Azarbayjan Shahid Madani University

Electrical Engineering Faculty

M. Sc. Thesis

Title:

A New Load Flow Method For Active Electric Distribution Networks

By:

Pouya Asadi Shayan

Supervisor :

Sajad Najafi Ravadanegh

Adviser:

Ali Ajami

January 2014

دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحت عنوان:

روش جدید پخش بار در شبکه های توزیع اکتیو

نگارش:

پویا اسدی شایان

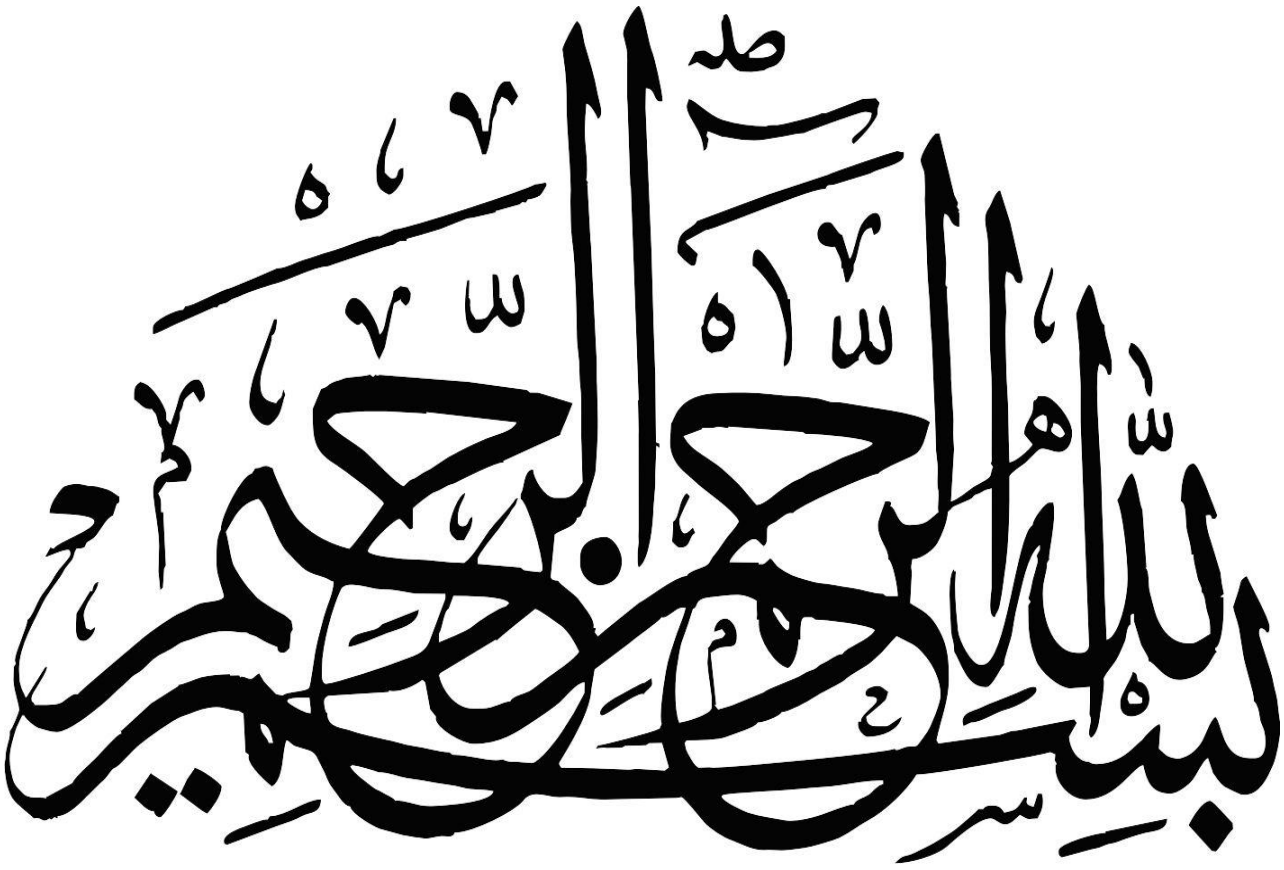
استاد راهنما:

دکتر سجاد نجفی روادانق

استاد مشاور:

دکتر علی عجمی

دی ماه ۱۳۹۲


بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به :

" وطنم ایران، خاکم آذربایجان "

" به پاس محبت های پدر و مادر بسیار عزیزم که برایم زندگی؛ بودن و انسان ماندن را معنا کردند. "

حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان....

تقدیر از :

"از زحمات بی دریغ استاد راهنمای گرانقدر جناب آقای دکتر سجاد نجفی روادانق و استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر علی عجمی کمال تشکر را دارم، چرا که بدون راهنمایی های ایشان تأمین این پایان نامه بسیار مشکل می نمود."

چکیده

تحلیل پخش بار یکی از اساسی ترین و کلیدی ترین محاسبات برای تعیین رفتار حالت ماندگار سیستمهای قدرت می باشد. نفوذ منابع تولید پراکنده و ایجاد شبکه های توزیع اکتیو از یک طرف و تجدید ساختار شعاعی شبکه های توزیع به شبکه های توزیع حلقوی و همچنین نسبت R/X بالا و بهره برداری سه فاز نامتقارن در این شبکه ها از طرف دیگر، همگی باعث شده اند که شبکه های توزیع انرژی در دسته شبکه های الکتریکی با شرایط خاص قرار گیرند. همچنین ظهور شبکه های توزیع هوشمند با ویژگی های فوق نیز بر اهمیت موضوع افزوده است. روش های پخش بار متداول برای این نوع از شبکه ها کارایی لازم را نداشته و هرکدام به نوعی دارای نقاط ضعفی می باشند. نبود یک روش جامع پخش بار که تمامی ویژگی های مذکور شبکه های توزیع امروزی و آینده را پوشش دهد، خلأ بزرگی در صنعت برق جهان محسوب شده و نیازمند تحقیقات علمی گسترده ای در این زمینه می باشد. در این پایان نامه روشی جامع برای تحلیل پخش بار سه فاز متقارن و نامتقارن در شبکه های توزیع اکتیو و هوشمند با حضور گسترده منابع تولید پراکنده پیشنهاد می شود که ضمن مدلسازی دقیق منابع انرژی دارای سرعت همگرایی بالا می باشد. همچنین با توجه به فرمول بندی مسأله پخش بار روابط ماتریسی حالت تقارنی پیدا کرده و بنابراین حجم داده های ذخیره شدنی و ارسالی توسط پروتکل های مخابراتی به شدت کاهش یافته و در نتیجه بسیار مناسب برای شبکه های توزیع هوشمند خواهد بود. در این پایان نامه روش پیشنهادی بر روی شبکه های توزیع استاندارد ۴ باسه، ۳۳ باسه، ۳۴ باسه IEEE با سناریوهای مختلف با حضور وعدم حضور DG و همچنین تجدید ساختار شبکه از آرایش شعاعی به آرایش حلقوی اعمال شده و نتایج پخش بار ارائه می شوند. نتایج ارائه شده کارایی روش پیشنهادی برای شبکه های توزیع هوشمند را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: تحلیل پخش بار سه فاز متقارن و نامتقارن، شبکه های توزیع شعاعی و حلقوی، شبکه های توزیع اکتیو، شبکه های توزیع هوشمند، تولید پراکنده

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

فصل اول : مقدمه ۱

۱-۱- بیان مسأله و انگیزه پژوهش ۲

۱-۲- ساختار پروژه ۴

فصل دوم : شبکه های توزیع هوشمند ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- مزایای شبکه های توزیع هوشمند ۹

۲-۳- مانیتورینگ و مدیریت شبکه های توزیع هوشمند ۱۰

۲-۴- مدیریت تقاضا در شبکه های توزیع هوشمند ۱۱

۲-۵- جایگاه تحلیل پخش بار در شبکه های توزیع هوشمند ۱۱

فصل سوم : تحلیل پخش بار در شبکه های توزیع ۱۳

۳-۱- مقدمه ۱۴

۳-۲- معادلات پخش بار ۱۶

۳-۳- انواع روش های موجود برای تحلیل پخش بار در سیستمهای قدرت ۱۷

۳-۳-۱- تحلیل پخش بار با روش تکراری گاؤس ۱۷

۳-۳-۲- تحلیل پخش بار با روش تکراری گاؤس- سایدل ۱۸

۳-۳-۳- تحلیل پخش بار با روش تکراری نیوتن-رافسون ۱۹

۳-۳-۴- تحلیل پخش بار با روش مجزای سریع ۲۱

۳-۳-۵- روش تحلیل پخش بار تجزیه شده با استفاده از ماتریس هِسیان و ماتریس ژاکوبین ۲۳

۳-۳-۶- تحلیل پخش بار با روش های جاروب پس رو-پیش رو ۲۵

فصل چهارم : مدلسازی عناصر شبکه های توزیع ۲۸

۴-۱- مقدمه ۲۹

۴-۲- مدل سازی خطوط شبکه های توزیع ۲۹

۴-۳- امپدانس سری خطوط توزیع هوایی ۲۹

۴-۳-۱- محاسبه اندوکتانس هادی استوانه ای شکل با طول بینهایت ۳۰

۴-۳-۲- اندوکتانس آرایه ای از n هادی استوانه ای شکل ۳۲

۴-۳-۳- اندوکتانس خطوط توزیع سه فاز ترانسپوزه ۳۵

۴-۳-۴- خطوط توزیع سه فاز ترانسپوزه نشده و مدل سازی اثر زمین در آنها ۳۶

۴-۳-۵- معادلات کارسون ۳۸

۴-۳-۶- محاسبه ماتریس امپدانس خطوط توزیع هوایی با استفاده از روش کاهش کرون ۴۰

۴-۴- امپدانس سری خطوط توزیع زمینی ۴۳

۴-۴-۱- ساختار کابل های زمینی ۴۳
۴-۴-۲- محاسبه امپدانس سری کابل های زمینی ۴۷
۴-۴-۲-۱- امپدانس سری کابل با هادیهای نوترال هم مرکز ۴۷
۴-۴-۲-۲- امپدانس سری کابلهای نوارپیچی شده ۴۹
۴-۵- محاسبه ادمیتانس شنت خطوط شبکه های توزیع ۵۰
۴-۵-۱- محاسبه ظرفیت خازنی خطوط توزیع هوایی با در نظر گرفتن اثر زمین ۵۲
۴-۵-۲- محاسبه ظرفیت خازنی خطوط توزیع زمینی با در نظر گرفتن اثر زمین ۵۵
۴-۵-۲-۱- ظرفیت خازنی کابل با هادیهای نوترال هم مرکز ۵۵
۴-۵-۲-۲- ظرفیت خازنی کابل نوارپیچی شده ۵۸
۴-۶- مدل دقیق خطوط توزیع شبکه های توزیع ۵۹
۴-۷- مدل ساده شده خطوط شبکه های توزیع ۶۲
۴-۸- مدلسازی ترانسفورماتورهای سه فاز شبکه های توزیع ۶۳
۴-۸-۱- اتصال مثلث- ستاره زمین شده ۶۵
۴-۸-۲- اتصال ستاره زمین نشده- مثلث ۶۹
۴-۸-۳- اتصال ستاره زمین شده- ستاره زمین شده ۷۳
۴-۸-۴- اتصال مثلث – مثلث ۷۵
۴-۸-۵- اتصال ستاره باز – مثلث باز ۷۹
۴-۹- مدلسازی بار در شبکه های توزیع ۸۱
۴-۹-۱- بررسی مدل های مختلف استاتیکی بار ۸۳
۴-۹-۱-۱- مدل بار توان ثابت (PQ) ۸۳
۴-۹-۱-۲- مدل امپدانس ثابت، جریان ثابت، توان ثابت (ZIP) ۸۳
۴-۹-۲- مدل نمایی بار ۸۵

فصل پنجم : روش پیشنهادی تحلیل پخش بار در شبکه های توزیع اکتیو و هوشمند ۸۷

۵-۱- مقدمه ۸۸
۵-۲- الگوریتم پخش بار پیشنهادی برای شبکه های شعاعی سه فاز متعادل ۸۹
۵-۲-۱- محاسبه مقادیر افت ولتاژ و تلفات توان اکتیو و راکتیو در خطوط توزیع سه فاز متعادل ۱۰۲
۵-۳- الگوریتم پخش بار پیشنهادی برای شبکه های شعاعی سه فاز نامتعادل ۱۰۲
۵-۳-۱- محاسبه مقادیر افت ولتاژ و تلفات توان اکتیو و راکتیو در خطوط توزیع ۱۱۲
۵-۴- الگوریتم پخش بار پیشنهادی برای شبکه های حلقوی سه فاز متعادل و نامتعادل ۱۱۵
۵-۵- محاسبه ماتریس Δ ۱۲۵
۵-۵-۱- الگوریتم پیشنهادی شماره (۱) جهت تشکیل ماتریس Δ ۱۲۷
۵-۵-۲- الگوریتم پیشنهادی شماره (۲) جهت تشکیل ماتریس Δ ۱۲۷
۵-۶- الگوریتم شناسایی حلقه در شبکه ۱۳۰

فصل ششم : نتایج شبیه سازی ۱۳۳

۶-۱- مقدمه ۱۳۴
۶-۲- نتایج شبیه سازی برای شبکه های توزیع سه فاز متعادل ۱۳۴
۶-۲-۱- شبیه سازی سیستم ۴ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۳۴
۶-۲-۲- نتایج تحلیل پخش بار برای شبکه ۴ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۳۶
۶-۲-۳- شبیه سازی سیستم ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۳۷
۶-۲-۴- نتایج تحلیل پخش بار برای شبکه ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۴۲
۶-۲-۵- شبیه سازی سیستم ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۴۴
۶-۲-۶- نتایج تحلیل پخش بار برای شبکه ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۴۸
۶-۲-۷- مقایسه عددی سرعت همگرائی روش پیشنهادی با سایر روش های تحلیل پخش بار ۱۵۰
۶-۳- نتایج شبیه سازی تحت شرایط سه فاز نامتعادل ۱۵۱
۶-۳-۱- شبیه سازی شبکه ۴ باسه IEEE تحت شرایط سه فاز نامتعادل ۱۵۱
۶-۳-۲- نتایج تحلیل پخش بار سه فاز نامتعادل برای شبکه ۴ باسه IEEE ۱۵۳
۶-۳-۳- شبیه سازی شبکه ۳۴ باسه IEEE تحت شرایط سه فاز نامتعادل ۱۵۶
۶-۳-۴- نتایج تحلیل پخش بار سه فاز نامتعادل برای شبکه ۳۴ باسه IEEE ۱۶۱

فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۶۸

۷-۱- نتیجه گیری ۱۶۹
۷-۲- پیشنهادات ۱۷۰

فهرست مراجع ۱۷۱

فهرست شکل ها

عنوان ..... صفحه

شکل ۲-۱: شماتیکی از شبکه های موجود ۷
شکل ۲-۲: شماتیکی از شبکه های الکتریکی آینده ۸
شکل ۲-۳: نمودار مزایای شبکه های هوشمند ۱۰
شکل ۳-۱: باس قدرت ۱۴
شکل ۴-۱ : هادی استوانه ای شکل با طول بینهایت ۳۰
شکل ۴-۲ : میدان مغناطیسی خارجی یک هادی استوانه ای شکل ۳۱
شکل ۴-۳ : آرایه ای از N هادی استوانه ای ۳۳
شکل ۴-۴: آرایش خطوط سه فاز ترانسپوزه ۳۵

شکل ۴-۵ : مدار خط توزیع تکفاز با در نظر گرفتن جریان برگشتی از زمین ۳۷
شکل ۴-۶ : خط تکفاز و تصویر آن نسبت به سطح زمین ۳۹
شکل ۴-۷ : خط توزیع سه فاز چهار سیمه با نوترال زمین شده از دو طرف ۴۱
شکل ۴-۸ :خط توزیع سه فاز سه سیمه ۴۳
شکل ۴-۹ : قسمت های مختلف یک کابل ۴۴
شکل ۴-۱۰ : آرایش های مختلف قسمت مغزی کابل ۴۴
شکل ۴-۱۱ : کابل با هادیهای نوترال هم مرکز ۴۷
شکل ۴-۱۲ : کابل نوارپیچی شده ۴۹
شکل ۴-۱۳ : میدان الکتریکی اطراف یک هادی استوانه ای ۵۱
شکل ۴-۱۴ : آرایش گروهی هادی های برق دار استوانه ای در کنار هم ۵۱
شکل ۴-۱۵ : خط توزیع تکفاز وتصویر آن نسبت به سطح زمین ۵۲
شکل ۴-۱۶ : آرایش هادی های کابل با هادیهای نوترال هم مرکز ۵۵
شکل ۴-۱۷ : کابل نوارپیچی شده ۵۸
شکل ۴-۱۸ : مدل دقیق یک خط توزیع سه فاز ۵۹
شکل ۴-۱۹ : مدل ساده شده یک خط توزیع سه فاز ۶۲
شکل ۴-۲۰ : مدل یک ترانسفورماتور قدرت سه فاز با در نظر گرفتن ورودی و خروجی های آن ۶۴
شکل ۴-۲۱ : مدار معادل ترانسفورماتور با اتصال مثلث – ستاره زمین شده ۶۵
شکل ۴-۲۲ : جریان های شارشی در ترانسفورماتور با اتصال مثلث – ستاره زمین شده ۶۸
شکل ۴-۲۳ : مدار معادل ترانسفورماتور با اتصال ستاره زمین نشده - مثلث ۷۰
شکل ۴-۲۴ : جریان های شارشی در ترانسفورماتور با اتصال ستاره زمین نشده - مثلث ۷۱
شکل ۴-۲۵ : مدار معادل ترانسفورماتور با اتصال ستاره زمین شده - ستاره زمین شده ۷۳
شکل ۴-۲۶ : مدار معادل ترانسفورماتور با اتصال مثلث - مثلث ۷۵
شکل ۴-۲۷ : مدار معادل ترانسفورماتور با اتصال ستاره باز- مثلث باز ۷۹
شکل ۵-۱ : نحوه لایه بندی و شماره گذاری باس ها در شبکه ۹۰
شکل ۵-۲ : شبکه توزیع بدون شاخه جانبی ۹۴
شکل ۵-۳ : فلوچارت الگوریتم پخش بار پیشنهادی برای شبکه های شعاعی ۱۱۴
شکل ۵-۴ : بخشی از یک شبکه توزیع حلقوی ۱۲۱
شکل ۵-۵ : فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای شبکه های حلقوی ۱۲۴

شکل ۵-۶ : شبکه توزیع شعاعی بدون شاخه های جانبی.....۱۲۵
شکل ۵-۷ : نمونه از شبکه های شعاعی با شاخه های جانبی ۱۲۶
شکل ۵-۸: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی شماره (۲) جهت تشکیل ماتریس Δ ۱۲۹
شکل ۵-۹ : قسمتی از شبکه توزیع حلقوی.....۱۳۰
شکل ۵-۱۰: فلوچارت مربوط به الگوریتم شناسایی حلقه در شبکه ۱۳۲
شکل ۶-۱ : سیستم توزیع ۴ باسه IEEE.....۱۳۴
شکل ۶-۲ : سیستم توزیع ۴ باسه IEEE با در نظر گرفتن تجدید ساختار سناریوی شماره (۳).....۱۳۶
شکل ۶-۳ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم ۴ باسه IEEE سه فاز متعادل در سه سناریو ۱۳۷
شکل ۶-۴ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم ۴ باسه IEEE سه فاز متعادل در سه سناریو ۱۳۷
شکل ۶-۵ : سیستم توزیع ۳۳ باسه IEEE.....۱۳۸
شکل ۶-۶ : سیستم توزیع ۳۳ باسه IEEE سه فاز با درنظر گرفتن تجدید ساختار سناریوی شماره (۳) ۱۴۱
شکل ۶-۷ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل در سه سناریو ۱۴۳
شکل ۶-۸ : سیستم توزیع ۳۴ باسه IEEE.....۱۴۴
شکل ۶-۹ : سیستم توزیع ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل با در نظر گرفتن تجدید ساختار سناریوی شماره (۳) ۱۴۷
شکل ۶-۱۰ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل در سه سناریو.....۱۴۹
شکل ۶-۱۱ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل با دو روش تحلیل پخش بار ۱۵۰
شکل ۶-۱۲ : سیستم توزیع سه فاز نامتعادل ۴ باسه IEEE با در نظر گرفتن تجدید ساختار سناریوی شماره (۳).....۱۵۳
شکل ۶-۱۳ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع نامتعادل ۴ باسه IEEE در سناریوی شماره (۱) ۱۵۴
شکل ۶-۱۴ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع نامتعادل ۴ باسه IEEE در سناریوی شماره (۲) ۱۵۵
شکل ۶-۱۵ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع نامتعادل ۴ باسه IEEE در سناریوی شماره (۳) ۱۵۵
شکل ۶-۱۶ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع ۴ باسه IEEE سه فاز متعادل با دو روش تحلیل پخش بار ۱۵۶
شکل ۶-۱۷ : سیستم توزیع ۳۴ باسه IEEE سه فاز نامتعادل با در نظر گرفتن تجدید ساختار سناریوی شماره (۳).....۱۶۰
شکل ۶-۱۸ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع ۳۴ باسه IEEE سه فاز نامتعادل در سناریوی شماره (۱).....۱۶۵
شکل ۶-۱۹ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع ۳۴ باسه IEEE سه فاز نامتعادل در در سناریوی شماره (۲) ۱۶۵
شکل ۶-۲۰ : پروفیل ولتاژ باس های سیستم توزیع ۳۴ باسه IEEE سه فاز نامتعادل در سناریوی شماره (۳).....۱۶۶

فهرست جدول ها

عنوان ..... صفحه

جدول ۴-۱ : مقادیر $\boldsymbol{\theta}$ و K برای امپدانس های خودی و متقابل ۳۹
جدول ۴-۲ :تعریف پارامترهای معادلات کارسون ۴۰
جدول ۴-۳ : تعریف پارامترهای فیزیکی مربوط به یک کابل با هادیهای نوترال هم مرکز ۴۷
جدول ۴-۴ : تعریف پارامترهای فیزیکی مربوط به یک کابل نوارپیچی شده ۴۹
جدول ۴-۵ : تعریف فواصل فیزیکی مربوط به یک کابل نوارپیچی شده ۵۰
جدول ۴-۶ : تعریف پارامترهای بکار رفته در رابطه (۴-۵۹) ۵۳
جدول ۴-۷ : پارامترهای هندسی یک کابل با هادیهای نوترال هم مرکز ۵۶
جدول ۴-۸ : ضرایب گذردهی الکتریکی نسبی عایق های الکتریکی مختلف ۵۷
جدول ۴-۹ : تعریف پارامترهای مدل ZIP بارهای الکتریکی ۸۴
جدول ۴-۱۰: تعریف پارامترهای مدل نمایی بارهای الکتریکی ۸۵
جدول ۴-۱۱ : مقادیر مختلف ضرایب $\boldsymbol{np}$ و $\boldsymbol{nq}$ بازای نوع بار مصرفی ۸۶
جدول ۵-۱: ساختار ماتریسهای ادمیتانس خطوط حذف شده برای سیستمهای سه فاز متعادل و نامتعادل ۱۱۶
جدول ۵-۲: ساختار ماتریس امپدانس لایه ای شبکه برای سیستمهای توزیع سه فاز متعادل و نامتعادل ۱۱۸
جدول ۵-۳: ساختار ماتریس توانهای ظاهری تزریقی به شبکه حلقوی برای سیستمهای سه فاز متعادل و نامتعادل ۱۱۸
جدول ۵-۴: تخمین اولیه برای ماتریس توانهای ظاهری شارشی در خطوط حذف شده برای سیستمهای سه فاز متعادل و نامتعادل ۱۲۰
جدول ۵-۵ : جریانهای تزریقی خطوط حذفی با مدلسازی ساده و دقیق خطوط برای سیستمهای سه فاز متعادل و نامتعادل ۱۲۱
جدول ۵-۶ : محاسبه توانهای ظاهری تزریقی خطوط حذفی برای سیستمهای سه فاز متعادل و نامتعادل ۱۲۲
جدول ۵-۷ : فرمول همگرائی روش پیشنهادی برای سیستمهای حلقوی سه فاز متعادل و نامتعادل ۱۲۳
جدول ۵-۸ : روابط تغییر توانهای ظاهری تزریقی خطوط حذفی ۱۲۳
جدول ۵-۹: داده های خطوط مربوط به شبکه شکل ۵-۹ ..... ۱۳۰
جدول ۵-۱۰ : جدول DATA و ماتریس ادمیتانس خطوط حذفی متناظر با شبکه توزیع شکل ۵-۹ ..... ۱۳۱
جدول ۶-۱ : مشخصات سیستم پردازنده که کلیه شبیه سازی ها درآن انجام شده است ۱۳۴
جدول ۶-۲: اطلاعات مربوط به باس های شبکه ۴ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۳۵
جدول ۶-۳: اطلاعات مربوط به فیدرهای شبکه ۴ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۳۵

جدول ۶-۴ : نتایج تحلیل پخش بار شبکه ۴ باسه IEEE سه فاز متعادل در سه سناریو ۱۳۶
جدول ۶-۵ : اطلاعات مربوط به باس های شبکه ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۳۹
جدول ۶-۶ : اطلاعات مربوط به فیدرهای شبکه ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۴۰
جدول ۶-۷ : مشخصات واحدهای DG بکار گرفته شده در سناریوی (۲) مربوط به شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۴۱
جدول ۶-۸ : مشخصات واحدهای DG بکار گرفته شده در سناریوی (۳) مربوط به شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۴۲
جدول ۶-۹ : مشخصات خطوط اضافه شده به شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل در سناریوی (۳) ۱۴۲
جدول ۶-۱۰ : نتایج تحلیل پخش بار برای شبکه ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل در سه سناریو ۱۴۲
جدول ۶-۱۱ : اطلاعات مربوط به باس های شبکه ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۴۴
جدول ۶-۱۲ : اطلاعات مربوط به فیدرهای شبکه ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۴۵
جدول ۶-۱۳ : مشخصات واحدهای DG بکار گرفته شده در سناریوی (۲) ۱۴۶
مربوط به شبکه توزیع ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل..... ۱۴۶
جدول ۶-۱۴ : مشخصات واحدهای DG بکار گرفته شده در سناریوی (۳) مربوط به شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۴۷
جدول ۶-۱۵ : مشخصات خطوط اضافه شده به شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل در در سناریوی (۳)..... ۱۴۷
جدول ۶-۱۶ : نتایج تحلیل پخش بار برای شبکه ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل در سه سناریو..... ۱۴۸
جدول ۶-۱۷ : مقایسه عددی سرعت همگرائی روش پیشنهادی با سایر روش های تحلیل پخش بار..... ۱۵۱
جدول ۶-۱۸ : اطلاعات مربوط به باس های شبکه ۴ باسه IEEE سه فاز نامتعادل..... ۱۵۲
جدول ۶-۱۹ : اطلاعات مربوط به فیدرهای شبکه ۴ باسه IEEE سه فاز نامتعادل ۱۵۲
جدول ۶-۲۰ : نتایج تحلیل پخش بار سه فاز نامتعادل برای شبکه ۴ باسه IEEE در سه سناریو ۱۵۴
جدول ۶-۲۱ : اطلاعات مربوط به باس های شبکه ۳۴ باسه IEEE سه فاز نامتعادل ۱۵۶
جدول ۶-۲۲ : اطلاعات مربوط به فیدرهای شبکه ۳۴ باسه IEEE سه فاز نامتعادل ۱۵۷
جدول ۶-۲۳ : مشخصات واحدهای DG بکار گرفته شده در سناریوی (۲) مربوط به شبکه توزیع ۳۴ باسه IEEE سه فاز نامتعادل ۱۵۹
جدول ۶-۲۴ : مشخصات واحدهای DG بکار گرفته شده در سناریوی (۳) مربوط به شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل ۱۶۰
جدول ۶-۲۵ : مشخصات خطوط اضافه شده به شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE سه فاز متعادل در در سناریوی (۳)..... ۱۶۰
جدول ۶-۲۶ : نتایج تحلیل پخش بار سه فاز نامتعادل برای شبکه ۳۴ باسه IEEE برای سناریوی شماره (۱) ۱۶۱

جدول ۶-۲۷ : نتایج تحلیل پخش بار سه فاز نامتعادل برای شبکه ۳۴ باسه IEEE برای سناریوی شماره (۲) ۱۶۲
جدول ۶-۲۸ : نتایج تحلیل پخش بار سه فاز نامتعادل برای شبکه ۳۴ باسه IEEE برای سناریوی شماره (۳) ۱۶۳
جدول ۶-۲۹ : سرعت همگرائی روش تحلیل پخش بار پیشنهادی برای حالت سه فاز نامتعادل..... ۱۶۶

فصل اول :

مقدمه

۱-۱- بیان مسأله و انگیزه پژوهش

نگاهی به شبکه های توزیع برق آینده نشان می دهد که با افزایش منابع تولید پراکنده[۱] مثل توربین های بادی[۲]، پنل های خورشیدی[۳]، منابع CHP [۴]و غیره شبکه های توزیع پسیو که فقط شامل بارهای مصرفی هستند به شبکه های فعال (اکتیو) که شامل بارها و منابع انرژی می باشند تغییر ماهیت می دهند[۱]. این امر تغییراتی در استراتژی تحلیل سیستمهای توزیع را ضروری می کند. یکی از ابزارهای مهم و اساسی برای تحلیل سیستمهای قدرت تجزیه وتحلیل پخش بار می باشد. تحلیل پخش بار در مراحل طراحی و برنامه ریزی شبکه و همچنین در طول بهره برداری از شبکه های قدرت از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. تا به حال روش های متعددی مثل روش نیوتن- رافسون، روش گاؤس، روش گاؤس- سایدل و غیره برای تحلیل پخش بار در سیستمهای قدرت ارائه و تدوین شده اند [۲]-[۴]، لیکن گرایش شبکه های توزیع برق به آرایش شعاعی از یک طرف و نفوذ منابع تولید پراکنده از طرف دیگر باعث می شوند که روش های تحلیل پخش بار متداول کارایی لازم را برای سیستمهای توزیع جدید را نداشته باشند. سیستمهای قدرت آینده شامل توزیع و انتقال هوشمند[۵] نیز می شود. شبکه توزیع هوشمند شبکه ای است که با بهره گیری کامل و یکپارچه از امکانات دوطرفه میان توان و فن آوری اطلاعات و ارتباطات و نیز تمامی منابع انرژی در راستای رسیدن به یک شبکه توزیع با قابلیت اطمینان بالا، پاک، انعطاف پذیر، پربازده و پایدار ایجاد شده باشد. شبکه های هوشمند الکتریکی شامل ارتباط دو طرفه میان تولید و مصرف، دیسپاچینگ هوشمند، منابع گسترده DG و عناصر ذخیره ساز انرژی در سراسر شبکه توزیع می باشد [۵]-[۷]. شبکه هوشمند یک مسئله منفردو مجزا نیست، بلکه مجموعه ای کامل از تکنولوژی هایی است که می تواند در ایجاد یا ارتقاء شبکه برق مصرف شود. در این راه، این شبکه با استفاده از دستگاه های دیجیتال می تواند مصرف را ردگیری کند و بر نحوه مصرف در زمان اوج آن (پیک) مراقبت نموده و همچنین کنترل استفاده انرژی در خانه یا ساختمان مورد نظر را به نحوی انجام دهد که در صورت امکان دستگاه های پرمصرف در اوج مصرف خاموش شوند. شبکه توزیع هوشمند می تواند سیستم های مراقبتی در داخل ساختمان داشته باشد که به کاربران اجازه می دهد تا مصرف انرژی خود را بهتر مدیریت کنند. حتی این امکان برای شبکه های توزیع هوشمند وجود دارد که به منابع انرژی مستقل، مانند پنلهای خورشیدی خانه یا سیستم های زمین گرمایی منزل اجازه دهند تا انرژی خود را به شبکه تزریق نمایند. اتومبیل برقی که به برق خانه وصل شده است نیز برای کار کردن به این فن آوری نیاز خواهند داشت. یک شبکه توزیع هوشمند، برق را با روش دو طرفه از

[۱] Distributed Generation
[۲] Wind Generation
[۳] Solar Generation
[۴] Combined Heat and Power
[۵] Smart Grids

عرضه کنندگان به مصرف کنندگان می فرستد تا بتواند کنترل وسایل موجود در خانه های مصرف کنندگان را جهت صرفه جویی در انرژی، کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان و شفافیت را انجام دهد [۸].

افزایش روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی از سوی مصرف کنندگان، شرکت های توزیع را برای نصب واحدهای تولید پراکنده که دارای تنوع بسیار گسترده ای در نوع مصرف سوخت می باشند سوق می دهند. جنبه های زیست محیطی و استفاده از انرژی های تجدید پذیر از عوامل مهم دیگر برای توجه دولت مردان به توسعه DG در جهان شده است. بسیاری از منابع رایج تولید پراکنده و همچنین عناصر ذخیره ساز انرژی دارای ماهیت غیر قطعی و تناوبی در انرژی تولیدی بوده و منجر به اکتیو شدن شبکه می شوند. مدلسازی منابع و عناصر ذخیره ساز انرژی مثل سوپر باتری ها و خودروهای الکتریکی که هم بصورت منبع و هم بصورت بار باید در نظر گرفته شوند، از چالش های اساسی است که در شبکه های توزیع هوشمند آینده دیده می شود. عمده ترین تفاوت میان کنترل دیسپاچینگ هوشمند شبکه های آینده با شبکه های امروزی در این است که در شبکه های امروزی مطالعات پخش بار در مراکز دیسپاچینگ براساس داده های اندازه گیری شده از پستهای انتقال، فوق توزیع و توزیع انجام می پذیرد در حالیکه در شبکه های هوشمند آینده با فراهم نمودن ارتباط دو طرفه میان تولید و مصرف، نقطه کاری مرحله بعدی شبکه قدرت را دقیقاً تخمین زده و استراتژی های کنترلی مربوط به حالت خود را در پی خواهد داشت. بنابراین، دیسپاچینگ هوشمند در این شبکه ها مستلزم برنامه های پخش بار جامع بسیار سریع می باشد تا در عین پوشش تمامی شبکه های حلقوی و شعاعی و مدلسازی منابع با استراتژی های کنترلی متفاوت(کنترل ولتاژ و کنترل توان راکتیو) تسلط کافی مراکز دیسپاچینگ برای کنترل به موقع شبکه را میسر سازد.

راه حل های مختلفی برای تجزیه و تحلیل پخش بار در شبکه های قدرت ارائه شده است. یکی از این روش ها استفاده از ماتریس ژاکوبین و تکرار آن مانند روش پخش بار نیوتن- رافسون می باشد[۹]. در شبکه های توزیع بدلیل خصوصیات ویژه شبکه مثل ساختار شعاعی، نسبت R/X بالا و عدم تعادل بار روشهای پخش بار معمولی مانند نیوتن- رافسون و گاؤس- سایدل که معمولاً در سیستمهای انتقال مورد استفاده قرار می گیرند، مناسب نمی باشند. در مقالات مختلف، روشهای جاروب پس رو- پیش رو برای تجزیه و تحلیل پخش بار سه فاز متقارن و نامتقارن در این نوع شبکه ها پیشنهاد شده است[۱۰]-[۲۱]. لیکن این روش ها نیز برای ساختارهای حلقوی شبکه عاجز می باشند. یکی دیگر از ضعف روش های موجود جاروب پس رو- پیش رو در مدلسازی باسهای منابع بصورت باس PQ منفی می باشد و در مدلسازی منابع بصورت باس کنترل ولتاژ (PV) ناتوان هستند.

بدین ترتیب با ظهور شبکه های قدرت هوشمند، صنعت برق جهان با نقص بزرگ تحلیل پخش بار برای شبکه های جدید مواجه خواهد بود. بنابراین ارائه روش پخش بار جامع برای شبکه های قدرت نسل جدید لازم و ضروری می باشد که در عین پوشش تمامی ویژگی های شبکه های توزیع شعاعی و حلقوی و نیز

پوشش مدل های مختلف منابع انرژی بصورت باس های PV و PQ تحت شرایط بهره برداری سه فاز متقارن و نامتقارن مؤثر واقع شود.

دراین پروژه روشی نوین و جامع برای تجزیه و تحلیل پخش بار در شبکه های توزیع نسل جدید با ویژگی های شعاعی و حلقوی همراه مدلسازی انواع بار، انواع منابع انرژی، انواع خطوط توزیع و انواع اتصالات ترانسفورماتوری ضمن پوشش حالات سه فاز متعادل و نامتعادل شبکه ارائه می شود. روش پیشنهادی پخش بار دارای ویژگی های سرعت همگرائی بالا و حجم داده های پردازشی کم - بدلیل ساختار تقارنی ماتریس هایی که در فصل پنجم معرفی می شوند- بوده و با توجه به ویژگی های منحصر به فردی که شامل تمامی جنبه های شبکه های توزیع نسل جدید می باشد، در سطح بسیار مناسب برای شبکه های توزیع اکتیو و هوشمند نسل جدید معرفی می گردد.

۱-۲- ساختار پروژه

از آنجائیکه سیستمهای توزیع نسل جدید شامل شبکه های توزیع هوشمند بوده و با توجه به اهمیت خاصی که تحلیل پخش بار در این نوع شبکه ها چه از منظر سرعت همگرائی و حجم داده های مخابراتی و چه از منظر مؤثر بودن روش بکار گرفته شده برای ویژگی های منحصر به فرد این شبکه ها دارد، فصل دوم این پروژه به معرفی اجمالی شبکه های توزیع هوشمند و همچنین جایگاه تحلیل پخش بار در این شبکه ها اختصاص داده شده است.

همانگونه که ذکر شد روشهای مختلفی برای تجزیه و تحلیل پخش بار در سیستمهای قدرت ارائه و تنظیم شده اند. در فصل سوم این پروژه به بررسی معادلات پخش بار و انواع روش های موجود تحلیل پخش بار و نقاط ضعف آنها می پردازیم.

اولین قدم در آنالیز یک سیستم قدرت مدلسازی اجزای تشکیل دهنده آن است. یکی از ویژگی های شبکه های توزیع الکتریکی اکتیو شرایط بهره برداری سه فاز نامتعادل آنهاست. در فصل چهارم به مدلسازی عناصر شبکه های توزیع از جمله خطوط توزیع هوایی و کابل های زمینی با در نظر گرفتن اثر زمین، ترانسفورماتورهای قدرت با انواع اتصالات رایج و همچنین به بررسی انواع مدل های مختلف بارهای مصرفی در شبکه های توزیع می پردازیم.

در فصل پنجم، با توجه به ضعف ها و ناتوان بودن روش های آنالیز پخش بار موجود، روش پیشنهادی تحلیل پخش بار در شبکه های توزیع اکتیو ارائه شده و به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد. روش پخش بار پیشنهادی شامل حالات سه فاز متعادل و نامتعادل برای شبکه های اکتیو شعاعی، حلقوی و ترکیبی می

باشد. سایر الگوریتم های مربوط به روش تحلیل پخش بار پیشنهادی همچون الگوریتم شناسایی حلقه در شبکه و الگوریتم های تعیین ماتریس Δ ارائه شده که در بحث های مربوط به تجدید ساختار شبکه، جایابی DG و خازن در شبکه و غیره نیز می توانند مورد استفاده پژوهش گران در این زمینه قرار گیرند.

فصل ششم این پروژه نتایج شبیه سازی روش تحلیل پخش بار پیشنهادی را در بر می گیرد. روش پیشنهادی به شبکه های توزیع استاندارد ۴ باسه، ۳۳ باسه و ۳۴ باسه IEEE سه فاز متعادل و سه فاز نامتعادل با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای هر شبکه اعمال شده و نتایج کامل شبیه سازی به همراه جداول مقایسه ای و نمودارهای پروفیل ولتاژ برای هر سناریو تهیه و تنظیم شده اند. مشخصات و نتایج پخش بار برای سیستم های استاندارد مذکور که توسط انجمن مهندسین برق و الکترونیک (IEEE)[۶] تدوین شده است در فصل ششم گردآوری شده و نتایج پخش بار حاصل از روش پیشنهادی دقیقاً منطبق بر نتایج ارائه شده IEEE می باشد. فصل هفتم شامل نتیجه گیری بوده و نهایتاً فهرست مراجع نوشته شده اند.

[6] Institute of Electrical and Electronics Engineers

فصل دوم :

شبکه های توزیع هوشمند