‌های الگوریتم‌های مذکور نیز در آن وجود نداشته باشد. الگوریتم پیشنهادی دارای قابلیت جستجوی سراسری و محلی بوده و عملکرد آن به انتخاب اولیه ی نقاط وابسته نمی‌باشد.

به منظور اثبات و تأیید عملکرد الگوریتم پیشنهادی پخش بار، الگوریتم مورد نظر بر روی سیستم‌های ۱۴، ۳۰ و ۵۷ باسه استاندارد IEEE در شرایط نرمال و در حالت بار پایه آزمایش شده و نتایج آن با الگوریتم متعارف نیوتن رافسون و الگوریتم-های PSO، QPSO و IQPSO مقایسه شده است. سپس عملکرد روش هیبرید پیشنهادی بر روی سیستم‌های بدساختار و یا سیستم‌هایی با بار سنگین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

به منظور در نظر گرفتن محدودیت باس‌های ژنراتور، تابع هدف جدیدی در این پایان‌نامه پیشنهاد شده است که در

صورت تخطی توان راکتیو باس‌های ژنراتور از محدوده تعریف شده عبارتی به تابع هدف اولیه می‌افزاید و با برگشتن مقادیر توان راکتیو به محدوده مورد نظر، عبارت مذکور از تابع هدف حذف می‌شود. در این حالت ولتاژ باس‌های ژنراتور به عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شوند. نتایج حاصل نشان از کارآمد بودن تابع هدف پیشنهادی است.

یکی دیگر از ویژگی‌های الگوریتم پیشنهادی که از جمله ضعف‌های الگوریتم‌های سنتی محسوب می‌شود، محاسبه پاسخ‌های متعدد کم‌ولتاژ می‌باشد، که نمونه‌هایی از پاسخ‌های غیرعادی سیستم ۱۴ باسه آورده شده است.

نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم‌های مختلف، نشان از قابلیت روش موردنظر در حل مسائل پخش بار با دقت خوب و قابلیت اطمینان بالا است. لذا می‌توان الگوریتم پیشنهادی IQPSO-NM را به عنوان یکی از روش‌های نوین در حل مسأله پخش بار به ویژه در شرایط بحرانی معرفی کرد.

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

فهرست شکل‌ها.....IV

فهرست جدول‌ها.....V

فصل اول: بررسی منابع.....۱

۱-۱- مقدمه.....۲

۱-۲- بررسی مسأله‌ی پخش بار.....۲

۱-۲-۱- معادلات پخش بار و فرمول‌بندی مسأله.....۳

۱-۲-۱-۱- معادلات اساسی و انواع باس‌ها.....۳

۱-۲-۱-۲- محاسبه مقادیر عدم تطابق توان و تعیین معیار همگرایی.....۵

۱-۳- حداکثر مقدار بارگذاری و پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت.....۸

۱-۴- راه‌حل‌های غیر عادی حل مسأله پخش بار.....۸

۱-۵- روش‌های به کار رفته در پخش بار.....۱۰

۱-۵-۱- روش‌های عددی متداول به کار رفته در حل مسأله پخش بار.....۱۰

۱-۵-۱-۱- روش‌های ماتریس Y.....۱۰

۱-۵-۱-۲- روش‌های ماتریس Z.....۱۳

۱-۵-۱-۳- روش نیوتن رافسون.....۱۴

۱-۵-۲- الگوریتم‌های هوشمند به کار رفته برای حل مسأله‌ی پخش بار.....۱۷

۱-۵-۲-۱- الگوریتم ژنتیک (GA).....۱۸

۱-۵-۲-۱-۱- الگوریتم ژنتیک ساده.....۱۸

۱-۵-۲-۱-۲- الگوریتم ژنتیک مقید (CGA) و الگوریتم ژنتیک پیشرفته (ACGA).....۲۱

۱-۵-۲-۱-۳- الگوریتم ژنتیک دو مرحله‌ای.....۲۵

۱-۵-۲-۲- شبکه‌های عصبی مصنوعی.....۲۶

۱-۵-۲-۲-۱- شبکه عصبی.....۲۶

۱-۵-۲-۲-۱- شبکه هوش مصنوعی با ساختار Percetron چند مرحله‌ای.....۲۸

۱-۵-۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان (ACO).....۳۱

۱-۵-۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)..... ۳۲
۱-۶- نتیجه‌گیری..... ۳۴

فصل دوم: مواد و روش‌ها..... ۳۶

۲-۱- مقدمه..... ۳۷
۲-۲- بهینه‌سازی و طبقه‌بندی آن..... ۳۷
۲-۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی..... ۳۹
۲-۳-۱- بهینه‌سازی تحلیلی..... ۳۹
۲-۳-۲- بهینه‌سازی بر مبنای کمینه‌سازی خطی..... ۳۹
۲-۳-۳- روش‌های بهینه‌سازی طبیعی..... ۴۰
۲-۴- هوش جمعی..... ۴۰
۲-۵- مسأله پخش بار..... ۴۱
۲-۶- مواد و روش‌ها..... ۴۲
۲-۶-۱- الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات کلاسیک..... ۴۲
۲-۷- بهینه‌سازی توده ذرات با رفتار کوانتومی (QPSO)..... ۴۴
۲-۷-۱- تعیین موقعیت..... ۴۸
۲-۷-۲- بهینه‌سازی توده ذرات با رفتار کوانتومی بهبود یافته (IQPSO)..... ۵۱
۲-۸- روش نلدر-مید کلاسیک (NM)..... ۵۲
۲-۹- حل مسأله پخش بار با استفاده از الگوریتم ترکیبیِ بهینه‌سازی توده ذرات با
رفتار کوانتومی بهبودیافته و نلدر-مید (IQPSO-NM)..... ۵۷
۲-۱۰- حل مسأله پخش بار با استفاده از الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن محدودیت توان راکتیو
در باس‌های ژنراتور..... ۵۹
۲-۱۱- خلاصه و نتیجه‌گیری..... ۶۰

فصل سوم: نتایج و بحث..... ۶۲

۳-۱- مقدمه..... ۶۳
۳-۲- نتایج شبیه‌سازی..... ۶۳
۳-۲-۱- توصیف پارامترهای شبیه‌سازی..... ۶۳
۳-۲-۲- حل عادی پخش بار (سیستم‌های خوب‌ساختار)..... ۶۴

۳-۲-۳-مقایسه زمان..... ۶۸
۳-۲-۴-حل پخش بار سیستم‌های مورد مطالعه در شرایط بحرانی..... ۶۹
۳-۲-۴-۱- بررسی سیستم‌هایی با بار سنگین..... ۶۹
۳-۲-۴-۲- بررسی سیستم‌های بدساختار..... ۷۳
۳-۲-۵- پاسخ‌های غیر عادی پخش بار..... ۷۷
۳-۲-۶- حل مسأله پخش بار در نظر گرفتن توان راکتیو در باس‌های ژنراتور..... ۷۸
۳-۳- خلاصه..... ۸۱

نتیجه‌گیری..... ۸۲

پیشنهادات..... ۸۳

مراجع..... ۸۵

فهرست شکل‌ها

شماره شکل.....صفحه

شکل (۱-۱) دیاگرام اصلی و پایه‌ای الگوریتم‌های پخش بار.....۷

شکل (۱-۲) سیستم سه باسه.....۹

شکل (۱-۳) فلوچارت الگوریتم گوس سایدل برای حل پخش بار.....۱۲

شکل (۱-۴) فلوچارت الگوریتم نیوتن‌رافسون برای حل مسأله پخش بار.....۱۶

شکل(۱-۵) همگرایی الگوریتم EP.....۲۵

شکل (۱-۶) فلوچارت الگوریتم ژنتیک دو مرحله‌ای برای پخش بار.....۲۷

شکل (۱-۷) شبکه عصبی دو لایه.....۲۸

شکل (۱-۸) حل مسأله پخش بار پایه با استفاده از شبکه عصبی.....۲۹

شکل (۱-۹) مشخصه همگرایی الگوریتم Adaptive PSO بر روی سیستم ۳۰ باسه IEEE با تعداد جمعیت ۱۰۰ (population=100).....۳۴

شکل (۱-۱۰) مشخصه همگرایی الگوریتم Adaptive PSO بر روی سیستم ۱۱ باسه بدساختار با تعداد جمعیت ۱۰۰ (population=100).....۳۴

شکل (۲-۱) فلوچارت الگوریتم PSO.....۴۵

شکل(۲-۲) نمایش عمل انعکاس در فضای دو متغیره.....۵۳

شکل (۲-۳) نمایش عمل انقباض در فضای دومتغیره.....۵۵

شکل (۲-۴) فلوچارت پیشنهادی الگوریتم نلدر- مید.....۵۶

شکل(۳-۱) مجموع عدم تطابق توان روش‌های IQPSO-NM، IQPSO، QPSO و PSO برای سیستم ۱۴ باسه IEEE.....۶۵

شکل(۳-۲) ماکزیمم مقدار عدم تطابق توان روش‌های IQPSO-NM، IQPSO، QPSO و PSO برای سیستم ۱۴ باسه IEEE.....۶۵

شکل (۳-۳) مقایسه تغییرات ماکزیمم عدم تطابق توان روش‌های IQPSO-NM و NR برای سیستم ۳۰ باسه در شرایط بارگذاری ۳ برابر بار پایه بدون Q-limit.....۷۰

فهرست جدول‌ها

شماره جدول.....صفحه

جدول(۱-۱) راه‌حل‌های گوناگون سیستم سه باسه در شرایط نرمال.....۹

جدول (۱-۲) نتایج غیرعادی به دست آمده برای سیستم سه باسه Klos-Kerner.....۱۹

جدول (۱-۳) نتایج غیرعادی به دست آمده برای سیستم شش باسه Ward-Hale.....۲۰

جدول (۱-۴) بهترین نتایج به دست آمده برای سیستم سه باسه Klos-Kerner با استفاده از تابع fitness بهبود یافته.....۲۱

جدول (۱-۵) بهترین نتایج به دست آمده برای سیستم شش باسه Ward-Hale با استفاده از تابع fitness بهبود یافته.....۲۱

جدول (۱-۶) حل مسأله پخش بار شبکه ۳۰ باسه IEEE با الگوریتم ACGA.....۲۴

جدول (۱-۷) نتایج حل شبکه ۳۰ باسه IEEE با ضریب بارگذاری ۳/۰۶۸۶ برابر شرایط عادی با استفاده از الگوریتم Two-Stage GA.....۲۶

جدول (۱-۸) نتایج ولتاژ و زاویه شبکه‌های ۳۰ و ۵۷ باسه با استفاده از آموزش شبکه عصبی.....۳۰

جدول (۱-۹) نتایج ولتاژ و زاویه شبکه‌های ۳۰ و ۵۷ باسه با استفاده از الگوریتم نیوتن‌رافسون.....۳۰

جدول (۱-۱۰) نتایج ولتاژ و زاویه حل پخش بار شبکه ۱۰ باسه با استفاده از الگوریتم ACOو مقایسه آن با سایر روش‌ها.....۳۱

جدول (۳-۱) پارامترهای شبیه‌سازی.....۶۳

جدول (۳-۲) حل پخش بار سیستم ۱۴ باسه.....۶۶

جدول (۳-۳) حل پخش بار سیستم ۳۰ باسه.....۶۶

جدول (۳-۴) حل پخش بار سیستم ۵۷ باسه.....۶۷

جدول (۳-۵) مقایسه زمان کل همگرایی روش‌های نیوتن-رافسون و IQPSO-NM (بر حسب ثانیه).....۶۸

جدول (۳-۶) نتایج مقایسه ماکزیمم حد بارگذاری سیستم‌های مورد مطالعه بدون در نظر گرفتن محدودیت Q.....۶۹

جدول (۳-۷) نتایج پخش بار سیستم ۱۴ باسه ($Load_{Factor}$ =4.0227 initial loading).....۷۰

جدول (۳-۸) نتایج پخش بار سیستم ۳۰ باسه ($Load_{Factor}$ =3.0102 initial loading).....۷۱

جدول(۳-۹) نتایج پخش بار سیستم ۵۷ باسه ($Load_{Factor}$ =1.5839 initial loading).....۷۲

جدول (۳-۱۰) نتایج مقایسه روش پیشنهادی و الگوریتم NR برای سیستم‌های بدساختار.....۷۴

جدول (۳-۱۱) نتایج پخش بار سیستم ۱۴ باسه بدساختار.....۷۴

جدول (۳-۱۲) نتایج پخش بار سیستم ۳۰ باسه بدساختار.....۷۴

جدول (۳-۱۳) نتایج پخش بار سیستم ۵۷ باسه بدساختار.....۷۵

جدول (۳-۱۴) تعدادی از پاسخ‌های غیر عادی شبکه ۱۴ باسه IEEE در حالت استاندارد..... ۷۷
جدول (۳-۱۵) تعدادی از پاسخ‌های غیر عادی شبکه ۱۴ باسه IEEE در شرایط بحرانی..... ۷۷
جدول (۳-۱۶) ماکزیمم حد بارگذاری به دست آمده از الگوریتم‌های IQPSO-NM و
NR با در نظرگیری محدودیت توان راکتیو باس‌های PV..... ۷۸
جدول (۳-۱۷) نتایج پخش بار ماکزیمم حد بارگذاری سیستم ۱۴ باسه به دست آمده از
الگوریتم IQPSO-NM با درنظرگیری محدودیت Q..... ۷۸
جدول (۳-۱۸) نتایج پخش بار ماکزیمم حد بارگذاری سیستم ۳۰ باسه به دست آمده از
الگوریتم IQPSO-NM با درنظرگیری محدودیت Q..... ۷۹
جدول(۳-۱۹) نتایج پخش بار ماکزیمم حد بارگذاری سیستم ۵۷ باسه به دست آمده از
الگوریتم IQPSO-NM با درنظرگیری محدودیت Q..... ۸۰

فصل اول:

بررسی منابع

۱-۱- مقدمه

مطالعات پخش توان، که معمولاً *پخش بار* نامیده می‌شوند، بخش مهمی از تجزیه و تحلیل سیستم قدرت را تشکیل می‌دهد. انجام پخش بار برای طراحی، برنامه‌ریزی اقتصادی، کنترل و همچنین برنامه‌ریزی توسعه آینده سیستم ضروری است. علاوه بر آن تجزیه و تحلیل پخش بار برای تحلیل‌های دیگر، مانند مطالعات پایداری گذرا و احتمال وقوع حوادث مورد نیاز است. مسأله پخش بار شامل مواردی مانند تعیین اندازه و زاویه ولتاژها در شین‌های مورد نظر و توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از هر خط است. بهترین شیوه نظارت بر چنین حجم عملیات بزرگی استفاده از روش‌های کامپیوتری در حل مسأله پخش بار است. روش‌هایی نظیر نیوتن رافسون[1] و گوس سایدل[2] در سال-های اخیر تا حدود زیادی با موفقیت عمل کرده‌اند، ولی وقتی شرایط سیستم مورد مطالعه تغییر می-کند و یا تخمین اولیه در محدوده ناحیه نامناسبی باشد، این روش‌ها با مشکل مواجه شده و احتمال واگرایی آن‌ها وجود دارد. لذا نیاز به روش‌هایی جدیدتر که مشکلات روش‌های پیشین را نداشته باشند احساس می‌شود.

در این فصل سعی بر آن است که مسأله پخش بار را شرح داده و لزوم حل این مسأله را بیان کنیم. سپس انواع روش‌های متداول و نوینی که برای حل مسأله مذکور به کار رفته را بررسی کرده و مزایا و معایب آن‌ها را ذکر کنیم.

۱-۲- بررسی مسأله‌ی پخش بار

یکی از ابزارهای مهم و اساسی برای تحلیل هر سیستم قدرت چه در مرحله طراحی و برنامه-ریزی و چه در طول بهره‌برداری، برنامه پخش بار می‌باشد [۲]. در واقع استخوان‌بندی اصلی تجزیه، تحلیل و طراحی سیستم قدرت به محاسبات پخش بار سیستم بستگی دارد. مطالعه پخش بار به محاسبه کمیت‌های الکتریکی سیستم در حالت ماندگار به ازاء بارهای مشخص و معلوم می‌پردازد. این کمیت‌ها شامل ولتاژ و زوایای شین‌ها، قدرت‌های اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورها و قدرت‌های اکتیو و راکتیو جاری در خطوط انتقال می‌باشند [۲، ۳]. توان اکتیو تولیدی معمولاً با عمل پخش بار

[1] Newton-Raphson (NR)
[2] Gauss-Seidel

اقتصادی به دست آمده و اندازه ولتاژ ژنراتور با استفاده از رگولاتور ولتاژ اتوماتیک در یک سطح مشخص ثابت نگهداشته می‌شود. بارها معمولاً مطابق توان اکتیو و راکتیوی که مورد نیاز است ثابت درنظر گرفته می‌شوند (فرض می‌شود که بارها با تغییرات کوچک ولتاژ و فرکانس در طول عملکرد حالت ماندگار ثابت هستند و تحت تاثیر قرار نمی‌گیرند) [۳] .

مطالعه پخش بار نتایج زیر را در بر خواهد داشت:

- ولتاژ باس‌ها هم از نظر اندازه و هم از نظر زاویه،
- میزان توان راکتیو که نیروگاه‌ها مؤظف به تولید می‌باشند،
- میزان توان اکتیو و راکتیو که در خطوط انتقال می‌یابند.

چنانچه سایر متغیرهای مربوط به شبکه قدرت در دسترس باشند، تصمیم‌گیری جهت توسعه سیستم برای رویارویی با رشد بار و همچنین بررسی طرح‌های مختلف توسعه بدون مطالعه پخش بار امکانپذیر نمی‌باشد.

۱-۲-۱- معادلات پخش بار و فرمول‌بندی مسأله

قیود مربوط به توان و ولتاژ در مسأله پخش بار، مسئله مذکور را به یک مسئله غیرخطی تبدیل می‌کنند که باید اساساً با روش‌های مبتنی بر تکرار حل شوند.

۱-۲-۱-۱- معادلات اساسی و انواع باس‌ها

در حل مسأله پخش بار، فرض می‌شود که سیستم در شرایط متقارن کار می‌کند و سیستم انتقال به صورت شبکه‌ای از شاخه‌های سری و موازی فشرده خطی‌شده با توالی فاز مثبت در نظر گرفته می‌شود. در هر شین چهار کمیت با هم ارتباط دارند که عبارتند از: اندازه ولتاژ $|V|$، زاویه فاز θ، توان اکتیو P و توان راکتیو Q [۴].

معادلات شبکه به صورت‌های نظام‌مند مختلفی فرمول‌بندی می‌شوند. به هر حال، معمولاً از روش ولتاژ گره[3]، که مناسب‌ترین روش برای بسیاری از تجزیه و تحلیل‌های سیستم قدرت است،

[3] Node-voltage method

استفاده می‌گردد. تحلیل گرهی منجر به ماتریس ادمیتانس می‌شود. این ماتریس از رابطه (۱-۱) به دست می‌آید:

$$I_{bus} = Y_{bus}.V_{bus} \qquad (۱-۱)$$

که در آن I_{bus} بردار جریان‌های تزریق شده شین‌ها و V_{bus} بردار ولتاژ شین است که نسبت به گره مرجع سنجیده می‌شود. ماتریس Y_{bus}، یک ماتریس مربعی، تنک (به ماتریسی که بیشتر عناصر آن صفر باشد اسپارس یا همان تنک گفته می‌شود) و متقارن (در غیاب شیفت‌کننده‌های فاز و...) می‌باشد. حالت ماندگار سیستم با قیود توان و/یا ولتاژ آن تعیین می‌شود [۴]. شین‌های سیستم معمولاً به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱) **شین مرجع (Slack or Swing)**: یکی از شین‌ها که شین شناور یا شین نوسان نام دارد به عنوان مرجع انتخاب می‌گردد که در آن اندازه و زاویه فاز ولتاژ معلوم است. این شین اختلاف میان بارهای برنامه‌ریزی شده[۴] و توان‌های تولید شده را (که به علت مواردی مانند تلفات شبکه به وجود می‌آید) جبران می‌کند [۲، ۳].

۲) **شین‌های بار (PQ):** در این شین‌ها توان‌های اکتیو و راکتیو معلوم و اندازه و زاویه فاز ولتاژ مجهول است. این شین‌ها به شین PQ موسوم هستند [۴].

$$\begin{aligned} S_i^{sp} &= P_i^{sp} + jQ_i^{sp} \\ &= P_{Gi}^{sp} - P_{Li}^{sp} + j(Q_{Li}^{sp} - Q_{Li}^{sp}) = V_i I_i^* \end{aligned} \qquad (۲-۱)$$

که:

S_i^{sp} توان تعیین شده[۵] در شین i، P_i^{sp} توان اکتیو تعیین شده در شین i، Q_i^{sp} توان راکتیو تعیین شده در شین i، P_{Gi}^{sp} توان اکتیو تولیدی تعیین شده در شین i، Q_{Gi}^{sp} توان راکتیو تولیدی تعیین شده در شین i، P_{Li}^{sp} توان اکتیو مصرفی تعیین شده بار در شین i، Q_{Li}^{sp} توان راکتیو مصرفی تعیین شده بار در شین i، V_i ولتاژ شین i و I_i جریان شین iام را نشان می‌دهد.

[4] Scheduled
[5] Specified

۳) **شین‌های تنظیم شده:** این شین‌ها، شین‌های دارای ژنراتور هستند که به شین‌های با ولتاژ کنترل شده نیز موسوم‌اند. در این شین‌ها، توان اکتیو و اندازه ولتاژ معلوم هستند. زاویه فاز ولتاژها و توان‌های راکتیو باید محاسبه شوند. حدود بالا و پایین مقادیر توان راکتیو نیز معلوم می‌باشند. این شین‌ها، شین‌های PV نیز نامیده می‌شوند [۴].

$$P_i^{sp} = P_{Gi}^{sp} - P_{Li}^{sp} = \mathrm{Re}(V_i I_i^*) \qquad (۳-۱)$$

$$V_i^{sp} = (e_i^2 + f_i^2)^{1/2} = |V_i| \qquad (۴-۱)$$

V_i^{sp} اندازه ولتاژ شینه iام و f_i و e_i به‌ترتیب بیانگر قسمت حقیقی و موهومی ولتاژ باس i می‌باشند. Re() قسمت حقیقی () را نشان می‌دهد.

در تمامی روابط بالا، بالانویس * بیانگر مقدار مختلط پارامتر مذکور می‌باشد.

۱-۲-۱-۲- محاسبه مقادیر عدم تطابق توان و تعیین معیار همگرایی

معادله دقیق پخش بار زمانی به دست می‌آید که قیود شین (۱-۲) تا (۱-۴) برآورده شوند. تقریباً همه الگوریتم‌های پخش بار باید معادله (۱-۴) را ارضا کنند. تحت این شرایط میزان اختلاف بین توان‌های تعیین شده و مقادیر توان محاسبه شده (ΔS_i) در معادلات (۱-۲) و (۱-۳) میزان دقت راه حل‌ها را مشخص می‌کند.

برای هر شین بار PQ، مقدار توان باقیمانده[6] از معادله (۱-۵) زیر به دست می‌آید:

$$\Delta S_i = S_i^{sp} - V_i I_i^* = P_i^{sp} + jQ_i^{sp} - V_i \sum_{k \in i} Y_{ik}^* V_k^* \qquad (۵-۱)$$

رابطه (۱-۵) می‌تواند به دو بخش حقیقی و موهومی تقسیم شده و رابطه‌های توان پسماند اکتیو و راکتیو را به طور جداگانه مشخص کند. معادلات (۱-۶ ب) و (۱-۷ ب) فرم قطبی معادلات (۱-۶ الف) و (۱-۷ الف) می‌باشند.

برای هر شین i از نوع PV و PQ داریم:

$$\Delta P_i = P_i^{sp} - \mathrm{Re}\{(e_i + jf_i)\sum_{k \in i}(G_{ik} - jB_{ik})(e_k - jf_k)\} \qquad (۱-۶ \text{ الف})$$

[6] Residual

$$= P_i^{sp} - |V_i| \sum_{k \in i} (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) |V_k| \qquad (۱-۶ \text{ ب})$$

و برای هر شین i از نوع PQ خواهیم داشت:

$$\Delta Q_i = Q_i^{sp} - \text{Im}\{(e_i + jf_i) \sum_{k \in i} (G_{ik} - jB_{ik})(e_k - jf_k)\} \qquad (۱-۷ \text{ الف})$$

$$= Q_i^{sp} - |V_i| \sum_{k \in i} (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) |V_k| \qquad (۱-۷ \text{ ب})$$

که در روابط بالا داریم:

G_{ik} و B_{ik} به‌ترتیب المان ikام ماتریس‌های کندوکتانس و سوسپتانس هستند و θ_i زاویه ولتاژ شینه iام می‌باشد. Im() مقدار موهومی () را نشان می‌دهد.

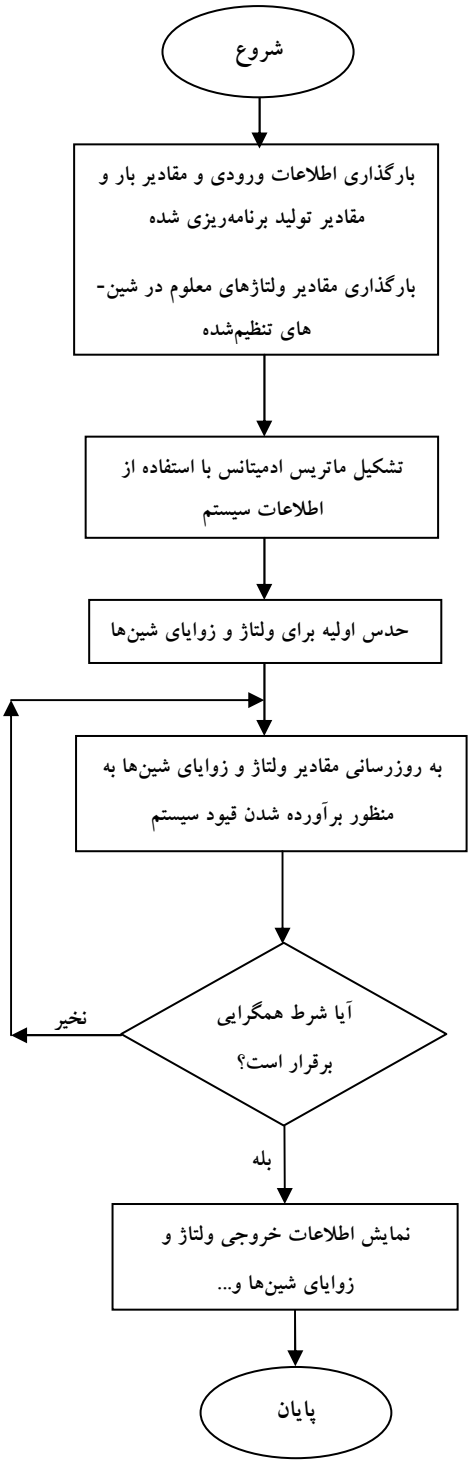
معمولاً برای همگرایی، باید مقادیر ΔP و ΔQ بسته به نوع و شرایط سیستم از یک مقدار خاصی کمتر باشند. در واقع داریم:

$\Delta P_i < c_p$ برای هر شین i نوع PV و PQ

$\Delta Q_i < c_p$ برای هر شین i نوع PQ

مقادیر خطای c_p و c_q بسته به شرایط سیستم معمولاً در محدوده ۰/۰۱ – ۱۰ MW/MVAR هستند. در بعضی الگوریتم‌ها ممکن است معیار انتخاب خطا متفاوت باشد ولی اکثراً از روابط بالا برای محاسبه خطا استفاده می‌کنند [۴].

معادلات پخش بار در واقع دسته‌ای از معادلات جبری غیر خطی همزمان توان را برای دو نوع متغیر نامعلوم در هر گره سیستم حل می‌کنند. الگوریتم کلی مسأله مذکور که برنامه‌های پخش بار از آن استفاده می‌کنند در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است. در ابتدا اطلاعات سیستم نظیر وضعیت توان شین‌ها، اتصالات شبکه و امپدانس‌ها خوانده شده و ماتریس ادمیتانس تشکیل می‌شود. حدس اولیه برای ولتاژ و زوایای همه شین‌ها زده می‌شود. مرحله تکرار تا زمانی ادامه می‌یابد که همه قیود و شرایط بار و تولید برآورده شوند و مقدار خطا از مقدار مشخص شده کمتر باشد [۳].



شکل (۱-۱) دیاگرام اصلی و پایه‌ای پخش بار

۱-۳- حداکثر مقدار بارگذاری و پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت

در طول سالیان گذشته، اهمیت پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت رفته رفته پررنگ‌تر شده است. تا کنون شاخص‌های مختلف پایداری ولتاژ ارائه شده است. یکی از این روش‌ها بر اساس برآورد حد پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت می‌باشد [۵]. در این روش بار سیستم تا جایی افزایش می‌یابد که سیستم دیگر نتواند به همگرایی برسد. راه‌حل‌های ولتاژ پایین به دست آمده از این روش برای تشخیص منحنی دماغه[۷] در منحنی‌های PV و PQ استفاده می‌شوند. این منحنی‌ها برای تعیین نقاط ضعیف در سیستم قدرت و بررسی روش‌های کنترلی بهینه برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ لازم می‌باشند [۶].روش‌های متداولی نظیر نیوتن رافسون و مشتقات به دست آمده از این روش، در نزدیکی ماکزیمم حد بارگذاری سیستم نمی‌توانند به خوبی همگرا شوند و این به دلیل ماتریس ژاکوبین این روش‌ها می‌باشد که با نزدیک شدن به حد بارگذاری سیستم به سمت منفرد شدن می-رود.

۱-۴- راه‌حل‌های غیر عادی[۸] حل مسأله پخش بار

از آنجا که مسائل پخش بار به صورت مجموعه‌ای از معادلات غیر خطی هستند لذا دارای پاسخ منحصر به فردی نیستند. یکی از این پاسخ‌ها به عنوان پاسخ عادی (پایدار) شناخته می‌شود و بقیه تحت عنوان پاسخ‌های غیرعادی (ناپایدار) محسوب می‌شوند. در واقع بر طبق تئوری "*پاسخ‌های متعدد*[۹] *پخش بار*" در هر سطحی از بار معمولاً چندین پاسخ ولتاژ پایین وجود دارد [۷]. با افزایش مقدار بارگذاری سیستم تعداد این پاسخ‌ها کمتر می‌شود، به طوریکه در نزدیکی ماکزیمم حد بارگذاری سیستم تنها یک پاسخ عملی (و پاسخ‌هایی خیلی نزدیک به این پاسخ) وجود دارند [۸].
به منظور ارزیابی پایداری ولتاژ و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ، پاسخ‌های ولتاژ پایین متعدد مورد نیاز می‌باشند. در واقع راه‌حل‌های ناپایدار ولتاژ در تحلیل پایداری ولتاژ و در رسم منحنی‌های PV و PQ بسیار مهم و اساسی می‌باشند.

7 Nose curve
8 Abnormal
9 Multiple