



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه مهندسی برق قدرت

جایابی بهینه دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور در شبکه‌های قدرت

دانشجو:

نیما امین

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۹۰

تقدیم به پدر و مادر مهربانم که در تمامی مراحل زندگی حامی و مشوق من بوده و درس زندگی و مهربانی را به من آموختند.

و تقدیم به برادر و خواهران مهربانم که همیشه با راهنمایی‌های خود عامل رشد و پیشرفت من بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

اینجانب بر خود واجب می‌دانم که از تلاش و کمک‌های فراوان استاد گرامی جناب آقای دکتر بانژاد که از راهنمایی‌های ایشان در طی انجام این پروژه بهره فراوان برده‌ام، تقدیر و تشکر نمایم و امیدوارم شاگردی شایسته برای ایشان بوده و باشم. همچنین از پدر و مادر خود و تمامی دوستانی که در طی اجرای این پروژه به من کمک نموده‌اند نیز تشکر می‌نمایم.

کلمات کلیدی

دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور (PMU)، جایابی بهینه، تخمین حالت، حل معادلات عدد صحیح مخلوط

[1] Nima Amin, Mahdi Banejad, “*Optimal Placement of Phasor Measurements Units Considering Redundancy and Single Branch Outage*”, 46th International Universities’ Power Engineering Conference (UPEC 2011), Germany, September 5-8, 2011.

[2] Nima Amin, Mahdi Banejad, “*Generalized Formulation for Optimal Placement of PMUs with Considering Single Unit or Single Branch Outage*”, International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP 2011), China, October 16-20, 2011.

عنوان	صفحه
فصل اول	
مقدمه	۱
۱-۱- معرفی سیستم اندازه گیری فراگیر	۲
۲-۱- هدف از نصب PMU	۳
۳-۱- اهداف پایان نامه	۵
۴-۱- ساختار کلی پایان نامه	۶
فصل دوم	
تخمین حالت و ساختارسیستم های اندازه گیری فازور	۸
۱-۲- مقدمه	۹
۲-۲- تاریخچه پیدایش دستگاه های اندازه گیری فازور	۹
۳-۲- تکنولوژی PMU	۱۳
۴-۲- ساختار WAMPC	۲۱
۵-۲- سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS)	۲۳
۶-۲- مزایای استفاده از PMU	۲۵
۷-۲- کاربردهای PMU در سیستم های قدرت	۲۷
۸-۲- کاربردهای WAMPC	۲۸
۹-۲- مدل فازوری	۳۶
۱۰-۲- رویت پذیری کامل شبکه	۳۹
۱۱-۲- فرمول بندی مسأله جایابی بهینه واحدهای اندازه گیری فازور	۴۴
۱۲-۲- روش های رایج جایابی بهینه واحدهای اندازه گیری فازور	۵۲
فصل سوم	
جایابی بهینه واحدهای اندازه گیری فازور	۵۵
۱-۳- مقدمه	۵۶
۲-۳- فرمول بندی کلی مسئله	۵۸
۳-۳- در نظر گرفتن هزینه نصب	۶۲

۳-۴- حل مسئله به روش جستجوی دودویی فراگیر در شرایط عملکرد نرمال ۶۳

۳-۵- حل مسئله به روش برنامه ریزی عددی در شرایط عملکرد نرمال ۶۶

۳-۶- مشاهده پذیری در شرایط از دست رفتن یک واحد یا یک خط ۶۸

فصل چهارم

نتایج شبیه سازی بر روی شبکه های نمونه ۷۳

۴-۱- مقدمه ۷۴

۴-۲- نتایج شبیه سازی روش جستجوی دودویی فراگیر در شرایط عملکرد نرمال ۷۴

۴-۳- نتایج شبیه سازی روش برنامه ریزی عددی در شرایط عملکرد نرمال ۷۷

۴-۴- نتایج شبیه سازی روش برنامه ریزی عددی در شرایط از دست رفتن یک واحد یا یک خط ۸۸

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات ادامه کار ۹۲

۵-۱- نتیجه گیری ۹۳

۵-۲- پیشنهاد ادامه کار ۹۴

پیوست الف

الگوریتم CPLEX ۹۵

الف-۱- مقدمه ۹۶

الف-۲- بهینه ساز سیمپلکس ۹۷

الف-۳- بهینه ساز تعریف مانع ۹۸

الف-۴- الگوریتم ترکیبی CPLEX بکارگرفته شده در پروژه ۱۰۰

الف-۵- روش صفحات برش ۱۰۵

الف-۶- روش سیمپلکس ۱۰۷

الف-۷- روش هوشمند ۱۰۸

مراجع ۱۱۱

فهرست اشکال

صفحه

شکل ۱-۲- نمودار بلوکی PMU.....	۱۴
شکل ۲-۲- اختلاف فاز بین دو نقطه A و B (الف- با داده های سنکرون، ب- با داده های تاخیردار).....	۱۷
شکل ۳-۲- ساختار سیستم اندازه گیری فازور همزمان.....	۱۸
شکل ۴-۲- نمای ساده ای از نصب PMU در یک پست.....	۱۹
شکل ۵-۲- نمایی از مدار حرکت ماهواره‌ها در اطراف زمین.....	۲۴
شکل ۶-۲- شکل موج سینوسی و نمایش مدل فازوری آن.....	۳۷
شکل ۷-۲- فازورهای هماهنگ اندازه گیری شده در دو نقطه مختلف از یک شبکه و با مرجع زمانی یکسان.....	۳۸
شکل ۸-۲- اختلاف فاز فازورهای هماهنگ در شین‌های مختلف شبکه با در نظر گرفتن یک شین به عنوان مرجع.....	۳۹
شکل ۹-۲- قانون اول و دوم جایابی PMU.....	۴۲
شکل ۱۰-۲- قانون سوم جایابی PMU.....	۴۳
شکل ۱۱-۲- قانون چهارم جایابی PMU.....	۴۳
شکل ۱۲-۲- سیستم تست ۷ باسه.....	۴۶
شکل ۱۳-۲- شبکه نمونه ۷ شینه پس از ترکیب شدن شین‌های ۳ و ۶.....	۵۰
شکل ۱-۳- سیستم تست ۷ باسه.....	۵۸
شکل ۲-۳- اتصال یک شین به دو شین تزریق صفر.....	۵۹
شکل ۳-۳- اتصال دوشین تزریق صفر به یکدیگر.....	۶۰
شکل ۴-۳- شبکه هفت شینه با دو شین تزریق صفر متصل به یکدیگر.....	۶۰
شکل ۵-۳- روندنمای روش فرمول‌بندی پیشنهادی.....	۶۳
شکل ۶-۳- روندنمای الگوریتم ارائه شده به روش جستجوی دودویی فراگیر.....	۶۶
شکل ۷-۳- روندنمای الگوریتم ارائه شده به روش برنامه‌ریزی عددی.....	۷۲
شکل ۱-۴- شبکه تست استاندارد ۱۴ شینه IEEE.....	۷۵
شکل ۲-۴- ناحیه قابل دسترسی هر واحد اندازه‌گیری بر اساس چیدمان پاسخ اول.....	۷۶
شکل ۳-۴- ناحیه تحت پوشش واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۱۴ شینه.....	۷۹

- شکل ۴-۴- محل شین‌های تزریق صفر و نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۳۰ شینه..... ۸۱
- شکل ۴-۵- محل شین‌های تزریق صفر و نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۳۹ شینه..... ۸۲
- شکل ۴-۶- محل شین‌های تزریق صفر و نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۵۷ شینه..... ۸۵
- شکل ۴-۷- محل شین‌های تزریق صفر و نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۱۱۸ شینه..... ۸۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱- معرفی سیستم اندازه گیری فراگیر^۱

در چند سال اخیر استفاده از روش اندازه گیری فازور به یکی از معیارهای مهم برای ارزیابی پایداری شبکه و بهبود وضعیت آن تبدیل شده است. واحدهای اندازه گیری فاز (PMU^۲) با استفاده از سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS^۳) تحول عظیمی در بهره برداری از سیستم قدرت ایجاد نموده است که از آن جمله می توان به بهبود تخمین حالت در سیستم های قدرت اشاره نمود.

با پیشرفت تکنولوژی های پردازش سیگنال، واحدهای اندازه گیری فازور برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی معرفی شدند. بدلیل قابلیت اندازه گیری فازور به صورت مستقیم در نقاط مختلف شبکه، این دستگاه ها به سرعت جای خود را مطالعات سیستم باز کردند و هم اکنون این تکنولوژی ساده ولی قدرتمند، تبدیل به ابزاری مهم در مدیریت شبکه های قدرت و بهبود وضعیت آن شده است. در حال حاضر در نقاط مختلف جهان و در بسیاری از سیستم های قدرت پیشرفته تعداد زیادی از این دستگاه ها نصب و مورد بهره برداری قرار گرفته است و استفاده از آن نیز با سرعت در حال گسترش است. دقت بسیار بالا (بسته به تکنولوژی شرکت سازنده) و سرعت بالا (بسته به هدف از این اندازه گیری) باعث شده است که PMU جزء اصلی سیستم های اندازه گیری فراگیر گردد. در این حالت برای تعیین وضعیت فعلی سیستم، از الگوریتم های تخمین حالت^۴ استفاده می گردد. ورودی این الگوریتم نتایج دستگاه های اندازه گیری فاز و خروجی آن دامنه فاز ولتاژ تمام شین ها می باشد.

سیستم های متداول اکتساب اطلاعات (SCADA^۵) و مدیریت انرژی (EMS^۶) امکان نمونه برداری همزمان در نقاط مختلف شبکه را ندارند و به همین دلیل مقدار فاز ولتاژ و جریان را نمی توانند در هر لحظه در نقاط مختلف شبکه در اختیار کاربر قرار دهند. سرعت پایین نمونه برداری

^۱ Wide Area Measurement System (WAMS)

^۲ Phasor Measurement Unit

^۳ Global Positioning System

^۴ Estate Estimation

^۵ Supervisory Control And Data Acquisition

^۶ Energy Management System

این سیستم‌ها و دقت پایین که حدوداً هر ۱۰ ثانیه یکبار اندازه ولتاژ، جریان، توان حقیقی و توان راکتیو را به ما می‌دهند برای بسیاری از کاربردها زیاد متناسب نیستند. علاوه بر آن، بعد از جمع‌آوری داده‌ها، برای تعیین وضعیت سیستم باید الگوی تخمین حالت با داده‌های غیر همزمان را اجرا کرد که خود یک فرآیند غیر خطی زمانبر است. ولی با استفاده از داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازوری امکان خطی شدن این الگوریتم بوده و سرعت و دقت تخمین حالت بسیار بیشتر می‌شود که در نتیجه باعث بهبود سرعت سیستم‌های کنترلی و حفاظتی و مدیریتی که از نتایج تخمین حالت استفاده می‌کنند، می‌گردد [۱].

۱-۲- هدف از نصب PMU

با توجه به گستردگی، وسعت و به هم پیوستگی شبکه‌ها قدرت در منطقه‌ای وسیع در محدوده یک کشور و یا حتی چند کشور و فاصله زیاد منابع تولید از مصرف، دسترسی لحظه به لحظه به اطلاعات کل شبکه در یک مرکز پایش متمرکز با دشواری‌های زیادی همراه می‌باشد. همچنین با توجه به پیچیدگی شبکه‌های قدرت، در بسیاری از مواقع، وقوع حادثه در بخشی از شبکه به سرعت بر عملکرد سیستم و درجه امنیت آن حتی در مناطق بسیار دوردست به خاطر مسافت زیاد با مشکلاتی روبروست. این مسئله سالیان سال یکی از دغدغه‌های متخصصین این امر بوده و راه‌حل‌های مختلفی برای حل آن پیشنهاد شده است.

با روند روز افزون رشد بار، هر روزه بر تراکم بار، پیوستگی و پیچیدگی شبکه‌های قدرت افزوده شده و و از سوی دیگر، روند گسترش خصوصی‌سازی در همه کشورها و مطرح شدن مسئله بازار برق منجر به کاهش حاشیه پایداری شبکه و افزایش تراکم در شبکه می‌گردد. شکل‌گیری افکار عمومی به سمت حمایت بیشتر از محیط زیست و مقاومت جوامع در برابر احداث نیروگاه‌های جدید و تخصیص، مدیریت شبکه را مجبور به بارگذاری شبکه‌های موجود در نزدیکی مرزهای پایداری نموده است. این کاهش حاشیه پایداری به معنی افزایش احتمال وقوع پیشامد در شبکه است [۲].

همچنین بروز پی در پی حوادث طبیعی، شرایط نامساعد جوی، خطاهای انسانی و خرابی تجهیزات شبکه و مصرف‌کنندگان، منجر به بروز ناپایداری و نوسانات بین ناحیه‌ای می‌گردد. این خطاها می‌توانند به سرعت به کل سیستم سرایت کرده و منجر به بدی عملکرد در کل سیستم گردد. در این مواقع سیستم‌های مانیتورینگ و تشخیص خطا و عملکرد بر اساس اطلاعات محلی و ناهماهنگ با سایر تجهیزات کنترلی، پاسخگوی مناسبی به خطای پیشامده نخواهند بود. در نتیجه دسترسی لحظه به لحظه به اطلاعات مربوط به وضعیت نقاط مختلف سیستم در یک مرکز پایش و کنترل فراگیر متمرکز امری ضروری به نظر می‌رسد [۲].

با بکارگیری سیستم پایش و کنترل فراگیر، این امکان فراهم می‌شود که با قابلیت اطمینان بیشتر بتوان از ظرفیت خطوط تا نزدیکی مرزهای پایداری استفاده کرد و در عین حال از افزایش ریسک فروپاشی ممانعت به عمل آورد. همچنین با وقوع اغتشاشات مختلف در یک شبکه پایش و کنترل شونده به وسیله این سیستم، می‌توان شرایط بحرانی را به سرعت و به صورت زمان حقیقی^۷ تشخیص و اقدامات اصلاحی متناسبی را برای جلوگیری از پیشرفت خطا و وقوع ناپایداری‌ها انجام داد [۲].

به طور کلی هر سیستم پایش و کنترل فراگیر شامل فرآیندهای زیر می‌باشد [۲]:

- اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده‌ها
- تبادل و تحویل داده‌ها
- تجزیه و تحلیل داده‌ها
- اتخاذ تصمیمات کنترلی لازم

که به منظور پایش مناسب شبکه، اندازه‌گیری‌های لازم باید خصوصیات زیر را داشته باشد:

⁷ Real time

- از نقاط مختلف سیستم جمع‌آوری شوند.
- دارای نرخ نمونه‌برداری بالا باشد.
- در یک لحظه زمانی انجام شده باشند.

به همین دلیل واحدهای اندازه‌گیری فازور، عنصر کلیدی در این سیستم می‌باشند. این تجهیزات قادرند فازور ولتاژ شین‌ها و همچنین جریان خطوط را با دقت بسیا بالا اندازه‌گیری و از سیستم موقعیت‌یاب جهانی برای سنکرون‌سازی اندازه‌گیری‌های خود استفاده کنند. این واحدها بایستی در نقاط کلیدی و مناسبی از شبکه نصب شده باشند [۲].

۱-۳- اهداف پایان نامه

همانگونه در بخش قبلی گفته شد، دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور به منظور اندازه‌گیری پارامترهای ولتاژ و جریان مورد نیاز مرکز پایش برای تحلیل دقیق نرم‌افزاری، باید در محل‌های مناسبی نصب شوند تا متغیرهای شبکه با استفاده از این اطلاعات با دقت زیادی محاسبه شوند. این اطلاعات باید به گونه‌ای باشند تا فازور ولتاژ همه باس‌ها و جریان تمام خطوط قابل محاسبه باشند. در شرایط ایده‌آل بهتر است این دستگاه‌ها در تمامی نقاط شبکه نصب شده تا اطلاعات کافی از تمام شبکه داشته باشیم. ولی با توجه به هزینه بالای خرید و نصب این تجهیزات، این کار عملا مقرون به صرفه نبوده و باید کمترین تعداد دستگاه اندازه‌گیری در شبکه نصب شود، به گونه‌ای که تمامی اطلاعات مورد نیاز نیز بدست آید.

در این پایان‌نامه، با توجه به بالا بودن هزینه نصب و راه‌اندازی دستگاه اندازه‌گیری فازور، روشی پیشنهاد خواهد شد تا کمترین تعداد شین برای نصب این دستگاه‌ها ارائه شود، به نحوی که تمامی اطلاعات مورد نیاز مرکز پایش قابل جمع‌آوری باشد. هدف از این پایان‌نامه کمینه کردن هزینه نصب دستگاه‌ها و پیدا کردن محل مناسب برای نصب آنها در شبکه می‌باشد. همچنین این جایابی به

صورتی پیشنهاد خواهد شد تا در صورت خرابی یکی از دستگاه‌ها و یا قطع شدن یکی از خطوط انتقال، وقفه‌ای در عملکرد مرکز پایش ایجاد نشده و تمامی متغیرهای ولتاژ و جریان شبکه قابل اندازه‌گیری و یا قابل محاسبه باشند. در این پروژه ابتدا مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور با روش ارائه شده در این پروژه فرمول‌بندی شده، سپس معادلات بدست آمده با دو روش مختلف حل شده و نتایج بدست آمده مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.

در این پروژه در بخش‌های متفاوت، ایده‌های مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ارائه روشی جدید برای در نظر گرفتن شین‌های تزریق صفر^۸ در شبکه و همچنین شین‌های

تزریق صفر متصل به یکدیگر و خطی سازی معادلات

- ارائه روشی جدید برای در نظر گرفتن از دست رفتن یک واحد اندازه‌گیری و یا یک خط در

یک الگوریتم مشترک

۱-۴- ساختار کلی پایان نامه

در این پایان‌نامه، در ابتدا سیستم اندازه‌گیری فراگیر و همچنین دستگاه اندازه‌گیری فازور، به عنوان مهمترین تجهیز این سیستم، به طور مختصر معرفی شد. همچنین ضرورت تحقیق به منظور جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور نیز مطرح گردید. در ادامه، در فصل دوم، ابتدا تاریخچه‌ای از پیدایش واحدهای اندازه‌گیری در جهان بیان خواهد شد. همچنین در این فصل ساختار سیستم PMU، بخش‌های مختلف سیستم و تکنولوژی آن و همچنین روش‌های انتقال اطلاعات و سیستم موقعیت‌یاب جهانی بررسی خواهد شد. بعد از آن موارد کاربرد و مزایای این سیستم مطرح شده و در همچنین مرور مختصری بر مدل فازوری، روش‌های تخمین حالت و انواع رویت‌پذیری خواهیم داشت.

⁸ Zero Injection Bus

در انتهای این فصل، روش‌های رایج جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور بررسی خواهد شد و بر اساس نحوه عملکرد الگوریتم آنها، دسته‌بندی خواهند شد.

در فصل سوم، دو روش جایابی ارائه شده در این پروژه، نحوه فرمول‌بندی مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور بر اساس روش‌های پیشنهادی توضیح داده خواهد شد و معایب و مزایای این روش‌ها در مقایسه با روش‌های ارائه شده در سایر مقالات مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در فصل چهارم، به منظور ارزیابی روش‌های ارائه شده در این پروژه، الگوریتم پروژه بر روی چندین شبکه استاندارد IEEE شبیه‌سازی خواهد شد و با بررسی و مقایسه نتایج حاصله از این طرح، کارایی این الگوریتم در شرایط واقعی بررسی خواهد شد.

سرانجام در فصل پنجم، نتایج گرفته شده از اجرای این پروژه و همچنین پیشنهاداتی برای ادامه

و یا بهبود آن، ارائه خواهد گردید.

فصل دوم

تخمین حالت و

ساختار سیستم‌های

اندازه‌گیری فازور

۲-۱- مقدمه

امنیت شبکه‌های قدرت و قرار داشتن متغیرهای آن در محدوده مجاز در شرایط عملکرد نرمال و حتی در زمان وقوع خطا در بخشی از شبکه، از مهمترین مسائل سیستم‌های قدرت می‌باشد. به کمک تخمین حالت در سیستم، متغیرهای شبکه بدست آمده و بهره‌بردار سیستم به کمک خروجی آن، قادر به اجرای سایر اعمال نظارتی و کنترلی نظیر پخش بار بهینه و ارزیابی امنیت سیستم می‌گردد. ورودی برنامه تخمین حالت اندازه‌گیری‌های انجام شده در نقاط مختلف شبکه بوده و خروجی آن متغیرهای حالت سیستم می‌باشد. در گذشته به دلیل وجود مشکلات اجرایی برای سنکرون سازی اندازه‌گیری‌های انجام شده و بروز خطا در این امر، این اندازه‌گیری‌ها فاقد زاویه بوده و تنها شامل اندازه ولتاژ و توان تزریقی برخی شین‌ها و اندازه توان عبوری از بعضی از خطوط می‌باشد.

این نوع اندازه‌گیری‌ها گرچه امکان حل مسئله تخمین حالت را فراهم می‌سازند، اما بنابر دلایلی از جمله دوره اندازه‌گیری طولانی و داشتن روابط غیر خطی با متغیرهای حالت سیستم، موجب کندی در زمان اجرای تخمین حالت شده و دقت آن را نیز بعضاً تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. گسترش تکنیک‌های سنکرون‌سازی بین اندازه‌گیری‌های نقاط مختلف، مشکلات فوق را بر طرف کرده و منجر به پیدایش واحدهای اندازه‌گیری فازور گردید.

در ادامه این فصل به بیان تاریخچه پیدایش این تجهیزات و آشنایی با نحوه عملکرد آن و کاربردهای آن در مطالعات شبکه خواهیم پرداخت. در انتهای این فصل نیز نگاهی به مدل فازوری خواهیم داشت و همچنین انواع روش‌های تخمین حالت و تعاریف مشاهده‌پذیری بیان خواهد شد.

۲-۲- تاریخچه پیدایش دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور

آغاز سیستم‌های نوین مدیریت انرژی (EMS) برپایه تخمین حالت به بعد از اتفاق سال ۱۹۶۵ در شبکه شمال شرقی آمریکا برمی‌گردد. از آن وقت بود که تحقیقات گسترده در مورد روش‌های

تشخیص حالت سیستم قدرت بر اساس اندازه‌گیری‌های زمان حقیقی شروع شد. البته در آن روزها امکان دستیابی به اندازه‌گیری‌های همزمان وجود نداشت و به جای آن روش‌هایی ابداع شد که در آن اندازه‌گیری‌ها با پایش مداوم شبکه بدست می‌آمد و از آن اندازه‌گیری‌ها، وضعیت شبکه از طریق یک تخمین زننده حالت غیرخطی، تخمین زده می‌شد [۱].

منشا سیستم‌های اندازه‌گیری فازور به توسعه رله‌های دیستانس مؤلفه متقارن (SCDR)^۹ در سال ۱۹۷۰ بر می‌گردد. مراحل که منجر به شکل‌گیری ایده انجام اندازه‌گیری‌های سنکرون و در نهایت ساخت آن شد، شامل دو مرحله است که عبارتند از: [۳]

- ابداع رله‌های دیستانس مؤلفه متقارن (SCDR)

- همزمانی^{۱۰} لحظه‌های نمونه‌برداری

میکروکامپیوترهای آن دوره قابلیت اجرای الگوریتم‌های رله دیستانس را نداشتند. با گسترش روزافزون سیستم‌های قدرت و احساس نیاز به افزایش قابلیت اطمینان آن، تلاش‌های فراوانی به منظور تدوین روش‌هایی به منظور حفاظت دیجیتال اجزاء سیستم‌های قدرت صورت گرفت. یکی از این تلاش‌ها، ابداع رله‌ی دیستانس مؤلفه متقارن جهت حفاظت خطوط انتقال ولتاژ بالا SCDR بود که با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر ولتاژ و جریان در پایانه خط انتقال، ۶ معادله خطای خطوط انتقال سه فاز (جریانها و ولتاژها) را به یک معادله تبدیل و محاسبه می‌کرد و نیاز به پردازش تنها یک رابطه، در انواع خطاهای ممکن، به منظور تعیین محل خطا از مزیت‌های آن محسوب می‌شد. یکی از نتایج آن، ارائه الگوریتم بازگشتی به منظور محاسبه‌ی مؤلفه‌های متقارن ولتاژ و جریان، معروف به تبدیل فوریه گسسته مؤلفه‌های متقارن (SCDFT)^{۱۱} می‌باشد. پس از آن بود که اندازه‌گیری مؤلفه‌های توالی مثبت ولتاژ و جریان با دقت بالا و با دوره زمانی یک سیکل فرکانس اصلی و خصوصاً به طور همزمان با سایر اندازه‌گیری‌ها برای استفاده در سایر کاربردها به نظر مناسب آمد. با

^۹. Symmetrical Component Distance Relay

^{۱۰}. Synchronization

^{۱۱}. Symmetrical Component Discrete Fourier Transform

گذشت زمان میکروکامپیوترها قابلیت اجرای الگوریتم رله دیستانس را پیدا کردند و بنابر این ابداع SCDR بر ای رله‌گذاری خطوط مدت زیادی مورد استفاده قرار نگرفت. اما ثابت شد که SCDR روشی کارآمد را برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان خطوط ارائه کرده است که برای دیگر کاربردهای سیستم می‌توان از آن استفاده کرد. نکته مهم در اینجاست که ولتاژ توالی مثبت، استخوان‌بندی اکثر برنامه‌های تحلیل سیستم قدرت، مثل برنامه‌های تحلیل پایداری، اتصال کوتاه، پخش بار بهینه، تخمین حالت، بررسی پیشامدها و غیره است.

فرض می‌شود که هدف، اندازه‌گیری ولتاژهای توالی مثبت دو شین سیستم است که از یکدیگر کیلومترها فاصله دارند. در صورتی که نمونه‌های اندازه‌گیری در دو پست به طور دقیق با یکدیگر سنکرون باشند و همچنین زمان‌های نمونه‌برداری نیز ذخیره شود، این اندازه‌گیری‌ها به همراه زمانهای نمونه‌برداری متناظر با آنها قابل ارسال به مرکزی دوردست بوده و سپس در این مکان با کنار یکدیگر قرار دادن اندازه‌گیری‌های فوق و مرتب کردن آنها از لحاظ زمانی، سیگنال‌های توالی مثبت اولیه می‌تواند به دست آورده شوند. پالس ساعت همزمان شده جهت نمونه‌برداری ولتاژ و جریان در دو شین استفاده می‌شود. زمان دقیق هر یک از لحظات نمونه‌برداری به عنوان برچسب زمانی^{۱۲} به مقادیر توالی مثبت محاسبه شده از نمونه‌های فوق، پیوست می‌شود. با استفاده از این اطلاعات می‌توان اندازه‌گیری‌های فازوری در نقاط مختلف سیستم و در یک مبنای مشترک را در یک مرکز کنترل جمع‌آوری کرد.

در اوایل ۱۹۸۰ ماهواره‌های مکان‌یابی جهانی (GPS) توسعه یافتند و مشخص شد که با استفاده از سیگنال‌های زمانی بعنوان ورودی پالس‌های نمونه‌برداری در سیستم اندازه‌گیری رله‌های دیجیتال، می‌توان یک ابزار اندازه‌گیری بسیار قدرتمند داشت که قادر است تصویر لحظه‌ای از حالت سیستم ارائه نماید.

¹². Time-tag

پروژه ساخت PMU در اوایل دهه ۱۹۸۰ در دانشگاه ویرجینیا شروع شد. در سال ۱۹۸۶ طراحی و ساخت آن تمام شد و تست نمونه‌های عملیاتی آن حدود چهار سال به طول انجامید. از سال ۱۹۹۰ انتقال تکنولوژی به صنعت صورت گرفت و شرکت‌های مختلفی اقدام به ساخت نمونه‌های با ویژگی‌های متفاوت PMU کردند [۳].

به دلیل اینکه تکنولوژی GPS در مراحل اولیه خود بود، سیستم‌های اولیه دریافت کننده GPS بسیار گران بودند، چون باید از مولد پالس‌های کریستالی استفاده می‌کردند تا زمان را به دقت نگهدارند. به همین دلیل در آغاز معرفی PMU برای استفاده در سیستم‌های قدرت، استقبال زیادی از آن نشده بود. امروزه با کامل شدن سیستم ماهواره‌ای، یک تراشه دریافت کننده GPS بیش از چند صد دلار قیمت ندارد. با تکمیل سیستم‌های گیرنده و فرستنده GPS و رشد سیستم‌های مخابراتی بعد از سال ۲۰۰۰ استقبال بسیار خوبی از تجهیزات PMU شده است.

در خاموشی ۱۴ آگوست سال ۲۰۰۳ در آمریکا، پنجاه میلیون نفر تحت تاثیر قرار گرفتند. ضرر اقتصادی وارده بیش از چهار و نیم بلیون دلار بود و باعث خارج شدن ۶۰۰۰۰ مگاوات توان تولیدی از شبکه گردید. در گزارش کمیته بررسی علل این خاموشی، موارد زیر به عنوان نیاز سیستم جهت مقاوم‌سازی در مقابل این نوع خاموشی‌ها ذکر شده‌اند:

- سیستم‌های نشان دهنده موقعیت بهبود یافته
- پایش^{۱۳} سطح وسیع و زمان واقعی وضعیت سیستم
- فناوری‌ها و ابزارهای جدید زمان واقعی برای اپراتورها و هماهنگ کننده‌های قابلیت اطمینان سیستم
- استفاده از داده‌های سنکرون برای پایش دینامیک سیستم
- مدیریت ولتاژ بهبود یافته

¹³ .Monitoring

- مدل‌سازی بهبود یافته برای تعیین حالت سیستم

توجه به موارد بالا نشان می‌دهد که وجود سیستم اندازه‌گیری همزمان و سنکرون در سطح گسترده، پیش‌نیاز اکثر آنها می‌باشد [۴].

۲-۳- تکنولوژی PMU

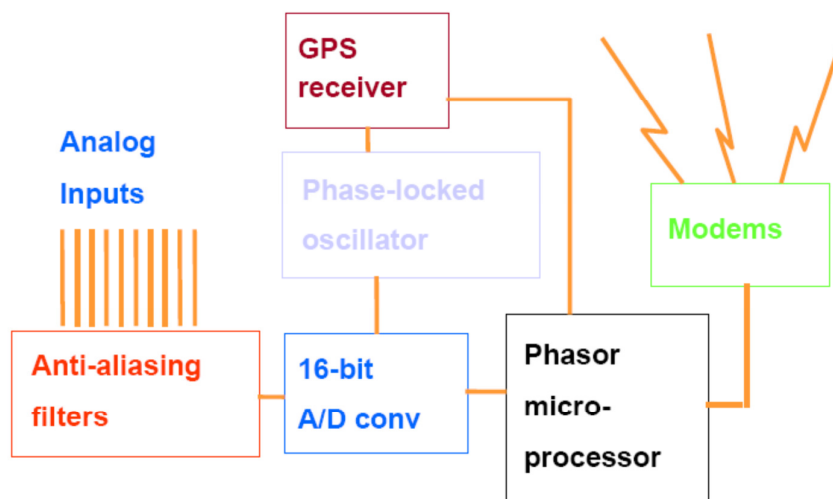
سیستم واحدهای اندازه‌گیری فازوری دارای بخش‌های مختلفی می‌باشد. اولین و مهمترین بخش از این سیستم خود دستگاه اصلی اندازه‌گیری می‌باشد که مستقیماً در پست‌ها نصب شده و اطلاعات مربوط به ولتاژ باس و جریان شاخه‌های متصل به آنرا توسط ترانس‌های ولتاژ و جریان از طریق کانال‌های ورودی خود دریافت می‌نماید. سپس این اطلاعات در مدارها و تجهیزات سخت‌افزاری و پروسسورهای داخلی پردازش می‌شود. بخش دوم از این سیستم مربوط به سیستم جمع‌آوری اطلاعات از این واحدها در یک نقطه مرکزی به منظور پردازش نهایی می‌باشد [۱].

بلوک دیاگرام PMU در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. بلوک‌های موجود عبارتند از: مدار آماده‌سازی سیگنال که از ترانسفورماتور اندازه‌گیری ولتاژ (VT^{14}) و ترانسفورماتور جریان (CT^{15}) ورودی می‌گیرد، مبدل آنالوگ به دیجیتال که با پردازنده اصلی ارتباط دارد، تولیدکننده پالس زمانی و واسط مخابراتی. نحوه‌ی عملکرد PMU را می‌توان چنین شرح داد که در ابتدا مدارهای آماده‌سازی سیگنال نمونه‌برداری لازم را با نرخ نایکوئیست انجام می‌دهد. سپس تبدیل نمونه‌های آنالوگ به دیجیتال، از طریق مبدل A/D^{16} انجام می‌شود. این مبدل معمولاً ۱۶ بیتی بوده و بنابراین از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. اخیراً استفاده از مبدل‌های ۱۸ بیتی نیز مورد توجه قرار گرفته است [۵].

¹⁴. Voltage Transformer

¹⁵. Current Transformer

¹⁶. Analog to Digital



شکل ۲-۱- نمودار بلوکی PMU [۷]

سپس رابط پردازنده‌ی اصلی^{۱۷} مبدل A/D را به پردازنده‌ی اصلی^{۱۸} مرتبط می‌سازد. پردازنده‌ی اصلی نقشی اساسی در عملکرد PMU دارد. جمع‌آوری و پردازش اطلاعات، ارسال سیگنال‌های کنترلی و ارتباط با دیگر واحدها و مرکز کنترل از وظایف این قسمت است. پردازنده اصلی باید قادر باشد به طور مؤثر و با حداقل پردازش ممکن با قسمت مبدل آنالوگ به دیجیتال ارتباط برقرار کند [۶].

مهمترین تابع در پردازنده، محاسبه‌ی فازورهای ولتاژ و جریان به صورت لحظه‌ای می‌باشد. در صورتی که آغاز مشاهده موج حالت ماندگار یک سیگنال قدرت از لحظه $t=0$ در نظر گرفته شود، شکل موج حالت ماندگار به وسیله یک عدد مختلط که اندازه‌ای برابر مقدار مؤثر سیگنال و فازی برابر زاویه آن دارد، نمایش داده می‌شود. در یک سیستم اندازه‌گیری دیجیتال، با شروع از لحظه $t=0$ نمونه‌هایی از سیگنال در یک پریود جمع‌آوری شد و سپس مؤلفه فرکانس اصلی آن بر اساس تبدیل فوریه گسسته^{۱۹} و با استفاده از رابطه (۲-۱) محاسبه می‌شود [۴].

¹⁷. CPU Host Interface

¹⁸. Host CPU

¹⁹ Discrete Fourier Transform (DFT)

$$X = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N x_{ke}^{-j\frac{2k\pi}{N}} \quad (1-2)$$

که N تعداد کل نمونه‌ها در یک پریود، X بردار متناظر با فرکانس اصلی و x_k مقدار نمونه k ام می‌باشد. لازم به ذکر است که شکل موج ولتاژ (جریان) به صورت پیوسته توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری نمونه‌برداری می‌گردد و هر زمان که نمونه جدیدی به دست می‌آید، فازور جدیدی بر اساس آخرین نمونه‌ها، حاصل می‌شود. مؤثرترین روش جهت نمایش پیوسته شکل موج ورودی، استفاده از فرم بازگشتی معادله فازوری به فرم (۲-۲) می‌باشد.

$$X_{k+1} = X_k + \frac{\sqrt{2}}{N} (x_{N+k} - x_k) e^{-j\frac{2k\pi}{N}} \quad (2-2)$$

که X_k فازور ولتاژ (جریان) در فرکانس اصلی برای نمونه k ام و X_{k+1} فازور ولتاژ (جریان) به ازای نمونه $k+1$ ام می‌باشد. رابطه (۲-۲) محاسبه فازور یک فاز را نشان می‌دهد. فازور دو فاز دیگر نیز در یک سیستم سه فاز به طور مشابه قابل محاسبه می‌باشد. سپس فازور توالی مثبت می‌تواند به طریق (۳-۲) محاسبه گردد [۴].

$$X_1 = \frac{1}{3} (X_a + \alpha X_b + \alpha^2 X_c) \quad (3-2)$$

که $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ بوده و X_a, X_b, X_c فازورهای محاسبه شده سه فاز هستند. به طور کلی به منظور تحلیل شرایط سیستم استفاده از فازورهای توالی مثبت پرکاربردتر می‌باشد. فازورهای محاسبه شده با استفاده از رابطه (۳-۲) بر اساس فرکانس اصلی خواهند بود و الگوریتم فوق، تمام هارمونیک‌های مضرب ۵۰ هرتز را فیلتر می‌کند. این فازورها با سرعت زاویه‌ای برابر با اختلاف بین فرکانس اصلی مرجع و فرکانس واقعی سیگنال قدرت خواهد چرخید. در صورتی که فازور توالی مثبت محاسبه شده برابر با $X_1 = |X_1| e^{j\theta}$ در نظر گرفته شود، فرکانس واقعی سیستم مقدار فرمول (۴-۲) را خواهد داشت.

$$\omega = \omega_0 + \frac{d\theta}{dt} \quad (۴-۲)$$

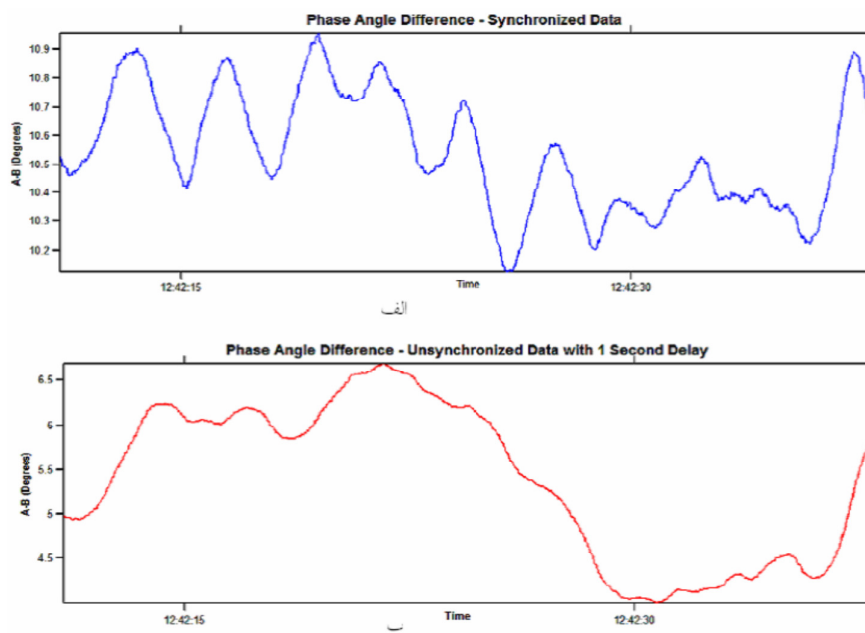
که ω_0 فرکانس اصلی می‌باشد. روش فوق از دقت بالایی برخوردار بوده و قادر است تغییرات جزئی در فرکانس سیستم را آشکارسازی کند؛ به طوریکه انحراف استاندارد $0/001$ نیز با آن سنجیده شده است. پس از فراهم شدن فازورهای اندازه‌گیری شده، این فازورها همراه با برچسب زمانی متناظر، از طریق درگاه سری^{۲۰} مخابراتی RS232 فرستاده می‌شوند. پالس‌های زمانی سنکرون شده که جهت نمونه‌برداری از سیگنال‌های آنالوگ ولتاژ یا جریان نیاز می‌باشد؛ می‌تواند از منابع مختلفی مانند امواج AM، خطوط فیبر نوری و سیستم‌های ماهواره‌ای تأمین گردند. فرستنده‌های AM اقتصادی‌ترین منبع تأمین سیگنال‌های سنکرون کننده می‌باشد، اما مواردی نظیر پوشش محدود، تضعیف سیگنال و دقت کم (چنین سیستم‌هایی به ندرت به دقت بالاتر از یک میلی‌ثانیه می‌رسند)، از معایب این گزینه می‌باشد. دقت فیبر نوری در حد میکروثانیه است ولی هزینه‌ی تحمیلی آن خیلی زیاد است. در حال حاضر گزینه‌ی بهینه از لحاظ اقتصادی و میزان پوشش، استفاده از سیستم‌های ماهواره‌ای می‌باشد. گیرنده GPS علاوه بر ساعت دقیق جهانی (UTC) در هر ثانیه ۱ پالس (PPS^{۲۱}) دریافت کرده و آن را به PLO^{۲۲} می‌دهد. فاصله بین دو پالس با توجه به دقت مورد نیاز تقسیم می‌شود. در PMUهای موجود دقت سنکرون‌سازی ۱ میکروثانیه می‌باشد. سنکرون‌سازی در PMU اهمیت خیلی زیادی دارد. شکل ۲-۲ نشان‌دهنده اختلاف فاز بین دو نقطه برای دو حالت سنکرون بودن و غیرسنکرون بودن داده‌ها را نشان می‌دهد. در حالت اول (شکل ۲-۲-الف) داده‌ها کاملاً سنکرون شده‌اند ولی در حالت دوم (شکل ۲-۲-ب) در اطلاعات ارسال شده از یکی از نقاط تاخیر ۱ ثانیه‌ای وجود دارد [۴].

²⁰ . SerialPort

²¹ . Pulse Per Socond

²² . Phase-Locked Oscillator

به طور معمول PMU می‌تواند تا ۶۰ نمونه در هر سیکل نمونه‌برداری کند. واحدهای اندازه‌گیری فاز موجود اکثراً دارای نرخ نمونه‌برداری ۴۸ نمونه در هر سیکل (۲۸۸۰ نمونه در هر ثانیه) هستند. پردازنده فازوری موجود در PMU، فازور سیگنال‌های ورودی را حساب می‌کند. علاوه بر این PMUها فرکانس را نیز اندازه‌گیری می‌کنند. نتایج اندازه‌گیری‌های با نرخ ۶۰ اندازه‌گیری در هر ثانیه قابل انتقال به واحد کنترل محلی و یا مرکزی می‌باشد [۴].



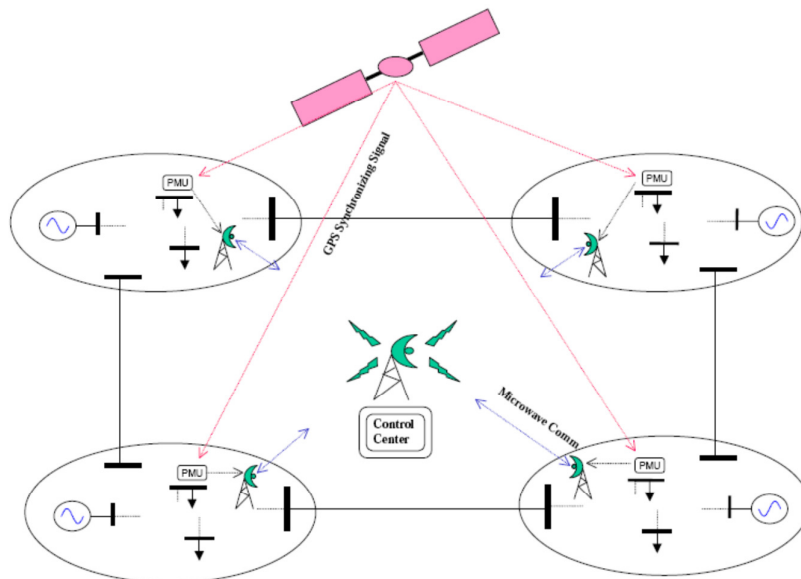
شکل ۲-۲- اختلاف فاز بین دو نقطه A و B (الف با داده‌های سنکرون، ب با داده‌های تاخیردار) [۷]

ساختار سیستم اندازه‌گیری فازور در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، PMU با دریافت سیگنال‌های سنکرون کننده از GPS کمیت‌های فازوری سیستم را اندازه‌گیری کرده و به همراه یک برچسب زمانی^{۲۳} به بخش متمرکز کننده داده‌های فازوری (PDC^{۲۴}) می‌فرستد. PDC اطلاعات متمرکز شده را برای کاربردهای کنترلی مختلف به هنگام، سیستم نمایش اطلاعات فازوری، واحد ذخیره‌سازی اطلاعات و بخش‌های دیگر می‌فرستد. ممکن است

²³ . Time Tag

²⁴ . Phasor Data Concentrator

در یک سیستم قدرت چند PDC موجود باشد، در این صورت PDCها علاوه بر اینکه اطلاعات خود را به کاربرهای موجود در ناحیه خود می‌فرستد، اطلاعات جمع‌آوری شده را به یک واحد متمرکزکننده اصلی داده‌های فازوری به اسم SPDC^{۲۵} هم ارسال می‌کنند [۶].



شکل ۲-۳- ساختار سیستم اندازه‌گیری فازور همزمان [۷]

۲-۲-۱- نصب و اتصالات PMU

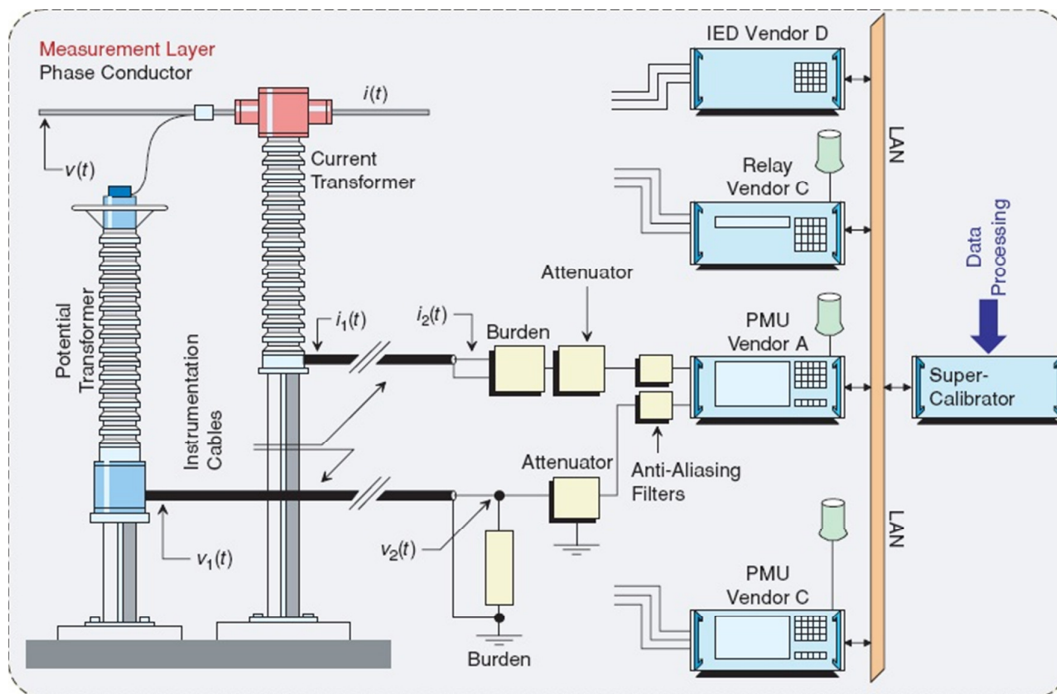
دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور از ولتاژ و جریان هر سه خط توسط ۳ عدد ترانس جریان^{۲۶} و یا ترانس ولتاژ^{۲۷} نمونه‌برداری می‌کند. در نتیجه برای هر فاز جریان و یا ولتاژ نیاز به ۲ سیم می‌باشد که به کانال‌های ورودی PMU متصل می‌گردد. دستگاه PMU در رک^{۲۸} مربوطه همراه با مودم و سایر تجهیزات مورد نیاز نصب شده و آنتن GPS نیز در پشت بام اتاق فرمان نصب می‌گردد. شکل ۲-۴ نمای ساده‌ای از نحوه اتصالات PMU در یک پست می‌باشد [۵].

^{۲۵} Super Phasor Data Concentrator

^{۲۶} Current Transformer (CT)

^{۲۷} Potential Transformer (PT)

^{۲۸} Rack



شکل ۲-۴- نمای ساده ای از نصب PMU در یک پست [۷]

برای نصب یک PMU در یک پست علاوه بر CT و PT موارد زیر نیز مورد نیاز می‌باشد.

- منبع تغذیه که معمولاً از باتری‌های داخل پست استفاده می‌شود.

- اتصال زمین

- اتصال آنتن سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)

- اتصال مدار مخابراتی (مودم و یا Ethernet)

۲-۲-۲- روش‌های انتقال اطلاعات PMU

چون این واحدها در پست‌های مختلف سیستم و فواصل دور از هم نصب می‌شوند بایستی اطلاعات آنها در یک مرکز کنترلی جمع‌آوری شود تا آنالیز آنها میسر شود. برای انتقال اطلاعات این واحدها به مرکز کنترل روش‌های مختلفی وجود دارد که در اینجا به اختصار به معرفی، مزایا و معایب هر یک از آنها می‌پردازیم. استاندارد IEEE C۳۷-۱۱۸ که در سال ۲۰۰۵ تصویب شده است

پروتکل انتقال اطلاعات بین PMU و PDC را مشخص ساخته است. این استاندارد جایگزین استاندارد IEEE ۱۳۴۴ که در سال ۱۹۹۸ برای این منظور تدوین شده بود، گشته است [۸].

۱- خطوط تلفن

ارزان بوده و نصب آنها آسان است، در حالت عادی سرعت $۵۶^{۲۹}$ kbps دارند ولی در داخل پست‌ها به دلیل وجود مدارهای ایزولاسیون سرعتشان حداکثر به ۹.۶ kbps می‌رسد.

۲- کابل فیبر نوری

سرعت بسیار بالا (50 Million -1 Billion bps) دارند. در برابر تداخلات رادیویی و جوی مصون هستند. پهنای باند زیادی دارند که می‌توان قسمت کوچکی از آن را به PMU اختصاص داد و بقیه را به کارهای دیگر مثل خطوط اینترنت اختصاص داد. خطوط فیبر نوری هزینه سرمایه‌گذاری اولیه‌ی بالایی نیاز دارند.

۳- ماهواره‌های ارتفاع پایین

استفاده از این ماهواره‌ها (Low Earth Orbit) هزینه‌های زیادی دارد، همچنین پهنای باند باریکی دارند و مشکل تاخیر زمانی نیز وجود دارد.

۴- تجهیزات PLC^{۳۰} خطوط قدرت

سرعت خوبی دارند (4 Mbps) و گزینه خوبی برای انتقال اطلاعات PMU می‌باشد.

۵- لینک‌های مایکروویو

²⁹. Kilo Bit Per Second

³⁰. Power Line Communication

دارای قابلیت اطمینان بالایی است و در دو بازه مختلف فرکانسی استفاده می‌شود. برای فواصل تا ۵ مایل از پهنای باند بزرگتر از ۱۰ GHZ استفاده می‌شود. برای فواصل ۵ تا ۳۰ مایل از پهنای باند کوچکتر از ۱۰ GHZ استفاده می‌شود. ایرادهای این روش مساله محو شدن سیگنال و خطای انتشار چند مسیره می‌باشد.

جدول زیر مقایسه‌ای بین زمان تاخیر لینک‌های مخابراتی مختلف تجهیزات اندازه‌گیری فازور می‌باشد.

جدول ۱-۲- زمان تاخیر لینک‌های ارتباطی مختلف

Communication Link	Associated Delay- one way (millisecond)
Fiber-Optic cables (50 Mbps- 1 Gbps)	>> 100- 150
Digital mictoeave links	>> 100- 150
Power Line (PLC) (uptp 4 Mbps)	>> 150- 350
Telephone lines (upto 56 kbps)	>> 200- 300
Sattelite link	>> 500- 700

۲-۴- ساختار^{۳۱} WAMPC

ایده اصلی بکار گرفته شده در WAMPC، پردازش متمرکز اطلاعات جمع‌آوری شده از نقاط مختلف سیستم است که هدف اصلی آن ارزیابی شرایط بهره‌برداری واقعی سیستم با توجه به حدود پایداری آن است. گرچه کاربردهای WAMPC با توجه به پدیده‌ی اتفاق افتاده بسیار گسترده است، اما ساختار زیربنایی در تمام کاربردها مشابه است. در این قسمت ساختار WAMPC از دو دیدگاه ساخت‌افزایی و نرم‌افزاری بررسی می‌شود. ساخت‌افزار بکار گرفته شده در WAMPC می‌تواند در سه سطح طبقه‌بندی گردد [۲-۴]:

- اکتساب اطلاعات
- تحویل اطلاعات

³¹ Wide Area Measurement, Protection & Control System

- پردازش اطلاعات

با توجه به این که سیستم‌های قدرت امروزه بسیار نزدیک به حدود پایداری خود کار می‌کنند، این سیستم‌ها به اغتشاشات بسیار حساس شده‌اند و بنابراین اعمال کنترلی و مونیتورینگ از حالت پیشگیرانه به اضطراری انتقال یافته‌اند.

به منظور مشاهده‌ی مناسب دینامیک سیستم، اندازه‌گیری‌های لازم می‌بایست خصوصیات ذیل را داشته باشند:

- از نقاط مختلف سیستم جمع‌آوری شوند.

- دارای نرخ نمونه‌برداری بالا باشند.

- در یک لحظه زمانی انجام شده باشند.

آخرین خصوصیت نیازمند سنکرون‌سازی با دقت بالا در لحظه اندازه‌گیری می‌باشد. مشکل سنکرون‌سازی به کمک GPS مرتفع شده و شرایط فوق با وجود دستگاه اندازه‌گیری فازوری (PMU) محقق گردید. در استفاده از PMU نیازی به ایجاد ارتباط بین واحدها نیست. بنابراین PMU با توجه به ویژگی بارز خود در اندازه‌گیری فازور ولتاژ و جریان، جزء اصلی WAMPC بشمار می‌رود.

آن چه که باید توسط PMU اندازه‌گیری شود و همچنین محل نصب آن به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که مهمترین آن‌ها نوع اغتشاش بوجود آمده است. انتقال اطلاعات اندازه‌گیری شده و یا انتقال فرمان‌های کنترل به کمک کانال‌های مخابراتی صورت می‌گیرد که باید برای این هدف مناسب شده باشند. در صورت عدم وجود کانال‌های مخابراتی، استفاده از شبکه TCP/IP معمول می‌باشد. اطلاعات رسیده در کامپیوتر مرکزی که دارای نرم‌افزار مناسب است، ذخیره می‌گردد [۲-۴].

ساختار نرم‌افزاری موجود در WAMPC را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد:

- کاربردهای کنترلی و ارزیابی ناپایداری

- سایر برنامه‌های جانبی مانند نظم و سازماندهی اطلاعات، ذخیره و بازیابی اطلاعات

برخی از الگوریتم‌ها نیاز به مشاهده‌پذیری کل سیستم دارند. بررسی پایداری‌های فرکانس و ولتاژ جزو این گروه‌ها هستند. این بدان معنی است که در این حالت توپولوژی شبکه، مقدار و زاویه‌ی تمام ولتاژها، مقدار و زاویه‌ی جریان تمام شاخه‌ها و بارهای انتخابی و نهایتاً مقدار و زاویه‌ی جریان ژنراتورها باید در دسترس باشد [۲-۴].

۲-۵- سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS^{۳۲})

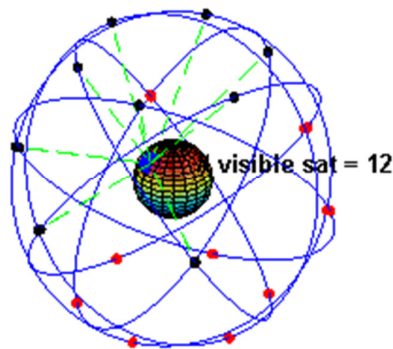
سیستم موقعیت‌یاب جهانی، یک سیستم راهبری و مسیریابی ماهواره‌ای است که از شبکه‌ای با حداقل ۲۴ ماهواره تشکیل شده است. این ماهواره‌ها به سفارش وزارت دفاع ایالات متحده ساخته و در مدار زمین قرار داده شده‌اند. جی‌پی‌اس در ابتدا برای مصارف نظامی تهیه شد ولی از سال ۱۹۸۰ استفاده عمومی آن آغاز شد [۹].

علاوه بر جی‌پی‌اس، دو سیستم کمابیش مشابه دیگر نیز وجود دارد: سیستم گلوناس^{۳۳} که دولت شوروی ساخته و اکنون به‌دست کشور روسیه اداره می‌شود و سیستم گالیله که کشورهای اروپائی آن را برای وابسته نبودن به سیستم آمریکائی جی‌پی‌اس ساخته‌اند.

سیستم تعیین موقعیت جهانی GPS متشکل از ۲۴ ماهواره است که در ارتفاع ۲۰۰۰۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارند و در ۶ مدار که در هر مدار ۴ ماهواره قرار دارد و با زاویه‌ی میل ۵۵ درجه و پریود ساعتی ۱۲ ساعته در گردش‌اند. نمایی از حرکت ماهواره‌ها بدور زمین در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.

³² Global Positioning System

³³ Glonvas



شکل ۲-۵- نمایشی از مدار حرکت ماهواره‌ها در اطراف زمین [۹]

ماهواره‌های این سیستم، در مدارهای دقیق هر روز ۲ بار به دور زمین می‌گردند و اطلاعاتی را به زمین مخابره می‌کنند. گیرنده‌های جی‌پی‌اس این اطلاعات را دریافت کرده و با انجام محاسبات هندسی، محل دقیق گیرنده را نسبت به زمین محاسبه می‌کنند. در واقع گیرنده زمان ارسال سیگنال از ماهواره را با زمان دریافت آن مقایسه می‌کند. از اختلاف این دو زمان، فاصله گیرنده از ماهواره تعیین می‌گردد. این عمل را با داده‌های دریافتی از چند ماهواره دیگر تکرار می‌کند و در نتیجه محل دقیق گیرنده را با تقریب ناچیز معین می‌کند [۹].

گیرنده به دریافت اطلاعات هم زمان از حداقل ۳ ماهواره برای محاسبه ۲ بعدی و یافتن طول و عرض جغرافیایی، و همچنین دریافت اطلاعات حداقل ۴ ماهواره برای یافتن مختصات سه بعدی نیازمند است. با ادامه دریافت اطلاعات از ماهواره‌ها گیرنده اقدام به محاسبه سرعت، جهت، مسیریپیموده شده، فواصل طی شده، فاصله باقی مانده تا مقصد، زمان طلوع و غروب خورشید و بسیاری اطلاعات مفید دیگر، می‌نماید [۹].

۲-۴-۱- روش تعیین موقعیت توسط GPS

اگر فاصله ما از ماهواره ۱ در حدود ۱۰ کیلومتر باشد بنابراین مکان ما در فضا بر محیط کره به مرکزیت ماهواره و شعاع ۱۰ کیلومتر منطبق می‌باشد حال فرض می‌کنیم فاصله ما از ماهواره ۲۰ در حدود ۱۱ کیلومتر باشد در این حالت نیز مکان ما در فضا بر روی محیط کره ای به مرکز ماهواره ۲

و شعاع ۱۱ کیلومتر واقع است فصل مشترک این دو کره می‌تواند یک دایره باشد که مکان ما بطور قطع بر روی محیط این دایره قرار دارد.

حال اگر ماهواره سوم را نیز در نظر بگیریم که فاصله اش با ما ۱۲ کیلومتر باشد در این صورت فصل مشترک کره مربوط به ماهواره ۳ با فصل مشترک کره های ماهواره ای ۱ و ۲ حداکثر دو نقطه می‌باشد که قطعاً یکی از این دو مبین مکان واقعی ما خواهد بود. اما بطور قطعی یکی از این دو نقطه نامعقول می‌باشد. بطور مثال دارای ارتفاع بیشتری از سطح زمین است. لذا کامپیوترهای داخل گیرنده های GPS با استفاده از تکنیک های گوناگون قادر به تشخیص نقطه غلط می‌باشند [۹].

از نظر تئوری با استفاده از ۳ ماهواره می‌توانیم مکان خود را به دست آوریم ولی به دلیل فنی اگرچنانچه ماهواره چهارم را همانند ماهواره‌های ۱ و ۲ انتخاب کنیم بطور قطع فصل مشترک این چهار کره یک نقطه خواهد بود و این نقطه مختصات مکانی ما را نشان می‌دهد استفاده کنندگانی که در ارتفاعی مشخص قرار دارند (مانند کشتی‌هایی که در سطح دریا واقع باشند) به سهولت می‌توانند با استفاده از دو ماهواره مکان خود را تعیین نمایند. در این حالت کره زمین را می‌توان جایگزین ماهواره سوم کرد و از یک مرحله محاسبه مسافت صرف نظر نمود [۹].

بطور خلاصه می‌توان بیان کرد که مبنای کار GPS استفاده از ماهواره به عنوان مرجعی جهت یافتن موقعیت در هر نقطه زمین می‌باشد سایر مسایل این سیستم صرفاً جزئیات تکنیکی هستند که به سرعت و دقت و سهولت عمل موقعیت یابی کمک می‌کند.

۲-۶- مزایای استفاده از PMU

از جمله عواملی که باعث برتر بودن تکنولوژی فازورها نسبت به سایر تکنولوژی‌ها می‌شود را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود [۳-۴ و ۷]:

- اندازه‌گیری سنکرون فازور: اساسی‌ترین مزیت PMU نسبت به سیستم‌های موجود، اندازه‌گیری همزمان فازور (دامنه و فاز) در سطح کل شبکه می‌باشد.
- نمونه‌برداری سریع: PMU قابلیت نمونه‌برداری تا ۶۰ نمونه در هر سیکل و ارسال اندازه‌گیری‌ها تا نرخ ۶۰ نمونه در هر ثانیه را دارا می‌باشند. در حالیکه سیستم‌های SCADA هر چند ثانیه یکبار اندازه‌گیری‌ها را ارسال می‌کنند. این تکنولوژی اطلاعات همزمان و بسیار دقیقی را با فاصله‌های زمانی کمتر از یک ثانیه (به طور معمول ۲۰، ۳۰ و یا ۶۰ نمونه در ثانیه) فراهم می‌آورد که برای مانیتورینگ منطقه وسیع، مانیتورینگ دینامیک و حالت دائم زمان واقعی شبکه، عملکرد سیستم قدرت نزدیک به مرزهای پایداری برای کاهش هزینه تراکم و بهبود وضعیت تخمین حالت، حفاظت و کنترل سیستم می‌گردد. سیستم‌های قدیمی SCADA بر اساس آنالیز پخش بار حالت دائم می‌باشد و در نتیجه قادر به مشاهده مشخصه دینامیکی سیستم قدرت نمی‌باشند. ولی تکنولوژی PMU با نمونه‌برداری کسری از ثانیه قابلیت نظارت بر رفتار دینامیک سیستم را فراهم می‌آورد.
- دقت نمونه‌برداری بالاتر: حداکثر خطای اندازه‌گیری دامنه برابر ۰/۱ درصد و حداکثر خطای اندازه‌گیری فاز ۰/۰۲ درجه می‌باشد.
- بازه‌های دقیق برای ثبت اطلاعات فازور، باعث افزایش مشاهده‌پذیری ناحیه‌ای که در آن اندازه‌گیری انجام شده است می‌گردد که در نتیجه قابلیت عملیات کنترلی هماهنگ در کل شبکه را فراهم می‌آورد.
- روش اندازه‌گیری فاز مستقیماً اندازه فاز را با سرعت کمتر از ثانیه اندازه‌گیری می‌نماید. در روش‌های قدیمی این پارامتر توسط تخمین حالت بدست می‌آید که ذاتاً دارای سرعت کمی می‌باشد (تقریباً هر ۵ دقیقه) و همچنین به دلیل ایجاد تغییر در ساختار و اجزای شبکه و یا داشتن مدل غیر دقیق از شبکه، دارای خطای زیادی می‌باشد.

- اطلاعات همزمان و با رزولوشن بالای این روش، قابلیت ارزیابی اغتشاش در شبکه را افزایش می‌دهد.

- سرعت نمونه‌برداری بالا و تاخیر بسیار کم سیستم جمع‌آوری اطلاعات در یک نقطه مرکزی، باعث افزایش پاسخ سیستم به شرایط غیر عادی شده است.

اندازه‌گیری فرکانس: PMUها علاوه بر اندازه‌گیری فازورهای ولتاژ و جریان، فرکانس را نیز اندازه‌گیری می‌کنند.

۲-۲- کاربردهای PMU در سیستم‌های قدرت

معمولاً فازورها به منظور نمایش امواج سینوسی حالت ماندگار که دارای یک فرکانس اصلی هستند، به کار برده شده و ابزار پایه به منظور تحلیل مدارها با جریان متناوب می‌باشند. حتی در صورتی که یک سیستم قدرت در شرایط کاملاً پایدار نباشد، فازورها جهت توصیف رفتار آن غالباً مفید می‌باشند. به عنوان مثال هنگامی که سیستم قدرت تحت استرس‌های ناشی از نوسانات توان قرار می‌گیرد، نه تنها شکل موج‌های ولتاژ و جریان در حالت ماندگار قرار نداشته، بلکه فرکانس سیستم نیز مقدار نامی خود را ندارد. تحت چنین شرایطی، به علت اینکه تغییرات ولتاژ و جریان نسبتاً به آرامی صورت می‌گیرد، این تغییرات می‌تواند به عنوان زنجیره‌ای از شرایط حالت ماندگار در نظر گرفته شده و فازورها می‌توانند به منظور توصیف رفتار شبکه استفاده شوند. حتی در صورتی که شکل موج‌های ولتاژ (جریان) سیستم سرعت دچار تغییرات شده و دارای مؤلفه‌های قابل توجه گذرا باشند، فازورها قابل کاربرد می‌باشند [۳-۴].

شیوه سنتی نمایش و کنترل سیستم مستلزم بکارگیری سیستم SCADA می‌باشد. استفاده‌ی گسترده از SCADA در سیستم قدرت، بهره‌بردار سیستم را قادر می‌سازد که بر شرایط بهره‌برداری سیستم نظارت داشته و در صورت لزوم آن را تغییر داده تا از عملکرد عادی و ایمن آن اطمینان لازم را حاصل نماید. از طرف دیگر، عواملی همچون توسعه روزافزون تقاضای مصرف و گسترش پدیده‌ی

تجدید ساختار، موجب افزایش فشار روی خطوط انتقال شده و بنابراین سیستم‌های قدرت اغلب نزدیک به مرز ناپایداری خود کار می‌کنند. در چنین شرایطی استفاده از سیستم SCADA فعلی و زیرتوابع آن به منظور اطمینان از عملکرد پایدار و مطمئن آن کافی به نظر نمی‌رسد. به طور کلی در مورد سیستم SCADA می‌توان گفت که این سیستم از اندازه‌گیری‌هایی استفاده می‌کند که دارای چند نقطه ضعف مهم هستند. اندازه‌گیری‌های انجام شده در سیستم SCADA معمولاً همزمان نبوده و مقداری اختلاف زمانی بین آنها وجود داشته که از آن صرف‌نظر می‌گردد. از طرف دیگر نرخ نمونه‌برداری در دستگاه‌های اندازه‌گیری فوق معمولاً چندان بالا نمی‌باشد (به علت محدودیت‌های فنی دستگاهها یا عدم ظرفیت مخابراتی کافی). از این رو اطلاعات نمایش داده شده توسط سیستم SCADA، حالت پایدار سیستم قدرت را نمایش داده و در نتیجه بهره‌بردار سیستم در مرکز کنترل، دید کافی از شرایط دینامیکی موجود در سیستم نخواهد داشت [۳-۴].

در کنار سیستم SCADA، بتازگی سیستم دیگری به نام نمایش، حفاظت و کنترل گسترده سیستم (WAMPC) مطرح شده است که هدف آن جبران کاستی‌های موجود در سیستم SCADA بوده و مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۷]. سیستم نمایش و کنترل گسترده سیستم با انجام دادن پیش‌بینی مطمئن امنیت سیستم و اعمال هماهنگ شده بهینه، قادر به کاهش اثر اغتشاشات بزرگ سیستم و یا حذف آنها می‌باشد. با توجه به اینکه PMU جزئی از WAMPC می‌باشد، در ابتدا توضیح مختصری در ارتباط با ساختار این سیستم داده و در ادامه کاربردهای آن بررسی می‌گردد [۱-۵].

۲-۸- کاربردهای WAMPC

از دیدگاه محل کاربرد، کاربردهای WAMPC می‌تواند به دو دسته کلی تقسیم‌بندی گردد:

- کاربردهای محلی
- کاربردهای قابل بکارگیری در کل سیستم یا مراکز بهره‌برداری محلی

البته مطلوب آن است که اعمال محلی انجام شده به صورت هوشمندانه انجام شده تا با سایر اعمال اصلاحی موجود در سیستم هماهنگ باشند، به طوری که اعمال بهینه به منظور حفظ امنیت سیستم و در عین حال تأمین بار صورت گیرد.

۲-۷-۱- کاربردهای محلی

از دیرباز تاکنون کاربردهای کنترلی و نظارتی زیادی به صورت محلی در پست‌ها و به منظور حفظ شرایط بهره‌برداری صورت گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به تنظیم ولتاژ، جبران راکتیو، حذف بار ولتاژی و فرکانسی اشاره کرد. به منظور دستیابی به اهداف مذکور، مقادیر مربوطه در پست اندازه‌گیری شده و در صورت وجود مقادیر خارج از محدوده مجاز، اعمال اصلاحی خودکار صورت می‌گیرد. به منظور انجام کنترل‌های محلی در پست‌ها و با در نظر گرفتن شرایط کلی سیستم، به این گونه الگوریتم‌ها و سایر الگوریتم‌های کاربردی جدیدی بهبود یافته نیاز می‌باشد. همچنین بسته به شرایط سیستم، ممکن است توابع کنترلی پست‌ها توسط مرکز کنترل فعالی یا غیرفعال گردد. به کمک PMU و فازورهای اندازه‌گیری شده توسط آن، امکان هماهنگی مؤثر بین اعمال محلی با شرایط کلی سیستم به منظور اداره کردن بهتر اغتشاش‌های گسترده سیستم وجود دارد. تعدادی از توابع نظارتی که می‌توانند در پست‌ها و با استفاده از اطلاعات PMU به کار برده شوند، عبارتند از [۱-۵]:

- افت فرکانس
- افزایش فرکانس
- نرخ تغییرات مثبت فرکانس
- نرخ تغییرات منفی فرکانس
- افت ولتاژ
- اضافه ولتاژ
- اضافه جریان

۲-۷-۲- کاربردهای سراسری سیستم

کاربردهای سیستمی، کاربردهایی هستند که در آنها با استفاده از اطلاعات کامل سیستم در یک کامپیوتر مرکزی، تصمیماتی صورت می‌گیرد. کاربردهای موجود می‌تواند تنها شامل یک محل خاص در سیستم شده یا اینکه مربوط به کل سیستم شود. در ادامه تعدادی از این کاربردها که اساس آنها استفاده از اطلاعات فازوری است، بررسی می‌شوند [۱-۵].

الف- تحلیل پایداری گذرا

در حال حاضر آنالیز پایداری سیستم‌های قدرت بصورت نا به هنگام صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری فازورهای سنکرون شده می‌تواند آنالیز پایداری و پیش‌بینی پایداری را بصورت زمان واقعی میسر سازد. معمول‌ترین و قدیمی‌ترین ابزار برای تحلیل پایداری گذرا شبیه‌سازی زمانی دینامیک سیستم می‌باشد. در این روش سیستم قدرت به صورت یک گروه از معادلات جبری-دیفرانسیلی غیرخطی مدل می‌شود و این معادلات به کمک روش‌های عددی حل می‌شوند. این روش بسیار معمول بوده و نتایج دقیقی را می‌دهد. ایراد این روش این است که به حجم زیادی از محاسبات نیازمند است. این عیب در حالت نابه‌هنگام^{۳۴} مشکلی ایجاد نمی‌کند و همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد اما در کاربردهای به‌هنگام^{۳۵} بسیار زمان‌بر می‌باشد. با استفاده از داده‌های PMU روش‌هایی برای پیش‌بینی ناپایداری گذرا ارائه شده است که نیازی به دانستن آرایش شبکه ندارند و حجم محاسبات آنها خیلی کم است.

ب- پایش زمان واقعی پایداری حالت ماندگار

در تحلیل‌های اولیه پایداری از مدل ساده شده سیستم (اغلب دو ماشینه) و با معیار پایداری

حالت ماندگار $\frac{dp}{d\delta} > 0$ استفاده می‌شد.

³⁴ offline

³⁵ Online

به دلیل اینکه این روش بر پایه پایش زمان واقعی استوار است، بنابر این هم مدل و هم روش محاسبه با ید تا جای ممکن ساده باشند و خطا نیز در حد معینی باقی بماند. در این روش فرض می‌شود که فقط زاویه روتور ژنراتور مورد نظر افزایش می‌یابد و زاویه بقیه ژنراتورها بدون تغییر باقی می‌مانند. بنابر این منحنی عملکرد زاویه روتور ژنراتور انتخاب شده، قابل محاسبه است و محدودیت ظرفیت ژنراتور انتخاب شده به دست می‌آید

ارزیابی میزان نزدیکی سیستم به شرایط ناپایداری ولتاژ می‌تواند به کمک منحنی‌های PV در مرکز کنترل صورت گیرد. به طور کلی در سیستم SCADA/EMS، به منظور حفظ پایداری ولتاژ سیستم از دو روش مکمل محلی و سیستمی استفاده می‌شود. حفاظت محلی در قبال ناپایداری ولتاژ به کمک رله‌ای حفاظت ولتاژ صورت می‌گیرد. این رله‌ها معمولاً در شین‌های ولتاژ بالا نصب شده و در صورت افت ولتاژ شدید، بر اساس تنظیمات انجام شده، مقداری از بار شین را قطع می‌کنند. مهمترین ضعف این روش عدم انجام اعمال حفاظتی بر اساس شرایط کلی سیستم می‌باشد. بنابراین اعمال انجام شده توسط این رله‌ها ممکن است با یکدیگر هم‌انگ نبوده و در اصطلاح شرایط بهینه به دست نیاید. از طرف دیگر طرح‌های حفاظتی موجود در مرکز کنترل سیستم SCADA/EMS نیز بر اساس نمایش سیستم در حالت ماندگار بوده، به علت عدم انجام سریع تخمین حالت و همچنین تعیین حدود پایداری نیز بر اساس مطالعات قبلی و نه بر اساس شرایط فعلی سیستم، صورت می‌گیرد. بنابراین در چنین شرایطی سیستم ممکن است نسبت به وقوع برخی پیشامدها در بدترین حالت، وقوع پیشامدهای پی‌درپی، آسیب‌پذیر بوده و فروپاشی ولتاژ به وجود آید [۱-۵].

در سیستم WAMPC با توجه به وجود شرایط زیر، کاستی‌های فوق می‌تواند برطرف شود:

- اندازه‌گیری‌های دینامیک و نمایش لحظه‌ای وقایع
- انجام اعمال با در نظر گرفتن شرایط کل سیستم
- انجام اعمال حفاظتی هماهنگ شده و بهینه

- کنترل آثار پیشامدهای متوالی

در سیستم WAMPC امکان نمایش لحظه‌ای نقطه کار سیستم روی منحنی PV وجود داشته و بهره‌بردار قادر به تعیین حاشیه بارگذاری سیستم تا مرز ناپایداری ولتاژ می‌باشد. بهره‌بردار می‌تواند اعمال بهینه حفاظتی را به منظور جبران توان راکتیو و حفظ پایداری ولتاژ و با کمک تغییر برنامه توید واحدها، جبران راکتیو یا حذف بار انجام دهد [۱-۵].

پ- محاسبه پارامترهای خط

پارامترهای امپدانس خطوط انتقال می‌تواند به کمک فازورهای ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده توسط PMUهای نصب شده در دو طرف خط، محاسبه گردد. اندازه‌گیری صحیح ولتاژهای V_S و V_R و جریان‌های I_S و I_R ، محاسبه پارامترهای خط، R ، X_L و X_C را امکانپذیر می‌سازد. اندازه‌گیری‌ها باید با توجه به شرایط مختلف بارگذاری و دمای محیط صورت گیرند تا تغییرات امپدانس، بویژه مقاومت نسبت به دما در نظر گرفته شود.

ت- پایش حرارتی خطوط انتقال

بارگذاری خطوط انتقال بویژه خطوط انتقال و متوسط، اغلب بدلیل ظرفیت حرارتی، محدود می‌شود تا محدودیت‌های پایداری ولتاژ. به طور سنتی حد حرارتی یک خط بر اساس معیارهای ثابت و محافظه‌کارانه، یعنی در نظر گرفتن مقاومت ثابت به ازای حداکثر ممکن دمای هوا در منطقه و عدم وزش باد، تعیین می‌شد. روشن است که با توجه به چنین فرضی حداکثر استفاده از ظرفیت ممکن خط صورت نخواهد گرفت چرا که شرایط محیطی اغلب بدتر بوده و امکان خنک‌سازی خط توسط باد، اجازه استفاده بیشتر از ظرفیت خط را می‌دهد. در مقابل محاسبه مقاومت خط بر اساس اندازه‌گیری‌های فازوری، رویکردی اقتصادی به منظور نمایش حرارتی خط و استفاده حداکثر از ظرفیت خط فراهم می‌کند. به طور کلی دمای متوسط خط می‌تواند به صورت تابعی از مقاومت خط (R) تعریف شود که مقدار R به طور پیوسته توسط اندازه‌گیری‌های فازوری دو سر خط محاسبه می‌گردد. با

استفاده از حقیقت مذکور، دمای متوسط هادی قابل محاسبه بوده و در نتیجه ارزیابی لحظه‌ای حد حرارتی و بارگذاری خط انتقال صورت پذیرد. نمایش حرارتی خط انتقال، مزایای زیر را برای بهره‌بردار شبکه بدنبال دارد [۱-۵]:

- هشدار سریع و بموقع در حالت اضافه بار شدن خطوط
- کنترل دینامیک ظرفیت خط انتقال
- تخمین غیرمستقیم خمیدگی خطوط

ث- تخمین حالت

تخمین حالت مهمترین قسمت در پایش شبکه قدرت است که طی آن حالت سیستم تعیین شده و بهره‌بردار به کمک آن قادر به تصمیم‌گیری مناسب در مورد اعمال احتمالی لازم جهت حفظ عملکرد سیستم در حالت عادی و مطمئن می‌باشد. بهبود در دقت تخمین حالت یکی از مزایای مهم PMU می‌باشد.

در سیستم SCADA تخمین حالت به کمک اندازه‌گیری‌های جمع‌آوری شده در یک پریود زمانی (چند ثانیه) و در EMS صورت می‌گیرد. معمولاً اطلاعات اندازه‌گیری شده شامل اندازه ولتاژ برخی از شین‌ها، فلوی بعضی از خطوط انتقال و توان تزریقی تعدادی از شین‌های سیستم می‌باشد. این اطلاعات به کمک مدل امپدانسی سیستم جهت تعیین حالت سیستم (فازور ولتاژ شین‌ها) استفاده می‌گردد. اطلاعات مورد استفاده در تخمین حالت با توجه به دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری دارای مقداری واریانس می‌باشند. بنابراین، روش‌های ریاضی با استفاده از فاکتورهای وزن‌دهی دقت هر اندازه‌گیری را در این فرآیند لحاظ می‌کنند. یکی از این روش‌ها حداقل مربعات وزن‌دار^{۳۶} بوده که یک روش غیرخطی و همراه با محاسبات بازگشتی ماتریس بوده و همگرایی آن تضمین شده نمی‌باشد. مدت زمان اجرای برنامه برای سیستم‌های بزرگ ممکن است به چندین دقیقه رسیده و وقوع واگرایی

³⁶ Weighted Least Squares

در هنگام اغتشاشات سیستم، زمانی که یک تخمین حالت خوب بسیار نیاز می‌باشد، امری اجتناب‌ناپذیر است [۵-۱].

واحدهای اندازه‌گیری فازور قادر به اندازه‌گیری فازورهای ولتاژ و جریان با دقت بالایی بوده و در صورتی که تعداد کافی از PMU ها در شین‌های سیستم نصب شده باشد، تخمین حالت می‌تواند تنها با استفاده از اطلاعات PMU ها صورت گرفته و بنابراین از دقت بسیار بالایی برخوردار خواهد بود. لازم به ذکر است با توجه به اندازه‌گیری فازور ولتاژ شین و فازور جریان خطوط در شینی که PMU در آن نصب شده، فرآیند تخمین حالت عملاً به صورت خطی انجام شده و تنها در یک تکرار قابل انجام خواهد بود. در نتیجه فرآیند تخمین حالت در سیستم WAMPAC نسبت به سیستم SCADA از سرعت بمراتب بالاتری برخوردار خواهد بود.

ج- تشخیص خطا و پیدا کردن محل خطا

با استفاده از اندازه‌گیری‌های سنکرون PMU دقت تشخیص و تعیین محل خطا در خطوط انتقال افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. برای این منظور الگوریتم‌ها و روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری‌های فازوری جهت تشخیص و مکان‌یابی خطا ارائه شده است [۵-۱].

چ- تصحیح و معتبرسازی مدل سیستم

هم اکنون برای تحقیق و مطالعه در سیستم‌های قدرت از مدل‌های کامپیوتری در سطح وسیعی استفاده می‌شود. می‌توان با ثبت رفتار سیستم توسط PMU ها در مقابل رخداد‌های مختلف که در اثر اغتشاش در سیستم بوجود می‌آید و مقایسه آن با رفتار شبیه‌سازی شده به بهبود مدل سیستم پرداخته و مدل آن را به مدل واقعی نزدیکتر کرد [۵-۱].

ح- حفاظت گسترده شبکه

حفاظت سیستم در سطح وسیع برای حفاظت سیستم در مقابل خاموشی عمومی و یا اتفاقات مشابه صورت می‌گیرد. برنامه‌های حفاظت گسترده برای تشخیص حالات غیرعادی در سیستم به کار می‌روند، آنها موقعیت‌های اضطراری را تشخیص داده و برای اعمال اصلاحی غیرمنتظره نظیر قطع ژنراتور، قطع بار، جزیره کردن سیستم و . . . جهت جلوگیری از وقایع ناگوار در حالات غیر عادی سیستم، به کار گرفته می‌شوند [۵-۱].

خ- کاربردهای دیگر

کاربردهای PMU در سیستم‌های قدرت گسترده وسیعی را شامل شده و روز به روز بر تعداد و تنوع آن افزوده می‌شود. کاربردهایی که در سیستم برزیل و غرب آمریکا برای PMU ذکر شده است به صورت زیر می‌باشند [۵-۱]:

- تشخیص زودهنگام مشکلات شبکه
- تعیین به هنگام ظرفیت انتقال
- بررسی ویژه عملکرد دینامیک سیستم
- هماهنگی سیستم‌های کنترل اصلی
- کالیبره کردن تجهیزات اندازه‌گیری
- بهبود برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و فرآیند کنترل جهت استفاده بهینه از ظرفیت انتقال
- هشدارهای اپراتور برای شرایط بهره‌برداری پرتنش
- نظارت بر کنترل پایداری سریع

- کنترل به هنگام پخش بار (برای مثال با استفاده از جابجاکننده فاز، خازنهای کنترل شده با تریستور^{۳۷} TCSC)
- سیستم کنترل پایداری ناحیه گسترده (WACS)

۲-۹- مدل فازوری

یک شکل موج سینوسی می‌تواند می‌تواند توسط معادله (۲-۵) بیان شود [۷].

$$x(t) = X_m \cos(\omega_t + \theta) \quad (۲-۵)$$

که در آن:

X_m = دامنه شکل موج سینوسی

$\omega_t = 2\pi \times f$ که f بیانگر فرکانس لحظه‌ای می‌باشد

θ = فاز اولیه شکل موج

می‌باشد. توجه شود که مدل فازوری برای تابع کسینوسی بیان می‌شود و این مدل به صورت (۲-۶) بیان می‌شود:

$$\bar{X} = X_m \angle \theta \quad (۲-۶)$$

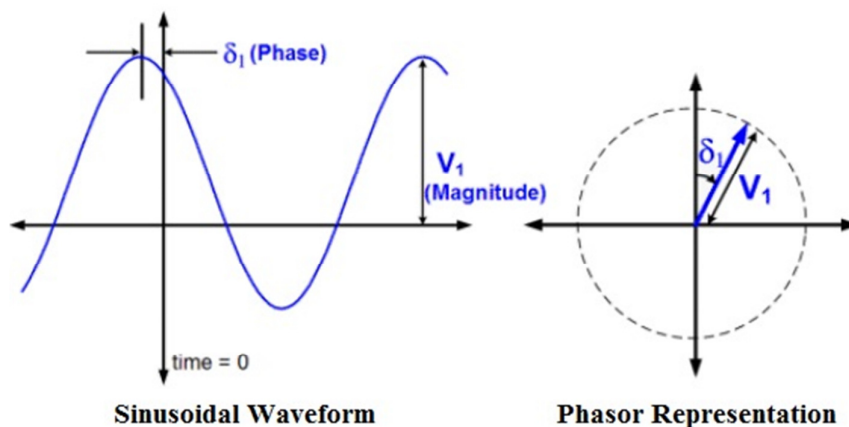
که در بیشتر موارد مدل فازوری با مقدار موثر دامنه شکل موج به فرم (۲-۷) بیان می‌شود.

$$\bar{X} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \angle \theta \quad (۲-۷)$$

شکل ۲-۶ نشان دهنده یک شکل موج سینوسی و مدل فازوری آن می‌باشد که نسبت به مرجع

زمانی $t=0$ بیان شده است [۷].

³⁷. Thyristor Controlled Series Capacitor



شکل ۲-۶- شکل موج سینوسی و نمایش مدل فازوری آن [۷]

مبدا زمان این شکل موج اختیاری است ولی عموماً به نحوی انتخاب می‌شود که برای شرایط و موج‌های مختلف مناسب باشد، اما فرکانس مرجع و مقیاس زمانی برای اندازه‌گیری ثابت در نظر گرفته می‌شود.

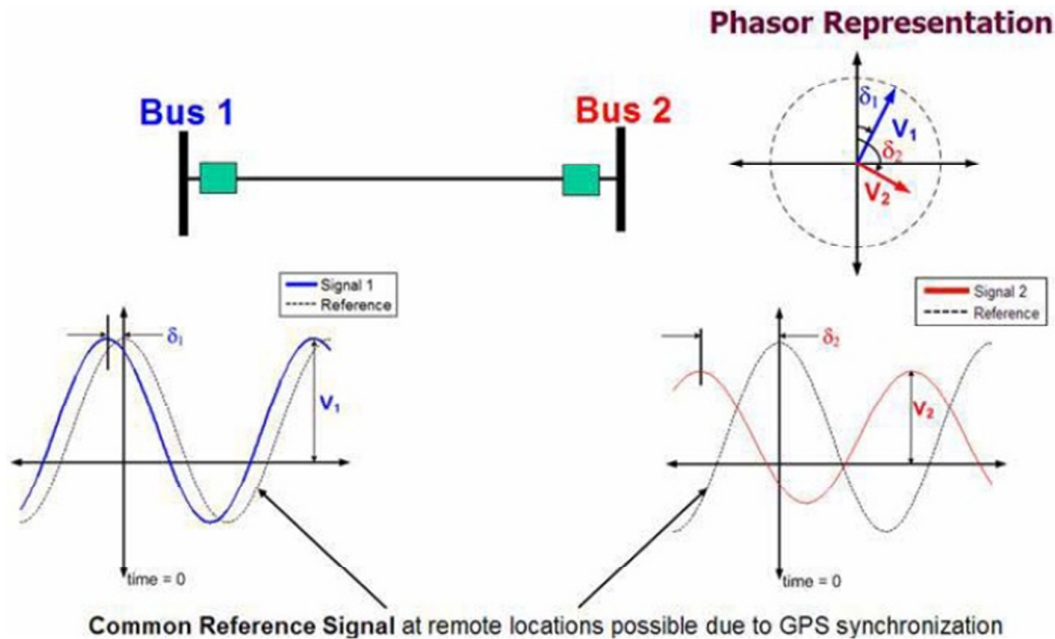
فازورهای هماهنگ^{۳۸} مجموعه‌ای از فازورها هستند که بیانگر شکل موج سینوسی سیستم قدرت در نقاط مختلف شبکه و بر مبنای فرکانس نامی سیستم و زمان هماهنگ جهانی UTC^{۳۹} محاسبه می‌شوند. زاویه فاز یک فازور هماهنگ با توجه به شکل موج، فرکانس سیستم و زمان اندازه‌گیری به طور منحصر به فرد بدست می‌آید. در نتیجه توسط مرجع زمان دقیق سیستم موقعیت‌یاب جهانی، زاویه فاز سیستم قدرت در هر نقطه را می‌توان با دقت بالایی محاسبه نمود.

شکل ۲-۷ بیانگر فاز ولتاژ در دو باس مختلف یک شبکه را نشان می‌دهد که فاز هر باس در

یک زمان یکسان و نسبت به یک فرکانس مرجع اندازه‌گیری شده است [۷].

³⁸ Synchrophasor

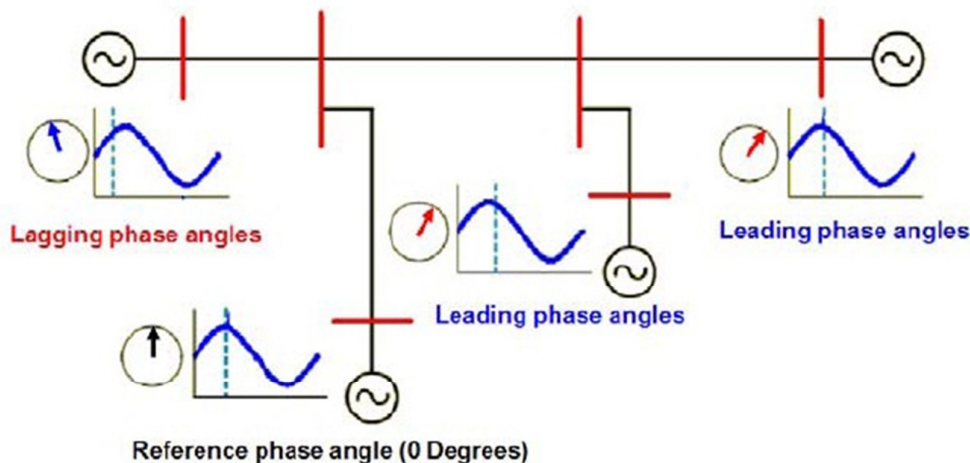
³⁹ Coordinated Universal Time Clock



شکل ۷-۲- فازورهای هماهنگ اندازه‌گیری شده در دو نقطه مختلف از یک شبکه و با مرجع زمانی یکسان [۷]

همانطور که در شکل ۷-۲ مشاهده می‌شود، اختلاف زاویه فاز بین دو نقطه از شبکه مستقل از مرجع می‌باشد. معمولاً یکی از نقاط اندازه‌گیری در شبکه به عنوان مرجع انتخاب شده و اختلاف زاویه سایر نقاط اندازه‌گیری در شبکه با این نقطه محاسبه شده و به عنوان زاویه فاز آن نقطه در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۸-۲ فازورهای همزمان در ۴ نقطه از شبکه نشان داده شده است و زاویه فاز باس ۳ نیز به عنوان زاویه مرجع در نظر گرفته شده است. شین سمت راست شین شماره ۱ و شین سمت چپ، شین شماره ۴ می‌باشد.



شکل ۲-۸- اختلاف فاز فازورهای هماهنگ در شین‌های مختلف شبکه با در نظر گرفتن یک شین به عنوان مرجع [۷]

۲-۱۰- روییت پذیری کامل شبکه

قبل از شروع به کار عملگر تخمین حالت، ابتدا باید بررسی شود که آیا با مقادیر اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف شبکه و همچنین ساختار شبکه، می‌توان تخمین حالت را انجام داد یا خیر. این کار توسط تحلیل گر روییت‌پذیری انجام شده و در صورت روییت‌پذیر نبودن، باید اعمال اصلاحی بر روی تعداد و مکان نقاط اندازه‌گیری انجام شود. در نتیجه آنالیز روییت‌پذیری اساسی‌ترین بخش در تخمین حالت در شبکه می‌باشد. به طور کلی روییت‌پذیری شبکه به معنی قابلیت محاسبه متغیرهای شبکه است. این متغیرها معمولاً فازور ولتاژ و باس‌های شبکه تعریف می‌شوند. از این لحاظ دو گونه روییت‌پذیری قابل تعریف است [۱۰].

- روییت‌پذیری عددی
- روییت‌پذیری ساختاری

۲-۹-۱- روییت‌پذیری عددی

با توجه به مجهول بودن n فازور ولتاژ (که n نشان دهنده تعداد شین‌های سیستم است)، برای محاسبه این مجهول‌ها به n معادله نیاز است که لازمه آن معلوم بودن n متغیر فازوری مستقل شبکه

است. در صورتی که ماتریس ژاکوبین یا مربوط به ضرایب اندازه‌گیری شده (ماتریس بهره اطلاعات^{۴۰}) دارای مرتبه کامل باشند، این سیستم مشاهده‌پذیر خواهد بود و تخمین حالت سیستم دارای جواب یکتایی می‌باشد [۱۰]. اگر تنها از اطلاعات واحدهای اندازه‌گیری فازور برای تخمین حالت استفاده گردد، ماتریس ژاکوبین فقط تابعی از پارامترهای شبکه شده و رابطه بین اندازه‌گیری‌ها و متغیرهای سیستم، خطی می‌گردد که اگر از روش حداقل مربعات وزن‌دار استفاده شود، متغیرهای حالت بر اساس معادلاتی که جلوتر گفته خواهد شد، به راحتی قابل محاسبه می‌باشند. لیکن به دلایلی مانند امنیت و خطای داده‌ها معمولاً بیش از این تعداد متغیر شبکه باید رویت گردد، در نتیجه این روش برای شبکه‌های بزرگ به دلیل درگیر شدن با ماتریس‌های بسیار بزرگ و روش‌های حل پیچیده مناسب نمی‌باشد [۱۱].

قبل از آنکه عملگر تخمین حالت سیستم کار خود را شروع کند ابتدا باید بررسی شود که آیا با مقادیر اندازه‌گیری‌های مختلف که در جاهای مختلف سیستم قرار دارند و وضعیت توپولوژیکی شبکه می‌توان تخمین حالت را انجام داد یا خیر؟ این کار توسط تحلیل‌گر مشاهده‌پذیری سیستم صورت گرفته و در صورت مشاهده‌پذیر نبودن سیستم اعمال اصلاحی مثل اضافه کردن اندازه‌گیری‌های کمکی صورت می‌گیرد. اگر از داده‌های PMU استفاده گردد رابطه بین اندازه‌گیری‌ها و متغیرهای حالت سیستم را بصورت (۸-۲) می‌توان نوشت:

$$z^{\text{meas}} = Hx + e \quad (8-2)$$

که در آن بردار اندازه‌گیری‌ها بوده و شامل قسمت‌های حقیقی و موهومی فازورهای ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده توسط PMU می‌باشد، x بردار حالت سیستم می‌باشد که شامل قسمت‌های حقیقی و موهومی فازور ولتاژ شین‌های شبکه می‌باشد، H ماتریس ثابت ژاکوبین اندازه‌گیری‌ها بوده که تنها تابعی از پارامترهای شبکه می‌باشد و e بردار خطای اندازه‌گیری‌ها می‌باشد [۱۱].

⁴⁰ Gain Matrix of Information

لازم به توضیح است که اگر از اندازه‌گیری‌های اسکالر برای تخمین حالت استفاده شود ماتریس

H علاوه بر پارامترهای شبکه تابعی از خود اندازه‌گیریها (x) هم می‌گردد.

با توجه به تعریف فوق اگر از روش کمترین مربعات وزن‌دار شده استفاده گردد متغیرهای حالت

سیستم طبق روابط (۹-۲) تا (۱۴-۲) و در نهایت از رابطه (۱۵-۲) قابل محاسبه خواهد بود. در این

رابطه R ماتریس قطری کوواریانس خطاهای واحدهای اندازه‌گیری می‌باشد. فرم کلی روش استفاده از

کمترین مربعات وزن‌دار به صورت (۹-۲) می‌باشد [۱۲].

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{[z_i^{meas} - f_i(x)]^2}{\sigma_i^2} \quad (9-2)$$

که در آن:

f_i : تابعی است که جهت محاسبه مقدار اندازه‌گیری شده از اندازه‌گیری شماره i استفاده می‌شود.

σ_i^2 : واریانس اندازه‌گیری i .

$J(x)$: تابع هدف.

تعمیم این رابطه به فرم ماتریسی بر اساس رابطه (۷-۳) می‌باشد.

$$\min \bar{J}(x) = [\bar{Z}^{meas} - f(x)]^T [\bar{R}^{-1}] [\bar{Z}^{meas} - f(x)] \quad (10-2)$$

$$f(x) = [H]x \quad (11-2)$$

$$\min \bar{J}(x) = \{Z^{meas^T} [R^{-1}] Z^{meas} - x^T [H]^T [R^{-1}] Z^{meas} - Z^{meas} [R^{-1}] [H]x + x^T [H]^T [R^{-1}] [H]x\} \quad (12-2)$$

$$\nabla \bar{J}(x) = -2[\bar{H}]^t [\bar{R}^{-1}] \bar{Z}^{meas} + 2[\bar{H}]^T [\bar{R}^{-1}] [\bar{H}]_x \quad (13-2)$$

$$\nabla \bar{J}(x) = 0 \quad (14-2)$$

و در نتیجه خواهیم داشت:

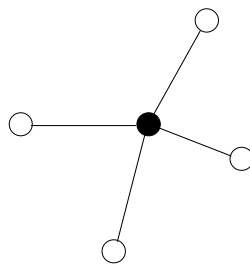
$$\hat{x} = [H^T * R^{-1} * H]^{-1} * H^T * R^{-1} * z \quad (15-2)$$

حال اگر رتبه^{۴۱} ماتریس بهره $H^T * R^{-1} * H$ برابر بعد بردار حالت سیستم باشد در این صورت جواب یکتایی برای حالت‌های سیستم وجود دارد و سیستم مشاهده‌پذیر است. ولی اگر بعد آن کمتر از تعداد متغیرهای حالت باشد در آن صورت شبکه مشاهده‌پذیر نخواهد بود [۱۱].

۲-۹-۲- رویت پذیری ساختاری

در روش تحلیل مشاهده‌پذیری عددی ماتریس ژاکوبین یا بهره سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به دلیل مشکلاتی که این روش در سیستم‌های بزرگ به دلیل پراکندگی زیاد ماتریس‌ها دارد، روش تحلیل توپولوژیکی برای این‌گونه سیستم‌ها پیشنهاد شده است که در آن از مدل تجزیه شده اندازه‌گیری‌ها و تئوری گراف استفاده می‌گردد. در این روش تنها اطلاعات مربوط به نحوه اتصالات شبکه، نحوه اندازه‌گیری و مکان‌های آنها کافی است. ارزیابی مشاهده‌پذیری فقط با استفاده از داده‌های PMU به کمک قوانین زیر صورت می‌گیرد [۱۰-۱۱، ۱۳].

۱- به هر شینی که PMU نصب شده یک اندازه‌گیری فازور ولتاژ و به هریک از شاخه‌های متصل به آن یک اندازه‌گیری جریان اختصاص داده می‌شود [۱۱]. (شکل ۲-۹)

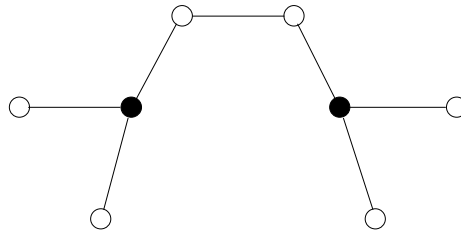


شکل ۲-۹- قانون اول جایابی PMU

۲- به هر یک از شین‌هایی که بصورت مستقیم به شین دارای PMU متصل هستند یک اندازه‌گیری ولتاژ مجازی اختصاص داده می‌شود.

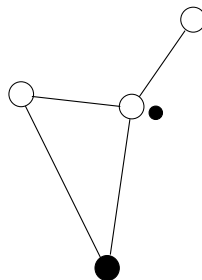
⁴¹ Rank

۳- به هر شاخه‌ای که بین دو شین با ولتاژهای معلوم (اندازه‌گیری مستقیم یا مجازی) یک اندازه‌گیری جریان مجازی اختصاص داده می‌شود (شکل ۲-۱۰). با این کار اتصال ناحیه‌های مشاهده‌پذیر به هم میسر می‌گردد.



شکل ۲-۱۰- قانون سوم جایابی PMU

۴- به هر شاخه‌ای که جریان آن با استفاده از قانون کیرشهف قابل محاسبه است یک اندازه‌گیری جریان مجازی اختصاص داده می‌شود. شکل ۲-۱۱ چنین حالتی را نشان می‌دهد. در این شکل دایره توپر نشان دهنده‌ی شین دارای PMU می‌باشد. این قانون برای شین‌های تزریق صفر قابل اعمال است (اگر در یک شین با تزریق صفر جریان همه شاخه‌ها به غیر از یکی معلوم باشد جریان شاخه آخر قابل محاسبه است).



شکل ۲-۱۱- قانون چهارم جایابی PMU

این روش را می‌توان به صورت دستورهای زیر ارائه کرد [۱۰].

۱. شین‌های دارای اندازه‌گیری ولتاژ رویت‌پذیر اصلی محسوب می‌شوند.
۲. هر خط دارای اندازه‌گیری جریان و یا بین دو شین رویت‌پذیر، رویت‌پذیر محسوب می‌شود.

۳. هر شین متصل به حداقل یک شین رویت‌پذیر اصلی توسط یک خط رویت‌پذیر نیز رویت‌پذیر محسوب می‌شود.

۴. در صورتی که تنها یکی از خط‌های متصل به شینی با جریان تزریقی صفر رویت‌پذیر نباشد، به دلیل قانون KCL آن خط نیز رویت‌پذیر در نظر گرفته می‌شود.

با استفاده از قوانین بالا برای هر شبکه، برداری تشکیل می‌شود که هر عنصر آن نشان‌دهنده رویت‌پذیر بودن یا نبودن شین مربوط به آن است، که به آن بردار رویت‌پذیری شین‌های شبکه گفته می‌شود. در مراحل بعد درصد شین‌های رویت‌ناپذیر برای محاسبه تابع هزینه بهینه‌سازی استفاده خواهد شد.

۲-۱۱- فرمول بندی مسأله جایی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور

همانطور که گفته شد هدف از این پروژه جاییی دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور در شبکه می‌باشد به طوری که شبکه رویت‌پذیر باشد. برای پیدا کردن مکان واحدهای اندازه‌گیری فازور، اطلاع از ساختار شبکه (نحوه اتصال شین‌ها و خطوط انتقال) کافی است. وضعیت اتصال شین‌های مختلف سیستم را توسط ماتریس تلاقی^{۴۲} شبکه نمایش می‌دهند. این ماتریس بیانگر آن است که کدام شین‌ها با یک خط انتقال به هم متصل هستند. به عبارتی اگر A ماتریس تلاقی باشد و تعداد شین‌های شبکه n باشد، آنگاه A یک ماتریس $n \times n$ بوده و درایه‌های آن به صورت (۲-۱۶) تعریف می‌شوند [۱۵]:

$$A(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } i = j \\ 1, & \text{if bus } i \text{ and } j \text{ are the same} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۲-۱۶)$$

⁴² Incident Matrix

طبیعت گسسته مسأله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور ایجاب می‌کند که یک بردار X را که عناصر آن وضعیت نصب و یا عدم نصب واحد اندازه‌گیری فازور در هر شین را نشان می‌دهد، به صورت (۱۷-۲) تعریف کرد:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{if a PMU is placed at bus } i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17-2)$$

حال اگر هدف از حل مسأله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور، یافتن حداقل تعداد شین‌های باشد که با نصب این واحدها بر روی آنها، تمامی شین‌های شبکه رویت‌پذیر گردند، تابع هدف به صورت (۱۸-۲) خواهد بود [۱۴-۱۷]:

$$\min \sum_{i=1}^n x_i \quad (18-2)$$

اما چنانچه هدف، کمینه‌سازی هزینه تمام شده نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در سیستم باشد، تابع هدف مسأله به صورت (۱۹-۲) در نظر گرفته خواهد شد [۱۸-۲۱]:

$$\min \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad (19-2)$$

که در تابع هدف فوق، c_i هزینه نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شین i می‌باشد.

تعریف مناسب قیودی که رویت‌پذیری کامل شبکه را تضمین نماید، اصلی‌ترین مرحله در مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور می‌باشد. این قیدها، متناسب با شرایط در نظر گرفته شده برای سیستم می‌باشد. در ادامه نحوه تعیین قیود این مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد که شامل سه حالت زیر می‌باشد [۱۴-۲۱]:

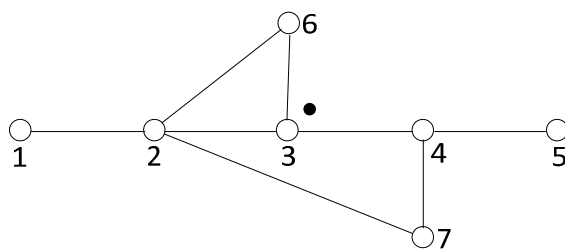
(۱) حالتی که در شبکه تنها واحدهای اندازه‌گیری فازور باشند و هیچ وسیله اندازه‌گیری دیگری و با شین تزریق صفر در شبکه وجود نداشته باشد.

۲) حالتی که علاوه بر وجود واحدهای اندازه‌گیری فازور، توان‌های تزریقی بعضی از شین‌ها نیز توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری که قبلاً نصب شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شوند و یا تولید و مصرفی بر روی آن شین وجود ندارد که به این شین‌ها، شین تزریق صفر می‌گویند.

۳) حالتی که علاوه بر واحدهای اندازه‌گیری فازور و شین‌های تزریق صفر، توان‌های جاری بعضی از خطوط نیز توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری که از قبل نصب شده‌اند، معلوم باشد.

برای فرموله کردن حالت‌های فوق، در مقالات و گزارشات مختلف، راه‌حل‌های متعددی ارائه شده است. در این پروژه برای اینکه بتوان از مزیت توانایی تحلیل دینامیک توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور استفاده نمود، از وجود دستگاه‌های اندازه‌گیری معمولی در شبکه صرف‌نظر کرده و نتایج را تنها با در نظر گرفتن واحدهای اندازه‌گیری فازور بدست می‌آوریم. البته لازم به ذکر است که در تعدادی از شین‌های موجود در شبکه، نه دارای تولید و نه دارای بار بر روی آنها می‌باشند. در نتیجه قانون KCL بر روی خطوط انتقال متصل به آن صدق کرده و می‌توان آنها را به عنوان شین تزریق صفر در نظر گرفت. در نتیجه تمامی محاسبات بر اساس حالت دوم انجام شده است.

در ادامه برای توضیح بیشتر روش حل در این پروژه، حالت‌های ۱ و ۲ بر روی یک شبکه ساده ۷ شینه شبیه‌سازی شده است که در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. در این شکل دایره‌های توخالی شین‌های شبکه بوده و شین تزریق صفر با دایره سیاه رنگ در کنار آن از سایر شین‌ها تمایز یافته است.



شکل ۲-۱۲- سیستم تست ۷ باسه

حالت ۱: تحلیل تنها با در نظر گرفتن واحدهای اندازه‌گیری فازور و بدون در نظر گرفتن

شین‌های تزریق صفر [۱۸-۲۱]

ماتریسی تلاقی این سیستم نمونه به صورت (۲۰-۲) می‌باشد:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20-2)$$

از آنجا که فرض شده است یک واحد اندازه‌گیری فازور نصب شده در یک شین، دارای تعداد کانال‌های ورودی کافی برای اندازه‌گیری‌های فازور ولتاژ همان شین و فازور جریان کلیه خطوط متصل به آن شین باشد، لذا فازور ولتاژ کلیه شین‌های متصل به شین مذکور قابل محاسبه خواهند بود. بنابراین در چنین حالتی، شینی رویت‌پذیر می‌شود که حداقل یک واحد اندازه‌گیری فازور بر روی آن و یا یکی از شین‌های متصل به آن نصب شده باشد. بدین ترتیب می‌توان قید رویت‌پذیری شین \bar{A}_m را به صورت زیر تعریف نمود:

$$f_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21-2)$$

به عنوان مثال قیود لازم برای رویت‌پذیری کامل شبکه ۷ شینه نمونه، به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 \geq 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 \geq 1 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_4 + x_6 \geq 1 \\ f_4 = x_3 + x_4 + x_5 + x_7 \geq 1 \\ f_5 = x_4 + x_5 \geq 1 \\ f_6 = x_2 + x_3 + x_6 \geq 1 \\ f_7 = x_2 + x_4 + x_7 \geq 1 \end{cases} \quad (22-2)$$

در این نامعادلات، علامت "+" به عنوان عملگر "یا"^{۴۳} منطقی به کار رفته است. استفاده از عدد ۱ نیز در طرف راست نامعادلات فوق، تضمین می‌کند که حداقل یکی از متغیرهای طرف چپ هر نامعادله مخالف صفر خواهد بود. به عنوان مثال، قیود مربوط به شین‌های ۱ و ۲ را در نظر بگیرید. قید $f_1 \geq 1$ بدین معنی است که به منظور رویت‌پذیری شین ۱ باید حداقل یک واحد اندازه‌گیری فازور روی یکی از دو شین ۱ و ۲ قرار گیرد. به همین ترتیب، قید $f_2 \geq 1$ بیان می‌کند که برای رویت‌پذیری شین ۲ بایستی حداقل یک واحد اندازه‌گیری فازور روی یکی از شین‌های ۱، ۲، ۳، ۴ یا ۷ نصب شود.

برای حل این معادلات و قیود، روش‌های حل مختلفی ارائه شده است که در فصل‌های بعد به توضیح بیشتر درباره آنها خواهیم پرداخت. در نهایت با حل این معادلات و با هدف کمینه کردن تعداد واحدهای اندازه‌گیری فازور، شین‌های ۲ و ۴ محل‌های مناسبی برای نصب این تجهیزات می‌باشند.

حالت ۲: تحلیل با در نظر گرفتن واحدهای اندازه‌گیری فازور و شین‌های تزریق صفر

مجدداً سیستم نمونه ۷ شینه را در نظر بگیرید، به طوری که در این حالت فرض می‌شود، توان تزریقی به شین ۳ صفر است. با این فرض به آسانی مشاهده می‌شود که اگر فازور ولتاژ در سه شین از ۴ شین ۲، ۳، ۴ و ۶ مشخص باشد، آنگاه فازور ولتاژ شین چهارم با اعمال قانون KCL در شین ۳، قابل محاسبه خواهد بود. بنابراین باید قیود مرتبط با این مجموعه از شین‌ها را اصلاح نمود. اصلاح این قیود را به سه روش کلی می‌توان انجام داد که در ادامه به توضیح این روش خواهیم پرداخت.

روش اول: در این روش قیود مربوط به شین‌های ۲، ۴ و ۶ به شکل (۲۳-۲) در می‌آیند [۲۰]:

$$\begin{cases} f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 + f_3 \cdot f_4 \cdot f_6 \geq 1 \\ f_4 = x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + f_2 \cdot f_3 \cdot f_6 \geq 1 \\ f_6 = x_2 + x_3 + x_6 + f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \geq 1 \end{cases} \quad (23-2)$$

⁴³ OR operator

در مجموعه نامعادلات فوق، علامت "." معرف عملگر "و" ^{۴۴} منطقی می‌باشد. البته باید توجه داشت که در قید f_3 نیز عبارت $f_2 \cdot f_4 \cdot f_6$ ظاهر می‌شود، ولی می‌توان این عبارت را نادیده گرفت. زیرا این تقریب تاثیری بر مسأله بهینه‌سازی ما نخواهد داشت. می‌توان نامعادلات بالا را ساده کرد. برای مثال با جایگذاری قید f_3 در قید f_2 می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 + f_3 \cdot f_4 \cdot f_6 \\ = x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 + (x_2 + x_3 + x_4 + x_6) \cdot f_4 \cdot f_6 \\ = x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 + x_2 \cdot f_4 \cdot f_6 + x_3 \cdot f_4 \cdot f_6 + x_4 \cdot f_4 \cdot f_6 + x_6 \cdot f_4 \cdot f_6 \end{cases} \quad (24-2)$$

لازم به یادآوری است که برای دو مجموعه دلخواه B و C، اگر B زیر مجموعه C باشد، آنگاه $B+C=C$. از این رو، رابطه (۲۴-۲) را می‌توان به صورت زیر ساده کرد:

$$\begin{cases} x_2 + x_2 \cdot f_4 \cdot f_6 = x_2 \\ x_3 + x_3 \cdot f_4 \cdot f_6 = x_3 \\ x_6 + x_6 \cdot f_4 \cdot f_6 = x_6 \end{cases} \rightarrow f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 + x_4 \cdot f_4 \cdot f_6 \quad (25-2)$$

در ادامه ساده‌سازی، قید f_4 در عبارت به دست آمده فوق جایگذاری می‌شود:

$$\begin{aligned} f_2 &= x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 + x_4 \cdot (x_3 + x_4 + x_5 + x_7) \cdot f_6 \\ \xrightarrow{x_4 \cdot (x_3 + x_4 + x_5 + x_7) = x_4} & f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 + x_4 \cdot f_6 \end{aligned} \quad (26-2)$$

اکنون قید f_6 در رابطه فوق جایگذاری می‌گردد:

$$\begin{aligned} f_2 &= x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 + x_4 \cdot (x_2 + x_3 + x_6) \\ \begin{cases} x_2 + x_4 \cdot x_2 = x_2 \\ x_3 + x_4 \cdot x_3 = x_3 \\ x_6 + x_4 \cdot x_6 = x_6 \end{cases} \\ \xrightarrow{} & f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 \end{aligned} \quad (27-2)$$

به همین ترتیب می‌توان قیود f_4 و f_6 را ساده نمود که در نهایت به معادلات (۲۸-۲) خواهیم

رسید:

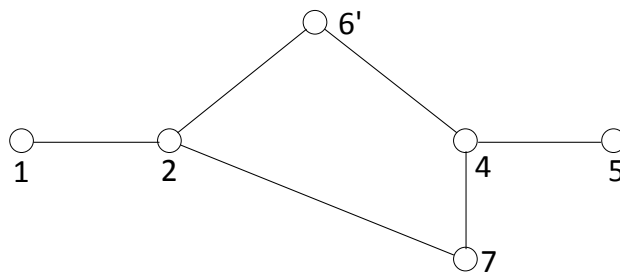
⁴⁴ AND operator

$$\begin{cases} f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 \geq 1 \\ f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 \geq 1 \\ f_6 = x_2 + x_3 + x_6 + x_1 \cdot x_4 + x_4 \cdot x_7 \geq 1 \end{cases} \quad (2-28)$$

لازم به ذکر است که قیود مربوط به شین‌های ۱، ۵ و ۷ تغییری نمی‌کنند و به همان شکلی خواهند بود که در رابطه (۲-۲۲) ذکر شد. اما قید مربوط به شین ۳ که شین تزریق صفر بود، از مجموعه قیود حذف می‌شود که دلیل این امر تاثیر غیر مستقیم این شین به صورت عبارت‌های اضافه شده در قیود شین‌های مجاور آن می‌باشد.

چنانکه مشاهده می‌شود، در نظر گرفتن شین‌های با توان تزریقی صفر، موجب غیر خطی شدن قیود مسأله بهینه‌سازی خواهد شد و حل آن را پیچیده و زمان‌بر خواهد کرد. از این رو این روش چندان مطلوب به نظر نمی‌رسد. دو روش دیگر که در ادامه تشریح خواهند شد، این مشکل را برطرف ساخته‌اند.

روش دوم [۱۹ و ۲۱]: در این روش، شینی را که دارای توان تزریقی مشخص است، با یکی از شین‌های مجاورش ترکیب می‌شود و پس از تغییر ساختار شبکه، ماتریس تلاقی و قیود لازم برای رویت‌پذیری کامل سیستم مطابق روشی که در حالت ۱ بدان اشاره شد، برای شبکه جدید بدست می‌آید. به عنوان مثال، شکل (۲-۱۳) را در نظر بگیرید. این شکل همان شبکه نمونه شکل (۲-۱۲) می‌باشد، با این تفاوت که شین‌های ۳ و ۶ آن شبکه قبلی با هم ترکیب شده‌اند و شین جدید ۶ جایگزین آن شده است.



شکل ۲-۱۳- شبکه نمونه ۷ شینه پس از ترکیب شدن شین‌های ۳ و ۶

بنابر این، ماتریس تلاقی در این حالت به صورت (۲۹-۲) در می‌آید:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29-2)$$

و مجموعه قیود این شبکه جدید نیز به شکل (۳۰-۲) خواهد بود:

$$\begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 \geq 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_{6'} + x_7 \geq 1 \\ f_4 = x_4 + x_5 + x_{6'} + x_7 \geq 1 \\ f_5 = x_4 + x_5 \geq 1 \\ f_{6'} = x_2 + x_4 + x_{6'} \geq 1 \\ f_7 = x_2 + x_4 + x_7 \geq 1 \end{cases} \quad (30-2)$$

علیرغم اینکه در این روش، قیود مسأله بهینه‌سازی با وجود در نظر گرفتن شین‌های با توان تزریقی معلوم، کماکان خطی باقی می‌ماند، اما از جمله ایرادات این روش آن است که اگر مکان بهینه حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی، شین ترکیبی را شامل شود، آنگاه مشخص نیست که واحد اندازه‌گیری فازور در کدام شین باید نصب گردد و یا حتی ممکن است لازم باشد در هر دو شین واحد اندازه‌گیری فازور نصب گردد. تشخیص این امر، مستلزم انجام یک تحلیل رویت‌پذیری ساختاری خواهد بود. از سوی دیگر، این روش مشخص نمی‌سازد که شین با توان تزریقی معلوم با کدام یک از شین‌های مجاورش باید ترکیب گردد که به نظر می‌رسد، جواب نهایی این مسأله به پاسخ این پرسش بستگی زیادی داشته باشد. از این رو، در روش سوم که در ادامه ارائه خواهد شد، سعی شده است که این معایب برطرف گردد.

روش سوم [۱۵-۱۸]: بر اساس قانون چهارم رویت‌پذیری اگر فقط یکی از شین‌های متصل به شین با توان تزریقی صفر رویت‌پذیر نباشد، بر طبق قانون KCL آن شین نیز رویت‌پذیر بوده و به عبارت دیگر، برای رویت‌پذیری چهار شین ۲، ۳، ۴ و ۶ شبکه نمونه ۷ شینه شکل (۲-۱۲)، کفایت

تنها ۳ شین از مجموعه شین‌های متصل به شین تزریق صفر شماره ۳ و خود شین، رویت‌پذیر گردند. بدین معنی که باید نامعادله زیر برقرار گردد:

$$f_2 + f_3 + f_4 + f_6 \geq 3 \quad (31-2)$$

قید فوق، جایگزین قیود لازم برای رویت‌پذیری شین‌های ۲، ۳، ۴ و ۶ می‌شود. به عبارت دیگر مجموعه قیود مربوط به این شبکه به صورت (۳۲-۲) خواهد بود که در این پروژه روشی جدید برای حل آن ارائه شده است و در فصل‌های جلوتر مفصلاً توضیح داده خواهد شد:

$$\begin{cases} f_1 \geq 1 \\ f_5 \geq 1 \\ f_7 \geq 1 \\ f_2 + f_3 + f_4 + f_6 \geq 3 \end{cases} \quad (32-2)$$

۲-۱۲- روش‌های رایج جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور

با توجه به هزینه زیاد نصب و راه‌اندازی دستگاه‌های اندازه‌گیری فاز در شبکه، از ابتدای اختراع این تکنولوژی تا کنون، روش‌ها و الگوریتم‌های زیادی برای جایابی بهینه این دستگاه‌ها با هدف پیدا کردن کمترین تعداد مورد نیاز این واحدها ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی (۱) روش‌های ریاضی معین معمول و (۲) روش‌های بهینه‌سازی هوشمند تقسیم‌بندی نمود.

روش ریاضی که به طور مختصر مدل ریاضی و قیدهای آن در انتهای فصل بعدی مورد بررسی قرار گرفت، به روش برنامه‌ریزی عدد صحیح قابل حل می‌باشد. ولی روش‌های بهینه‌سازی هوشمند بر خلاف روش قبلی نیازی به تعریف مجموعه‌ای از قیود به منظور رسیدن به هدف مسئله ندارند و حل آن بستگی به تعیین و تنظیم دقیق پارمترهای هر یک از روش‌ها در بهترین حالت دارد. در این روش‌ها، تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر سیستم به عنوان بخش دیگری از تابع هدف مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود تا با حداقل (صفر) نمودن این تعداد، رویت‌پذیری کامل شبکه تضمین گردد. محاسبه این تعداد متناسب با شرایط در نظر گرفته شده برای سیستم تغییر می‌کند. به عنوان مثال،

در سیستمی که شین‌های با توان تزریقی صفر در نظر گرفته نشده‌اند، شینی رویت ناپذیر تلقی می‌شود که هیچ واحد اندازه‌گیری فازوری بر روی آن و یا شین‌های متصل به آن نصب نشده باشد. اما در سیستم با در نظر گرفتن شین‌های تزریق صفر، یک شین هنگامی رویت‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود که نه تنها هیچ واحد اندازه‌گیری فازوری بر روی آن و یا شین‌های متصل به آن نصب نشده باشد، بلکه با اعمال KCL در شین‌های با توان تزریقی صفر نیز نتوان فازور ولتاژ آن شین را بدست آورد و لذا برای تعیین شین‌های رویت‌ناپذیر در این روش‌ها، غالباً از تحلیل رویت‌پذیری ساختاری استفاده می‌شود.

البته باید به این نکته نیز توجه داشت که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند در مقایسه با روش‌های ریاضی معمولی، زمان لازم برای حل مسأله جاییابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور را به خصوص برای شبکه‌های بسیار بزرگ به میزان چشم‌گیری افزایش می‌دهد و در بعضی موارد حل این مسئله برای شبکه‌های بزرگ غیر ممکن و یا دارای خطای زیادی خواهد شد.

از جمله روش‌های بهینه‌سازی هوشمند که برای حل این مسأله در مقالات و گزارشات مخالف استفاده شده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- الگوریتم ژنتیک^{۴۵} [۱۱ و ۲۲]
- الگوریتم ایمنی ژنتیک^{۴۶} [۲۳]
- الگوریتم ذرات پراکنده^{۴۷} [۲۴-۲۸]
- ترکیب روش سرد کردن فلزات^{۴۸} و روش دونیم کردن^{۴۹} [۱۳ و ۲۹]
- روش اجتماع مورچه‌ها^{۵۰} [۳۰]

⁴⁵ Genetic Algorithm (GA)

⁴⁶ Immunity Genetic Algorithm (IGA)

⁴⁷ Particle Swarm Optimization

⁴⁸ Simulated Annealing (SA)

⁴⁹ Bisecting Algorithm

⁵⁰ Ant Colony (AN)

- روش انفجار نارنجک^{۵۱} [۳۱]

- روش جستجو بر اساس لیست ممنوعه^{۵۲} [۳۲-۳۳]

- روش جستجوی باکتریایی^{۵۳} [۳۴]

در تعریف مسئله مکان‌یابی بهینه، هدف‌ها و محدودیت‌های مختلفی بیان شده است. ولی هدف

مشترک در تمامی این روش‌ها به ترتیب زیر می‌باشد:

- یافتن کمترین تعداد مورد نیاز واحد اندازه‌گیری فاز
- یافتن مکان نصب این واحدها در شبکه
- حفظ مشاهده پذیری سیستم

در تمامی مقالات مراحل زیر به ترتیب انجام شده‌اند:

۱. آشنایی با واحدهای اندازه‌گیری فاز و اهداف، مزایا و کاربردهای نصب آن‌ها در شبکه
۲. تعریف مشاهده‌پذیری شبکه
۳. مدل‌سازی ریاضی و فرموله کردن شبکه متناسب با روش مورد نظر برای بهینه‌سازی
۴. اجرای روش مورد استفاده بر روی یک شبکه نمونه
۵. بررسی نتایج و مقایسه آن با سایر روش‌ها

با توجه به اینکه اکثر روش‌های گفته شده در بالا به روش بهینه‌سازی هوشمند، در شبکه‌های بزرگ دچار محدودیت محاسبه می‌شوند و زمانگیر و یا غیر قابل حل می‌باشند و همچنین با توجه به اینکه بررسی این روش‌ها خارج از محدوده این پروژه می‌باشد، از بررسی بیشتر این روش‌ها خودداری کرده و در ادامه، روش‌های پیشنهادی این پروژه مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

⁵¹ Grenade Explosion Method (GEM)

⁵² Tabu Search (TS)

⁵³ Bacterial Foraging Algorithm (BFA)

فصل سوم

جایابی بهینه واحدهای

اندازه‌گیری فازور

۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور بر اساس روش پیشنهادی در این پروژه ابتدا فرمول‌بندی می‌گردد، سپس معادلات و قیود بدست آمده توسط ۲ روش حل معادلات، حل شده و پاسخ مسئله بدست می‌آید. اولین روش ارائه شده در این پروژه برای حل مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور، روش جستجوی دودویی فراگیر می‌باشد. اساس این روش بر مبنای جستجو بین تمامی حالات ممکن قرار گرفتن دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور در شین‌های شبکه و یافتن بهترین پاسخ و یا پاسخ‌ها بین تمامی حالات ممکن می‌باشد. استفاده از این روش تضمین کننده آن است که تمامی حالات ممکن بررسی شده و در نتیجه تمام حالات ممکن قابل دست‌یابی می‌باشد، ولی در روش‌های ریاضی و یا بهینه‌سازی هوشمند، معمولاً دستور خروج از برنامه بر اساس یافتن اولین پاسخ صحیح است و در صورت وجود بیش از یک پاسخ صحیح برای یک مسئله، امکان از دست رفتن تعدادی از آنها وجود دارد.

روش پیشنهادی دیگر استفاده از روش برنامه‌ریزی عددی برای حل این مسئله است. در حال حاضر به دلیل وجود الگوریتم‌های بسیار قوی برای حل مسائل برنامه‌ریزی عددی مانند Cplex، Baron، Coincnc، Coinglpk و ... و قابلیت اجرا در نرم‌افزارهای قدرت‌مندی مانند GAMS [۳۶]، AIMMS، TOMLAB و ...، سرعت حل این نوع مسائل را در شبکه‌های پیچیده به صورت چشم‌گیری کاهش داده است.

با این وجود، مقایسه نتایج بدست آمده در مقالات و گزارشات مختلف که از این روش برای جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه استفاده کرده‌اند [۲۱-۱۴ و ۳۵]، نشان دهنده این نکته است که روش فرمول‌بندی پیشنهادی در آن مقالات تنها با در نظر گرفتن تنها یک یا دو قید در حل مسئله حل شده است و شرایط عملکرد واقعی در نظر گرفته نشده است. همچنین در اکثر این

مقالات، تعداد واحدهای اندازه‌گیری فازور مورد نیاز برای مشاهده‌پذیر سازی شبکه، بیشتر از تعداد بدست آمده در این پروژه می‌باشد.

در این پروژه برای دستیابی به شرایط عملی‌تر و کاربردی‌تر در شبکه، از وجود دستگاه‌های اندازه‌گیری رایج نیز به دلایل زیر صرف‌نظر شده است:

۱- تاخیر در ارسال اطلاعات (به طور معمول بین ۱ تا ۵ ثانیه)

۲- تعداد نمونه‌برداری کم (معمولا ۲ تا ۵ نمونه در ثانیه)

۳- عدم توانایی در اندازه‌گیری فازور به دلیل نداشتن مرجع زمانی

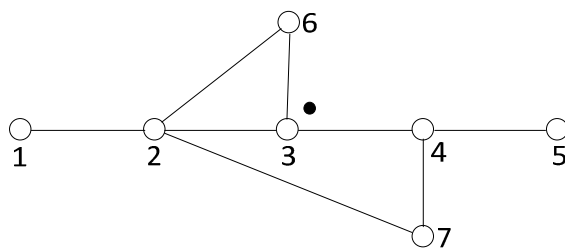
در نتیجه خطای حاصل از تخمین حالت در شبکه در این سیستم کمتر شده و جواب‌های بدست آمده در این پروژه مناسب برای آنالیز دینامیک شبکه نیز می‌باشد. لازم به ذکر است که در این پروژه شین‌های بدون بار و تولید، به عنوان شین تزریق صفر در نظر گرفته شده‌اند که در حل مسئله از آنها استفاده شده است. همچنین در مقالات مختلف، تنها امکان از دست رفتن یک واحد اندازه‌گیری فازور و یا تنها امکان خارج شدن یک خط در شبکه در نظر گرفته شده است. در بعضی دیگر از مقالات نیز این دو خطا در دو الگوریتم متفاوت بررسی شده‌اند که در نتیجه برای در نظر گرفتن احتمال وقوع هر دو خطا، باید جواب‌های هر دو الگوریتم را با یکدیگر تلفیق کرده که این امر منجر به افزایش تعداد واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه می‌گردد. در این پروژه احتمال وقوع این دو خطا در یک الگوریتم و به طور همزمان بررسی شده است. علاوه بر این در این پروژه هزینه نصب نیز برای هر شین در نظر گرفته شده است.

برای حل مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه، ابتدا این مسئله بر اساس روش پیشنهادی در این پروژه فرمول‌بندی شده و تمامی فرضیات مورد نظر در آن در نظر گرفته

می‌شود، سپس این مسئله به هر دو روش ارائه شده در این پروژه حل خواهد شد و نتایج آن در فصل بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۲- فرمول بندی کلی مسئله

به منظور آشنایی و توضیح روش استفاده شده در این پروژه، روش پیشنهادی بر روی یک شبکه ساده ۷ شینه مطابق شکل ۱-۳ توضیح داده خواهد شد. در این شبکه شین شماره ۳ به عنوان شین تزریق صفر در نظر گرفته شده که در شکل ۱-۳ با نقطه‌ای سیاه در کنار آن نمایش داده شده است.



شکل ۱-۳- سیستم تست ۷ باسه

بر اساس روش آورده شده در مراجع [۱۵-۱۸] و همچنین مطالب گفته شده در روش سوم

حالت دوم بخش ۲-۱۰، مجموعه قیود لازم برای رویت پذیری این مسئله به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 \geq 1 \\ f_2 + f_3 + f_4 + f_6 = x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 2x_4 + x_5 + 3x_6 + 2x_7 \geq 3 \\ f_5 = x_4 + x_5 \geq 1 \\ f_7 = x_2 + x_4 + x_7 \geq 1 \end{cases} \quad (1-3)$$

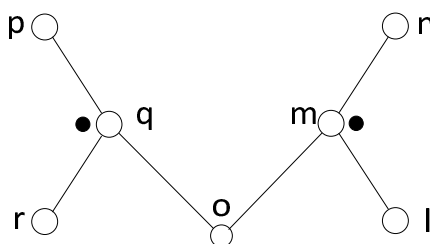
با حل این مسئله به روش برنامه‌ریزی عددی به این نتیجه می‌رسیم که با نصب دو واحد اندازه‌گیری فازور در شین‌های شماره ۲ و ۴، این شبکه رویت‌پذیر خواهد شد. اما این حالت، ساده‌ترین حالت ممکن در شبکه می‌باشد. ولی در صورتی که یک شین به دو شین تزریق صفر متصل باشد، مشخص نیست که این شین را باید با کدام یک از شین‌های تزریق صفر در نظر گرفت و یا در زمانی که یک یا چند شین تزریق صفر به یکدیگر متصل باشند، تعدادی از قیدهای شبکه کاسته خواهد شد.

در نتیجه در صورتی که از همین فرمول برای حل مسئله استفاده شود، ممکن است به پاسخ با تعداد بیشتری واحد اندازه‌گیری فازور در شبکه برسیم که مسلماً پاسخ بهینه نخواهد بود.

یکی از ایده‌های مطرح شده در این پروژه، ارائه روشی برای در نظر گرفتن شرایط گفته شده در بالا و حل آن می‌باشد.

شکل ۲-۳ نشان‌دهنده حالتی است که یک شین به دو شین تزریق صفر متصل شده باشد. در این حالت اگر هر شین تزریق صفر را بر اساس نکته گفته شده در بخش ۲-۱۰ بررسی کنیم داریم:

$$\begin{cases} f_l + f_m + f_n + f_o \geq 3 \\ f_o + f_p + f_q + f_r \geq 3 \end{cases} \quad (2-3)$$

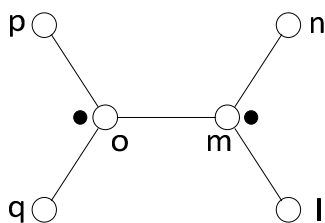


شکل ۲-۳- اتصال یک شین به دو شین تزریق صفر

همانطور که دیده می‌شود، شین ۰ در این معادلات ۲ بار در نظر گرفته شده است. با اینکه اگر فازور ولتاژ شین ۰ در معادله اول بدست آید، یک درجه از معادله دوم کاسته خواهد شد. ایده مطرح شده در این پروژه در نظر گرفتن توام این دو معادله در یک معادله می‌باشد. در این حالت می‌توان فرمول ۳-۳ را ارائه نمود:

$$f_l + f_m + f_n + f_o + f_p + f_q + f_r \geq 5 \quad (3-3)$$

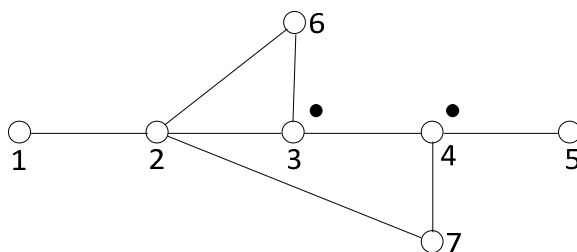
شکل ۳-۳ نشان‌دهنده حالتی است که دو شین تزریق صفر به یکدیگر متصل شده باشند. در این حالت یک درجه از قیدهای سیستم کاهش پیدا کرده و باید مطابق فرمول ۴-۳ رفتار شود.



شکل ۳-۳- اتصال دوشین تزریق صفر به یکدیگر

$$f_l + f_m + f_n + f_o + f_p + f_q \geq 4 \quad (۴-۳)$$

برای نشان دادن این حالت، شکل ۳-۴ را در نظر بگیرید که همان شبکه هفت شینه قبلی است، با این تفاوت که شین ۴ نیز در این شبکه، شین تزریق صفر بوده و مناسب برای نمایش راه حل نشان داده شده در بالا می‌باشد.



شکل ۳-۴- شبکه هفت شینه با دو شین تزریق صفر متصل به یکدیگر

بر اساس فرمول ۳-۲، شبکه هفت شینه شکل ۳-۴ را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی نمود:

$$\begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 \geq 1 \\ f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 \geq 4 \end{cases} \quad (۴-۳)$$

همانطور که قبلاً گفته شد، بدون در نظر گرفتن شین‌های تزریق صفر، این مسئله به صورت

معادله ۳-۵ قابل حل می‌باشد.

$$\min \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad \text{s.t.} \quad f_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \geq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (۵-۳)$$

با توجه به اینکه معادله f_i بعضی از شین‌ها با یکدیگر ادغام شده و در یک ردیف قرار می‌گیرند، می‌توان یک ماتریس جدید به نام T تعریف نمود که نکات گفته شده در بالا را بتوان با استفاده از این ماتریس که در ماتریس A ضرب می‌شود، پیاده‌سازی نمود [۱۶-۱۵]. در این ماتریس معادلاتی که با یکدیگر ادغام شده‌اند در یک ردیف خلاصه شده و ردیف‌های مربوط به هر کدام از معادلات تکرار شده از این ماتریس حذف می‌شوند. به عنوان مثال ماتریس T مربوط به شکل به صورت زیر خواهد بود.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

ماتریس T در ماتریس اتصالات A ضرب شده و ماتریس A^{new} را ساخته که این ماتریس جدید در معادله ۳-۵ جایگزین می‌شود. همچنین بردار درجه رویت‌پذیری b در سمت راست معادله نیز تغییر کرده و مطابق با ماتریس T و A اصلاح شده و ماتریس b^{new} بدست می‌آید. در نتیجه معادلات ۳-۵ به صورت ۳-۶ تبدیل خواهند آمد.

$$\min \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad \text{s.t.} \quad A^{new} \cdot X \geq b^{new} \quad (۳-۶)$$

در نتیجه فرمول‌های جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور شکل ۳-۴ به صورت معادلات

۳-۷ خواهد بود:

$$\min \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad \text{s.t.} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 4 & 4 & 2 & 3 & 3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \end{bmatrix} \quad (۳-۷)$$

این معادلات که به فرم برنامه‌ریزی عدد صحیح باینری درآمده است، توسط نرم‌افزار GAMS و یا روش جستجوی دودویی حل شده که نتایج آن مکان بهینه نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه می‌باشد. روش حل این معادلات در بخش بعدی آورده شده است.

از جمله مزایای فرمول‌بندی به طریق ذکر شده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(۱) استفاده از روش ماتریس T تضمین می‌نماید که در صورتی که در شبکه‌ای، شینی به یک

یا چند شین تزریق صفر متصل باشد، کمترین تعداد واحد اندازه‌گیری مورد نیاز برای

رویت‌پذیری آنها انتخاب خواهد شد.

(۲) این روابط تضمین کننده این هستند که در صورتی که یک یا چند شین تزریق صفر به

یکدیگر متصل باشند نیز کمترین تعداد واحد اندازه‌گیری مورد نیاز و مناسب‌ترین چیدمان

برای رویت‌پذیری آنها انتخاب خواهد شد.

۳-۳- در نظر گرفتن هزینه نصب

با توجه به اینکه در عمل هزینه نصب واحدهای اندازه‌گیری در هر شین متفاوت می‌باشد و

همچنین با توجه به اینکه هدف از این پروژه کمینه کردن هزینه نصب این تجهیزات برای رویت‌پذیری

شبکه می‌باشد و نه کمینه کردن تعداد واحدهای اندازه‌گیری، باید راه حلی برای در نظر گرفتن این

مسئله ارائه گردد. با توجه به این فرض مسئله که تجهیز نصب شده در هر شین فازور جریان تمامی

خطوط متصل به آن شین را اندازه‌گیری می‌نماید، تفاوت در هزینه نصب این تجهیزات مربوط به

هزینه تجهیزات اندازه‌گیری جریان و ولتاژ (تعداد CT و PT) می‌باشد. همچنین هر دستگاه باید تعداد

کانال لازم برای اندازه‌گیری هر فازور جریان و ولتاژ را نیز داشته باشد. با توجه به اینکه عدد واقعی

برای این امر در دسترس نمی‌باشد و این نکته که در اینجا هدف تنها مدل‌سازی مسئله با در نظر

گرفتن ماتریس هزینه و نمایش اثر آن در جواب مسئله می‌باشد، می‌توان هزینه نصب هر تجهیز بر

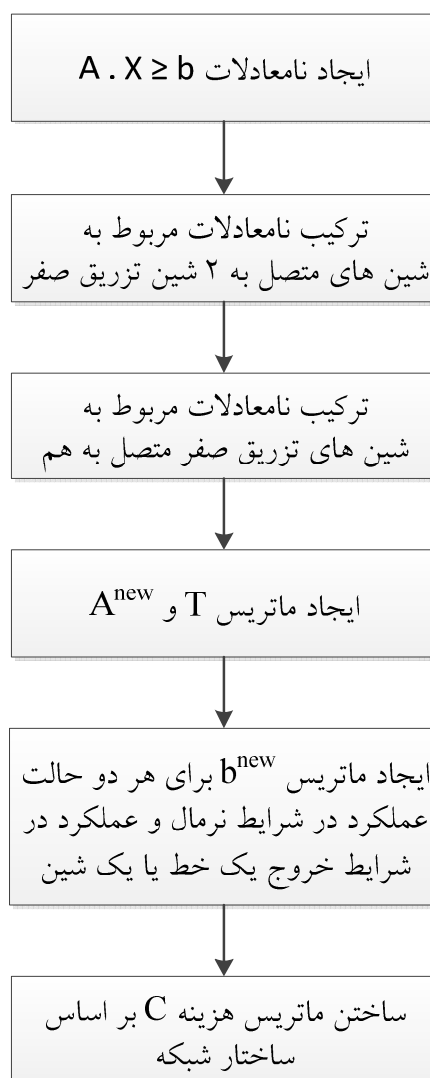
روی یک شین با تنها یک خط متصل به آن را برابر یک پریونیت در نظر گرفت. هزینه اضافه شدن هر

خط را نیز می‌توان ۰/۱ پریونیت فرض نمود. در نتیجه ماتریس هزینه شبکه داده شده در شکل ۳-۴

به صورت زیر خواهد شد.

$$c = [1 \quad 1.3 \quad 1.2 \quad 1.2 \quad 1 \quad 1.1 \quad 1.1]$$

روندنمای کلی مرحله فرمول‌بندی این پروژه در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵- روندنمای روش فرمول‌بندی پیشنهادی

۳-۴- حل مسئله به روش جستجوی دودویی فراگیر در شرایط عملکرد نرمال

در این روش در ابتدا تمامی حالات ممکن برای قرار گرفتن به ترتیب تنها ۱، ۲، یا ۳، یا ... و یا n دستگاه در n شین شبکه ساخته می‌شود. برای اینکار یک بردار وضعیت X دارای n مولفه تعریف می‌شود که یک و یا صفر بود مولفه x_i این بردار نشان‌دهنده قرار داشتن و یا قرار نداشتن دستگاه در

آن شین می‌باشد. با توجه به اینکه هر درایه بردار می‌تواند صفر و یا یک باشد، تعداد حالت‌های ممکن قرار گرفتن دستگاه‌ها در شبکه برابر 2^n حالت می‌باشد.

این روش در ابتدا تنها با در نظر گرفتن ساده‌ترین حالت، یعنی بدون در نظر گرفتن شین‌های تزریق صفر در شبکه و تنها با در نظر گرفتن وجود واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه بررسی شده است. بر اساس مطالب گفته شده در حالت ۱ بخش ۲-۱۰ این پروژه، مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه به صورت (۸-۳) قابل فرموله کردن می‌باشد:

$$\min \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad \text{s.t.} \quad f_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \geq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8-3)$$

در این مسئله هزینه نصب همه واحدها در شبکه یکسان و برابر ۱ پیونیت در نظر گرفته شده است. بردار b_i نیز درجه مشاهده‌پذیری هر شین را نشان می‌دهد که در اینجا یک در نظر گرفته شده است. برای حل این مسئله، تمامی حالات در قید ۳-۸ بررسی شده و جواب‌های با کمترین تعداد واحد اندازه‌گیری فازور، به عنوان پاسخ‌های صحیح در نظر گرفته می‌شود.

در این روش تمامی پاسخ‌های صحیح ممکن بدست می‌آید و هر کدام می‌تواند چیدمان مناسبی برای واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه می‌باشد، ولی سوال اینجاست که کدام یک در عمل مناسب‌تر برای اجرا و پیاده‌سازی بر روی شبکه واقعی است؟

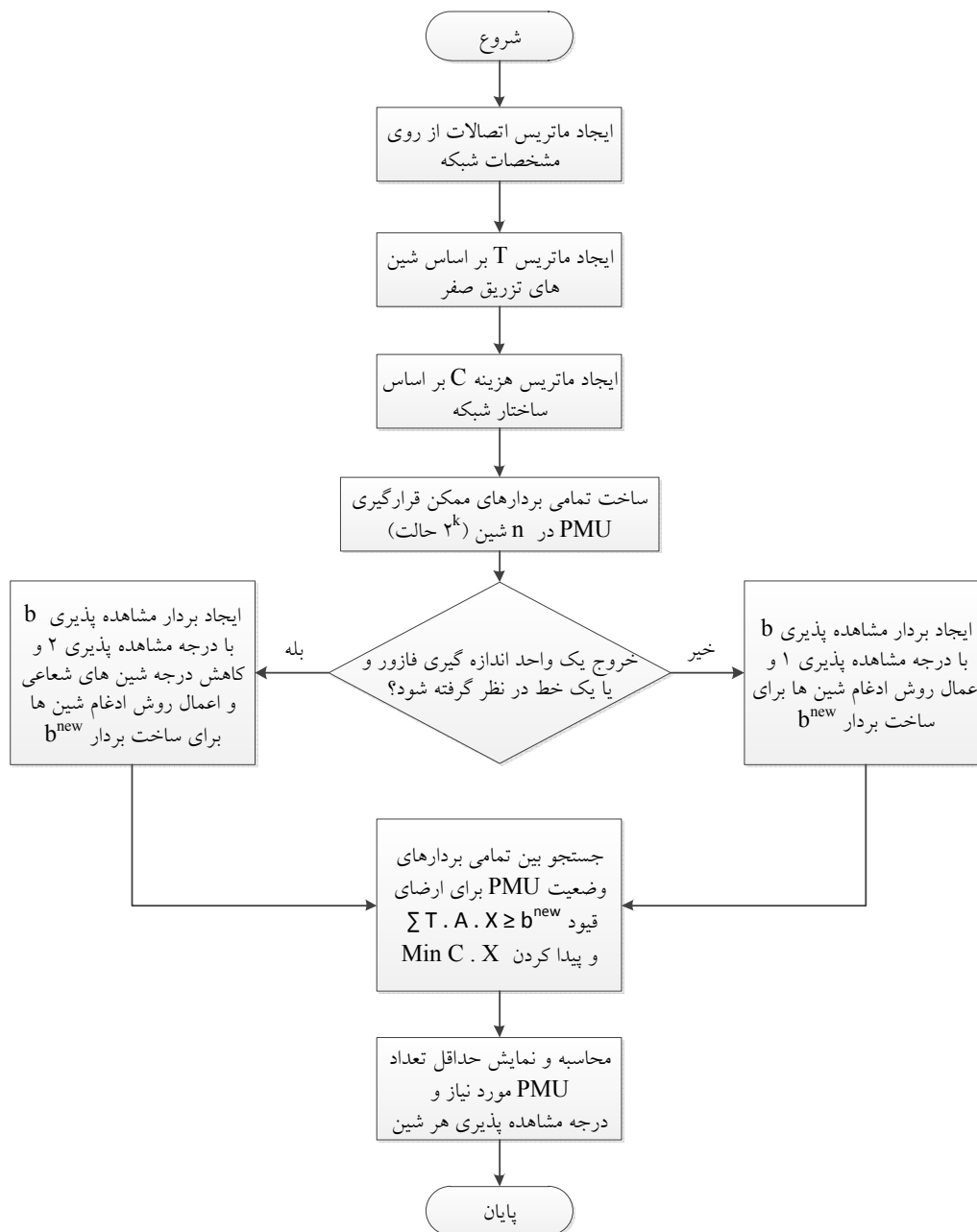
پیشنهاد ارائه شده در این پروژه انتخاب پاسخی است که دارای بیشترین تعداد شین با درجه دسترسی بیشتر از ۱ می‌باشد. این به این دلیل است که با توجه به اینکه واحدهای اندازه‌گیری فازور، تجهیزات با قابلیت اطمینان بالایی هستند، رسیدن درجه مشاهده‌پذیری یک شین به ۲، کافی برای افزایش قابلیت اطمینان در شبکه می‌باشد.

ایده دیگری که در این پروژه می‌توان اجرا نمود، در نظر گرفتن درجه مشاهده‌پذیری بیشتر از ۱ برای یک یا چند شین خاص در شبکه بر مبنای درجه اهمیت آن شین می‌باشد. در این حالت می‌توان

درایه مربوط به شین‌های مورد نظر را در بردار درجه مشاهده‌پذیری b_i در سمت راست معادله ۳-۸ برابر ۲ یا بیشتر قرار داد که در این پروژه، به علت کاربردی نبودن این امر، از اجرای آن صرف‌نظر شده است.

مزیت این روش نسبت به سایر روش‌های ارائه شده در سایر مقالات، رسیدن به تمامی پاسخ‌های ممکن می‌باشد، در صورتی که در سایر روش‌ها احتمال از دست دادن تعدادی از پاسخ‌های صحیح وجود دارد. ولی مشکل این روش، حجم بالای محاسبات آن می‌باشد. به عنوان مثال، زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی این روش بر روی شبکه ساده ۱۴ شینه، توسط کامپیوتر شخصی با پردازنده با مشخصات Intel Core 2-1.83 GHz همراه با ۲ گیگابایت حافظه RAM، تقریباً برابر با ۳۲ ثانیه است. با توجه به اینکه با افزایش یک شین به شبکه، تعداد حالات ممکن برای بررسی را ۲ برابر می‌کند و در نتیجه زمان لازم برای اجرا را نیز حداقل ۲ برابر می‌کند، لذا با افزایش ابعاد شبکه به عنوان مثال به شبکه ۵۷ باسه، حداقل زمان تخمینی برابر با $2/8 \times 10^{14} = 32 \times 2^{(57-14)}$ ثانیه، معادل ۸،۹۲۵،۵۱۲ سال می‌شود که این زمان غیر قابل قبول و غیر عملی می‌باشد.

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند در جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه‌های بزرگ بسیار پیچیده و زمان‌بر خواهد بود. همچنین در این روش امکان از دست دادن تعدادی از پاسخ‌های بهینه نیز وجود دارد. استفاده از روش جستجوی کل حالات که در ابتدای فصل به آن پرداخته شد نیز، با اینکه تمامی پاسخ‌های ممکن را بدست می‌آورد، ولی اجرای آن در شبکه‌های بزرگ با مشکل سخت‌افزاری روبرو خواهد شد. در صورت استفاده از ابررایانه‌هایی با قابلیت پردازش بالا، می‌توان از این روش برای حل مسئله استفاده نمود و به عنوان بهترین روش با قابلیت اطمینان ۱۰۰٪ می‌توان معرفی نمود. در نتیجه برای حل این مشکل روش دومی پیشنهاد شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۳-۶ نشان‌دهنده روندنمایی حل مسئله به روش جستجوی دودویی فراگیر می‌باشد.



شکل ۳-۶- روندنمای الگوریتم ارائه شده به روش جستجوی دودویی فراگیر

۳-۵- حل مسئله به روش برنامه ریزی عددی در شرایط عملکرد نرمال

همانطور که در ابتدای این فصل گفته شد، الگوریتم‌های متفاوتی برای حل مسائل برنامه‌ریزی

عدد صحیح باینری وجود دارد. نکته مهم در این مسئله این است که جایابی بهینه واحدهای

اندازه‌گیری فازور در شبکه می‌تواند پاسخ‌های متفاوتی داشته باشد. بخصوص در صورتی که هدف مسئله کمینه کردن تعداد تجهیزات نصب شده در شبکه باشد و نه هزینه نصب. در نتیجه ممکن است چیدمان‌های مختلفی در شبکه ارضا کننده قیود مسئله باشند. ولی در صورت حل با تنها یکی از الگوریتم‌های مربوطه، با در نظر گرفتن این نکته که خروج از هر الگوریتم با رسیدن به نقطه مینیمم کلی می‌باشد و با توجه به اینکه این مسئله می‌تواند چندین نقطه مینیمم کلی داشته باشد، با هر الگوریتم، تنها به یک پاسخ از بین پاسخ‌های صحیح خواهیم رسید.

ایده آورده شده در این پروژه استفاده از چندین الگوریتم مختلف می‌باشد که شاید بتوان نقاط بیشتری را از بین پاسخ‌های صحیح بدست آورد. در این پروژه برای حل مسئله از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است و این نرم‌افزار برای حل معادلات برنامه ریزی خطی عدد صحیح مخلوط^{۵۴} از حل‌کننده‌های^{۵۵} زیر پشتیبانی می‌نماید:

- Cplex -
- Baron -
- Bdmlp -
- Coincbc -
- Coinglpk -
- Osl -
- Xa -
- Xpress -

روش حل هر کدام از این الگوریتم‌ها متفاوت می‌باشد و بررسی آنها از محدوده این پروژه خارج است. ولی در اینجا اشاره مختصری به تنها الگوریتم CPLEX خواهیم داشت. این نرم‌افزار به صورت بسته بوده و متعلق به شرکت IBM می‌باشد و نحوه عملکرد دقیق آن در دسترس نیست. ولی در پیوست ۱ به تشریح تاریخچه آن و نحوه عملکرد آن به طور خلاصه پرداخته شده است.

⁵⁴ Mixed Integer Linear Programming (MILP)

⁵⁵ Solver

۳-۶- مشاهده پذیری در شرایط از دست رفتن یک واحد یا یک خط

همانند سایر تجهیزات به کار گرفته شده در سیستم قدرت، احتمال رخداد خرابی واحدهای اندازه‌گیری فازور یا قطع خطوط ارتباطی مابین شین‌ها وجود دارد. لذا برای انجام پیوسته تخمین حالت در سیستم قدرت لازم است جایابی این واحدها به گونه‌ای صورت گیرد که با خروج هر یک از این واحدها و یا قطع هر یک از خطوط، رویت‌پذیری کامل سیستم کماکان تامین شود. از طرف دیگر به دلیل هزینه بالای واحدهای اندازه‌گیری فازور، محدودیت در تعداد واحدهای قابل نصب وجود دارد. بنابر این لازم است مکان‌های نصب بهینه به گونه‌ای تعیین شوند که ضمن تامین اهداف فوق، تعداد واحدهای لازم به حداقل ممکن کاهش یابد.

به منظور حفظ رویت‌پذیری سیستم در صورت از دست رفتن یکی از تجهیزات اندازه‌گیری، لازم است تا جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازور را به نحوی انجام دهیم تا هر شین حداقل توسط دو واحد اندازه‌گیری فازور جداگانه در دسترس باشد. در این صورت اگر یکی از تجهیزات به علت نقص از سیستم خارج شد، تمامی شین‌هایی که قبلاً رویت‌پذیری آنها از طریق این تجهیز تامین می‌شد، اکنون از طریق تجهیز دیگری رویت‌پذیر باقی خواهند ماند. در مقالات مختلف دو راهکار زیر برای تامین این قیود پیشنهاد شده است:

۱- افزونگی محلی^{۵۶}

در روش افزونگی محلی، پیشنهاد می‌شود که تمامی درایه‌های بردار درجه مشاهده‌پذیری معادلات (b_i)، به ۲ تغییر یابد. در این صورت این قیود تضمین می‌کند که هر شین از طریق حداقل ۲ واحد اندازه‌گیری فازور رویت‌پذیر خواهد بود.

⁵⁶ Local Redundancy (LR)

۲- مجموعه اولیه و پشتیبان^{۵۷}

در این روش، دو مجموعه مجزا از واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه جایابی شده به طوری که در هر شین بیش از یک واحد اندازه‌گیری فازور نصب نشود و همچنین هر مجموعه، رویت‌پذیری کل سیستم را تضمین نماید. در این صورت اگر یکی از واحدهای یکی از دو مجموعه خراب شود، مشاهده‌پذیری شبکه از طریق مجموعه دیگر انجام می‌شود. با مقایسه این روش و روش قبلی حاصل از مقالات مختلف، به این نتیجه می‌رسیم تعداد تجهیز مورد نیاز در این روش بیشتر از روش قبلی بوده و همچنین در صورتی که یک واحد اندازه‌گیری از یک مجموعه و واحد دیگری از مجموعه دیگر خراب گردد، دیگر شبکه مشاهده‌پذیر نخواهد بود.

برای مشاهده‌پذیر بودن سیستم در صورت خروج یکی از خطوط انتقال نیز در گزارشات مختلف، یک روش مشترک ارائه شده است. در این روش، ابتدا یک خط از مدار خارج شده و قیود لازم برای مشاهده‌پذیری سیستم بدست می‌آید. سپس خط اول را دوباره در سیستم گذاشته و خط دیگری را خارج کرده و قیود مربوط به آن برای مشاهده‌پذیر ماندن کل سیستم بدست می‌آید. این فرآیند را برای کلیه خطوط سیستم تکرار کرده و مجموعه قیود مشاهده‌پذیری سیستم در صورت خروج هر یک از خطوط بدست می‌آید. در نهایت مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور را همراه با قیود عملکرد در شرایط نرمال همراه با قیود بدست آمده در صورت خروج تکی خطوط را توسط برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط حل می‌کنیم.

مشکل این روش، دشوار بودن تعیین قیود شبکه به ازای خروج تکی واحدها از شبکه می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه تعداد خطوط در شبکه‌های بزرگ بسیار زیاد می‌باشد و این نکته که به ازای هر خط یک یا چند قید به قیود مسئله جایابی بهینه اضافه می‌گردد، تعداد این قیود در شبکه‌های بزرگ بسیار زیاد می‌گردد که در درجه اول یافتن این قیود بسیار دشوار و زمان‌بر خواهد

⁵⁷ Primary & Backup set (P & B)

بود و در درجه دوم حل مسئله به کمک برنامه‌ریزی خطی عد صحیح مخلوط را بسیار سخت و حتی غیر ممکن می‌سازد. بررسی نتایج این روش که در مقالات مختلف ارائه شده است نشان‌دهنده این است که این روش تنها در شبکه‌های کوچک بررسی شده و در شبکه‌های بزرگ از بررسی این نوع خطا در شبکه صرف‌نظر شده است.

نکته دیگر، بررسی توامان بروز این دو خطا در شبکه، یعنی خروج یکی از واحدهای اندازه‌گیری فازور و یا خروج یکی از خطوط انتقال در شبکه می‌باشد. با توجه به اینکه واحدهای اندازه‌گیری فازور دارای قابلیت اطمینان بالایی می‌باشند ولی احتمال خروج خطوط انتقال بدلیل بروز خطا و یا عملیات سوئیچ‌زنی در شبکه زیاد می‌باشد، این دو خطا باید به طور همزمان بررسی شود و راه حلی ارائه گردد تا شبکه در صورت بروز یکی از این دو خطا کماکان مشاهده‌پذیر باقی بماند. در روش‌های ارائه شده در مقالات، ابتدا یکی از روش‌های جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور در صورت خروج یکی از واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه انتخاب شده، سپس همانند روش گفته شده برای خروج تکی خطوط، تمامی قیود مربوطه بدست می‌آید. در نهایت مسئله جایابی بهینه حل می‌شود. همانطور که گفته شد، این روش برای شبکه‌های بزرگ بسیار سخت و یا بدلیل وجود تعداد زیاد قیود و حجم بالای محاسبات غیر ممکن می‌باشد.

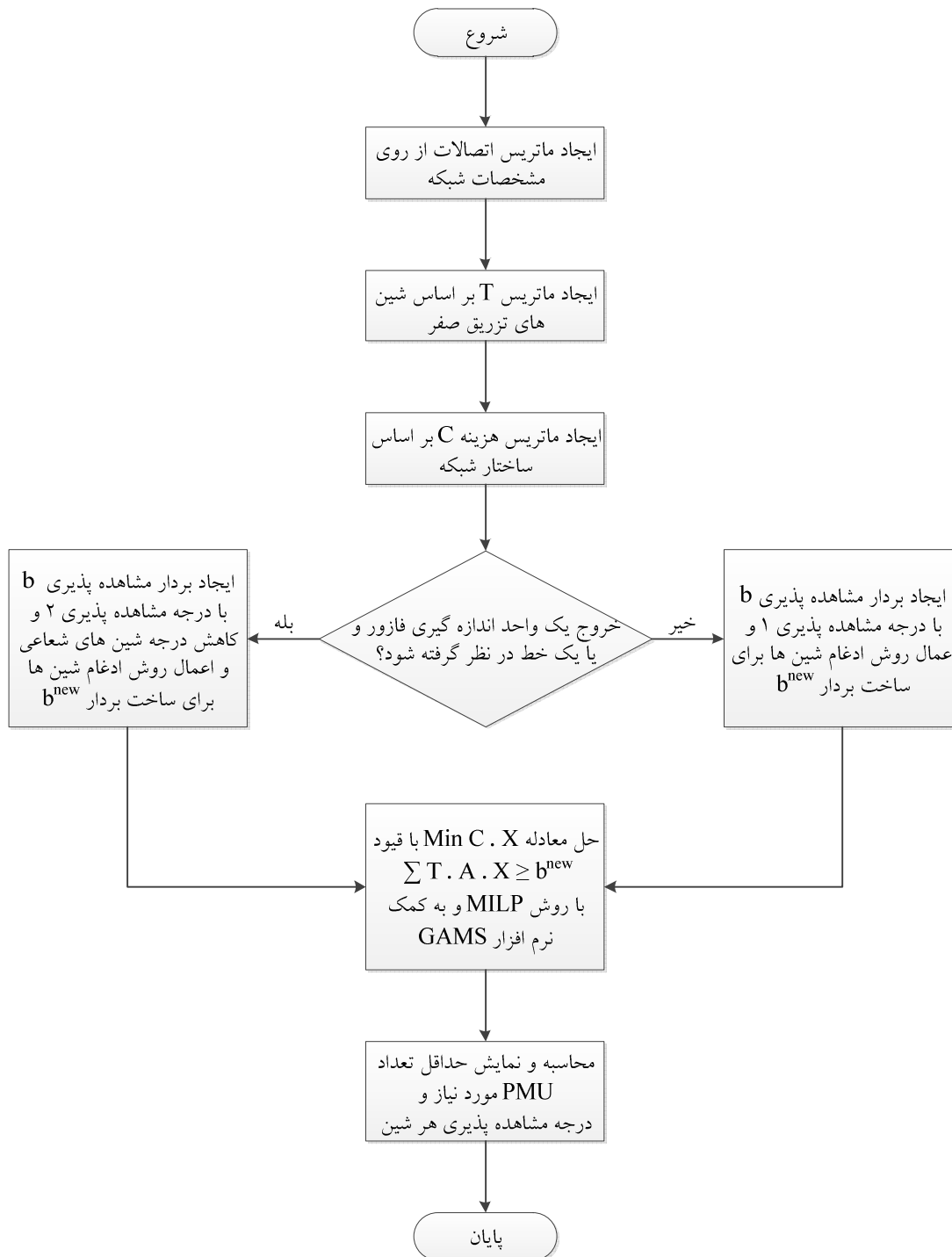
روش ارائه شده در این پروژه نکته نهفته در روش افزونگی محلی برای تامین مشاهده‌پذیری در صورت خروج یکی از واحدهای اندازه‌گیری فازور می‌باشد. در این روش مشاهده‌پذیری هر شین از طریق دو واحد اندازه‌گیری فازور تامین می‌شود که در نتیجه این عمل باید از طریق دو خط انتقال مجزا انجام گیرد. در این صورت دو نوع خط انتقال در شبکه وجود دارد. یکی خطوطی که در مشاهده‌پذیری یک شین از طریق یک واحد اندازه‌گیری تاثیر دارد و دیگری خطوطی که در این فرایند تاثیری ندارند. در صورت خروج یکی از خطوط نوع دوم از سیستم، شبکه بدون هیچ مشکلی کماکان مشاهده‌پذیر باقی می‌ماند و در صورت خروج یکی از خطوط نوع اول، شین مربوطه از طریق خط دیگر

متصل به آن مشاهده‌پذیر باقی می‌ماند. تنها مشکل شین‌های شعاعی در شبکه می‌باشند که تنها از طریق یک خط به شبکه متصل می‌باشند. با توجه به اینکه اگر این شین‌ها از شبکه جدا شوند، تاثیری در مشاهده‌پذیری سایر شین‌های شبکه ندارند، می‌توان در معادلات مربوطه، درایه مربوط به آن شین در بردار درجه مشاهده‌پذیری (b^{new}) معادله ۳-۶ را برابر یک در نظر گرفت.

در نهایت تمامی موارد بالا در یک الگوریتم مشخص در نرم‌افزار MATLAB و همچنین برای حل معادلات برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط در نرم‌افزار GAMS نوشته شده و نتایج شبیه‌سازی بر روی تعدادی از شبکه‌های تست استاندارد IEEE اجرا شده است. به طور خلاصه این الگوریتم شامل موارد زیر می‌باشد.

- ۱- ارائه روشی برای حل معادلات به صورت خطی
- ۲- ارائه روشی برای در نظر گرفتن شین‌های تزریق صفر
- ۳- در نظر گرفتن هزینه نصب متفاوت در شین‌های شبکه
- ۴- در نظر گرفتن خروج یک واحد اندازه‌گیری فازور و یا یک خط از شبکه

برای آشنایی بیشتر با نحوه عملکرد این الگوریتم، روند نمای آن در شکل ۳-۷ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۷- روندنمای الگوریتم ارائه شده به روش برنامه‌ریزی عددی

فصل چهارم

نتایج شبیه‌سازی بر روی

شبکه‌های نمونه

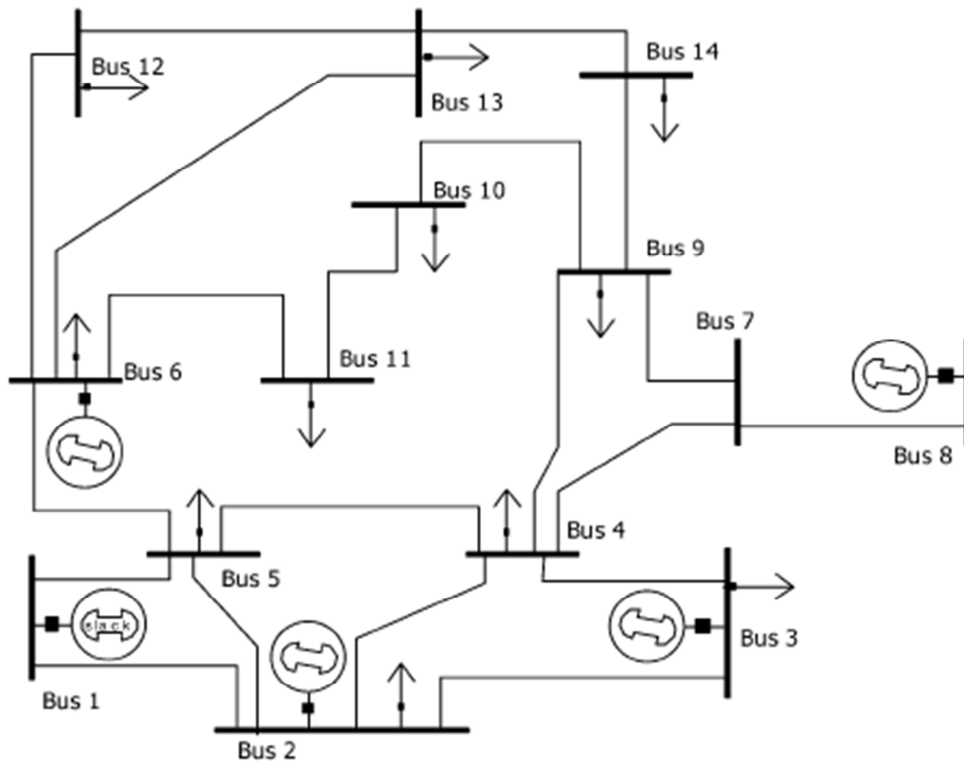
۴-۱- مقدمه

در این فصل به منظور ارزیابی الگوریتم‌های ارائه شده در این پروژه، مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور برای روش اول بر روی شبکه استاندارد ۱۴ شینه و برای الگوریتم دوم بر روی شبکه‌های استاندارد ۱۴، ۳۰، ۳۹، ۵۷ و ۱۱۸ شینه IEEE شبیه‌سازی شده و تعداد کمینه و محل نصب این تجهیزات به منظور مشاهده‌پذیری شبکه، هم در شرایط عملکرد نرمال و هم در صورت خروج یکی از واحدهای اندازه‌گیری فازور و یا یکی از خطوط انتقال بدست آمد. سپس نتایج بدست آمده با نتایج سایر مقالات و گزارش‌های موجود در این زمینه مقایسه شده است.

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی روش جستجوی دودویی فراگیر در شرایط عملکرد نرمال

این مسئله بر اساس این روش بر روی شبکه نمونه ۱۴ شینه استاندارد IEEE که در شکل ۴-۱ آورده شده، شبیه‌سازی شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، تنها شین ۷ در این شبکه، شین تزریق صفر می‌باشد که البته در حل این مسئله در نظر گرفته نشده است. ماتریس اتصالات این شبکه به صورت زیر می‌باشد:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



شکل ۴-۱- شبکه تست استاندارد ۱۴ شینه IEEE

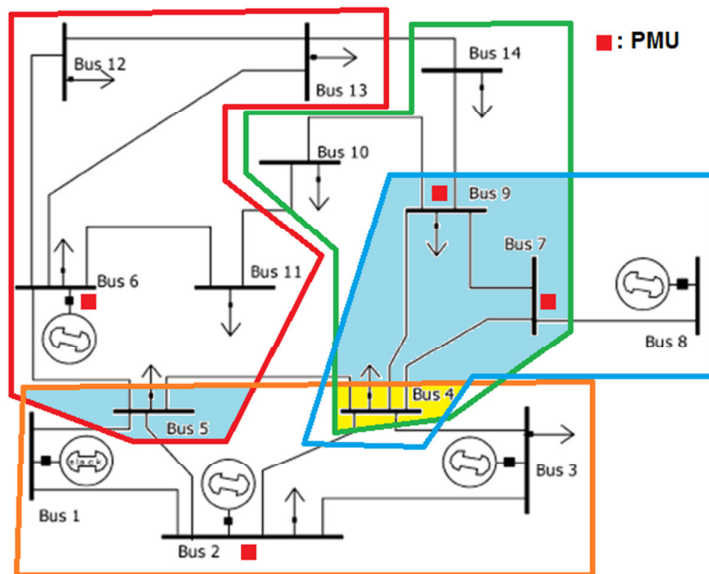
پس از حل این مسئله بر روی شبکه نمونه، حداقل تعداد واحد اندازه‌گیری فازور در شبکه ۴ عدد بدست آمد که با این تعداد دستگاه، ۵ پاسخ مختلف و جایابی مختلف برای این مسئله بدست آمد که در جدول ۴-۱ نشان داده شده است.

در جدول ۴-۱ ستون موقعیت نشان دهنده شماره شین محل قرار گرفتن واحد اندازه‌گیری بوده و ستون درجه دسترسی، نشان دهنده این است که شین مربوطه حداقل از طریق چند واحد اندازه‌گیری قابل دسترسی است. این ستون از حاصلضرب ماتریس اتصالات در ماتریس حالت پاسخ بدست می‌آید. شکل ۴-۲ نشان دهنده ناحیه قابل دسترسی هر واحد اندازه‌گیری بر اساس چیدمان پاسخ اول می‌باشد. با مقایسه جدول ۴-۱ و شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود که به عنوان مثال، شین شماره ۴ از طریق ۳ واحد اندازه‌گیری نصب شده در شین ۲، ۷ و ۹ قابل دسترسی می‌باشد.

جدول ۴-۱- پاسخ‌های حل مسئله از طریق روش پیشنهادی اول بر روی شبکه نمونه ۷ باسه

پاسخ		۱		۲		۳		۴		۵	
موقعیت	دسترسی	موقعیت	دسترسی	موقعیت	دسترسی	موقعیت	دسترسی	موقعیت	دسترسی	موقعیت	دسترسی
۱		۱		۱		۱		۱		۱	
۲	■	۱	■	۱	■	۱	■	۱	■	۱	■
۳		۱		۱		۱		۱		۱	
۴		۴		۲		۲		۲		۲	
۵		۲		۲		۱		۱		۱	
۶	■	۱	■	۱	■	۲	■	۱	■	۱	■
۷	■	۲	■	۱	■	۱	■	۱	■	۱	■
۸		۱		۱		۱		۱		۱	
۹	■	۲	■	۱	■	۱	■	۱	■	۱	■
۱۰		۱		۱		۱		۱		۱	
۱۱		۱		۱		۱		۱		۱	
۱۲		۱		۱		۱		۱		۱	
۱۳		۱		۱		۱		۱		۱	
۱۴		۱		۱		۱		۱		۱	
مجموع	۴	۱۹	۴	۱۷	۴	۱۶	۴	۱۶	۴	۱۴	۴

شماره باس



شکل ۴-۲- ناحیه قابل دسترسی هر واحد اندازه‌گیری بر اساس چیدمان پاسخ اول

همانطور که مشاهده می‌شود، هر پنج پاسخ بدست آمده می‌تواند چیدمان مناسبی برای واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه می‌باشد، ولی سوال اینجاست که کدام یک در عمل مناسب‌تر برای اجرا و پیاده‌سازی بر روی شبکه واقعی است؟

پیشنهاد ارائه شده در این پروژه انتخاب پاسخی است که دارای بیشترین تعداد شین با درجه دسترسی بیشتر از ۱ می‌باشد. این به این دلیل است که با توجه به اینکه واحدهای اندازه‌گیری فازور، تجهیزات با قابلیت اطمینان بالایی هستند، رسیدن درجه مشاهده‌پذیری یک شین به ۲، کافی برای افزایش قابلیت اطمینان در شبکه می‌باشد.

ایده دیگری که در این پروژه می‌توان اجرا نمود، در نظر گرفتن درجه مشاهده‌پذیری بیشتر از ۱ برای یک یا چند شین خاص در شبکه بر مبنای درجه اهمیت آن شین می‌باشد. در این حالت می‌توان درایه مربوط به شین‌های مورد نظر را در بردار درجه مشاهده‌پذیری b_i در سمت راست معادله ۴-۱ برابر ۲ یا بیشتر قرار داد که در این پروژه، به علت کاربردی نبودن این امر، از اجرای آن صرف‌نظر شده است.

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی روش برنامه‌ریزی عددی در شرایط عملکرد نرمال

در این پروژه به منظور حل مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه، از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط استفاده شد که به این منظور، برنامه‌ای در نرم‌افزار GAMS نوشته شد. این نرم‌افزار به نرم‌افزار MATLAB متصل گردید، به طوریکه این نرم‌افزار پس از آماده سازی ماتریس‌های اتصالات A و ماتریس T و بردار درجه مشاهده‌پذیری و حذف ردیف‌های اضافه در این ماتریس‌ها و ...، برای حل مسئله، نرم‌افزار GAMS را فراخوانی کرده و سپس نتایج را گرفته و در نهایت بر اساس نتایج بدست آمده، سایر پارامترهای مورد نیاز را محاسبه می‌نماید. در نرم‌افزار GAMS نیز همانطور که گفته شد از الگوریتم‌های حل متفاوتی برای رسیدن به پاسخ‌های صحیح

استفاده شده است. مشخصات فنی رایانه مورد استفاده نیز به صورت Intel Core 2 CPU T5600 @ 1.83GHz, 2.00 GB RAM می‌باشد. اطلاعات مربوط به شبکه‌های تست در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲- مشخصات شبکه‌های تست استاندارد IEEE [۳۷]

سیستم IEEE	تعداد خطوط	تعداد شین‌های تزریق صفر	محل شین‌های تزریق صفر	محل شین‌های شعاعی انتهایی
۱۴ شینه	۲۰	۱	۷	۸
۳۰ شینه	۴۱	۶	۲۸، ۲۷، ۲۵، ۲۲، ۹، ۶	۲۶، ۱۳، ۱۱
۳۹ شینه	۴۶	۱۲	۱۳، ۱۱، ۱۰، ۹، ۶، ۵، ۲، ۱ ۲۲، ۱۹، ۱۷، ۱۴	۳۵، ۳۴، ۳۳، ۳۲، ۳۱، ۳۰ ۳۸، ۳۷، ۳۶
۵۷ شینه	۸۰	۱۵	۲۶، ۲۴، ۲۲، ۲۱، ۱۱، ۷، ۴ ۴۶، ۴۵، ۴۰، ۳۹، ۳۷، ۳۶، ۳۴ ۴۸	-
۱۱۸ شینه	۱۸۶	۱۰	۶۴، ۶۳، ۳۸، ۳۷، ۳۰، ۹، ۵ ۸۱، ۷۱، ۶۸	۱۱۲، ۱۱۱، ۸۷، ۷۳، ۱۰ ۱۱۷، ۱۱۶

نتایج مربوط به جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور در شرایط عملکرد نرمال در شبکه ۱۴ شینه در جدول ۴-۳ و ۴-۴ آورده شده است. در صورتی که هزینه نصب این تجهیزات را در تمامی شین‌ها برابر بگیریم، هزینه نصب معادل با تعداد PMU مورد نیاز بر حسب پریونیت خواهد شد، ولی در صورتی که این هزینه نصب را متفاوت در نظر بگیریم، مقدار آن بر حسب پریونیت و بر اساس بردار هزینه که در جدول ۴-۳ آورده شده است، محاسبه شده و در جدول ۴-۴ آورده شده است. همچنین بر اساس نتیجه بدست آمده، بردار مشاهده‌پذیری شین‌های شبکه نیز در جدول ۴-۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شین‌های ۴ و ۵ دو بار به صورت مستقیم مشاهده پذیر می‌باشند و عدد صفر برای شین ۸ بیانگر این مطلب است که مشاهده‌پذیری این شین به طور غیر مستقیم و توسط شین تزریق صفر تامین می‌گردد. در این جدول علاوه بر تعیین محل نصب این تجهیزات اندازه‌گیری،

نسبت تعداد PMU مورد نیاز به کل تعداد شین‌های شبکه نیز آورده شده است. این آیتم کاملاً وابسته به ساختار و نحوه اتصالات شبکه و تعداد شین‌های تزریق صفر می‌باشد.

جدول ۳-۴- بردار هزینه نصب و درجه مشاهده‌پذیری حاصل از نتیجه در شبکه ۱۴ شینه

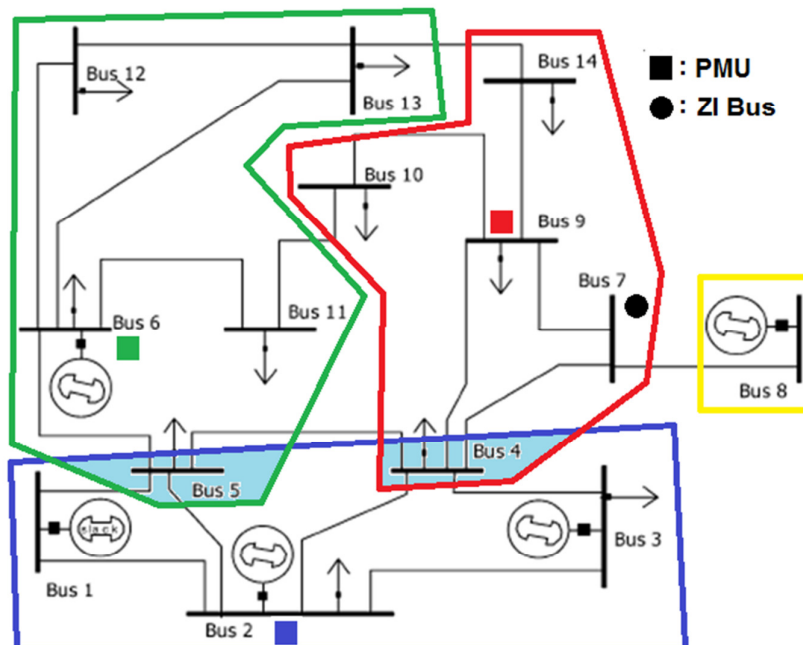
شماره شین	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
هزینه نصب	۱/۲	۱/۵	۱/۳	۱/۵	۱/۴	۱/۵	۱/۲	۱/۱	۱/۴	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
درجه مشاهده‌پذیری	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۴-۴- نتایج شبیه‌سازی در شرایط عملکرد نرمال بر روی شبکه ۱۴ شینه

ردیف	تعداد PMU	شماره شین‌ها	هزینه نصب (پربونیت)	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	نسبت تعداد PMU‌ها به تعداد شین‌ها (%)
۱	۳	۹، ۶، ۲	۴/۴	۱۵	۲۱/۴۳

شکل ۳-۴- نشان‌دهنده مکان بهینه نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه و شین‌های تحت

پوشش هر واحد و همچنین ناحیه همپوشانی دو یا چند واحد می‌باشد.



شکل ۳-۴- ناحیه تحت پوشش واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۱۴ شینه

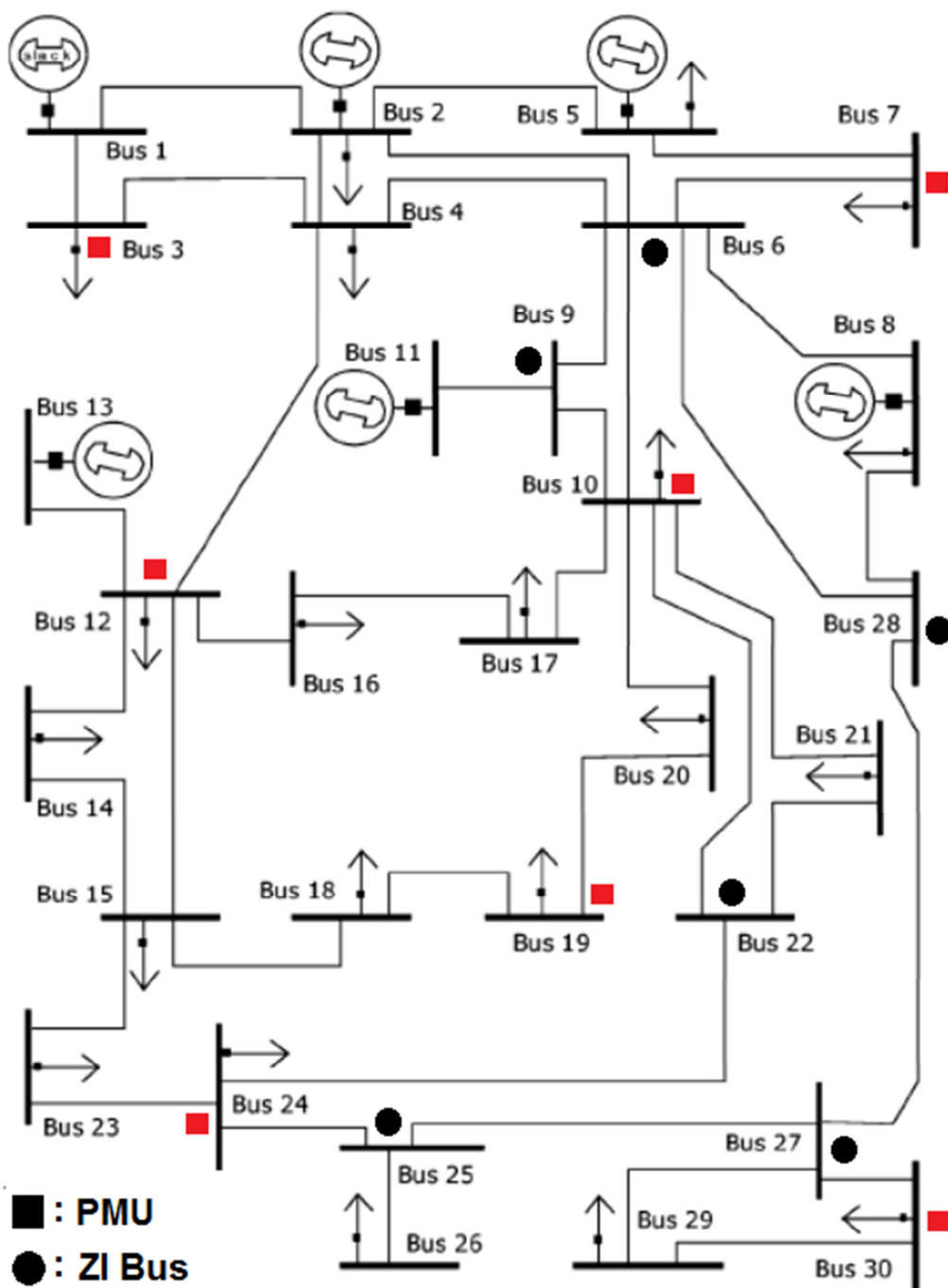
نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر روس شبکه استاندارد ۳۰ شینه نیز در جدول ۴-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵- نتایج شبیه‌سازی در شرایط عملکرد نرمال بر روی شبکه ۳۰ شینه

ردیف	تعداد PMU	شماره شین‌ها	هزینه نصب	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	نسبت تعداد PMU‌ها به تعداد شین‌ها (%)
۱	۷	۳، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۹، ۲۴، ۳۰	۹/۲	۳۰	۲۳/۳۳
۲	۷	۱، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۸، ۲۳، ۲۷	۹/۲	۳۰	۲۳/۳۳
۳	۷	۱، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۲۹	۹/۲	۲۹	۲۳/۳۳
۴	۷	۱، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۹، ۲۴، ۲۹	۹/۲	۲۹	۲۳/۳۳
۵	۷	۳، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۲۹	۹/۲	۲۹	۲۳/۳۳
۶	۷	۱، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۲۷	۹/۳	۳۱	۲۴/۳۳
۷	۷	۳، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۲۷	۹/۳	۳۱	۲۴/۳۳
۸	۷	۲، ۳، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۲۷	۹/۶	۳۳	۲۳/۳۳
۹	۷	۱، ۲، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۲۷	۹/۶	۳۳	۲۳/۳۳
۱۰	۷	۲، ۴، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۲۹	۹/۷	۳۳	۲۳/۳۳
۱۱	۷	۲، ۴، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۹، ۲۴، ۲۷	۹/۸	۳۵	۲۳/۳۳

با توجه به اینکه این معادلات در این پروژه با حل‌کننده‌های مختلفی حل شده است، جواب‌های مختلفی نیز بدست آمده ولی با توجه به اینکه هدف در این پروژه کمینه‌سازی هزینه نصب این تجهیزات در شبکه می‌باشد، چیدمانی مورد قبول است که دارای کمترین هزینه نصب باشد. در نتیجه مشاهده می‌شود که ردیف ۱ تا ۵ دارای کترین هزینه می‌باشند. برای انتخاب بین این گزینه‌ها نیز چیدمان با مجموع درجه مشاهده‌پذیری بیشتر مورد قبول می‌باشد که در این صورت هم ردیف ۱ و هم ۲ دارای این شرایط می‌باشند.

شکل ۴-۴ نشان‌دهنده محل نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور بر اساس نتیجه ردیف اول در شبکه استاندارد ۳۰ شینه می‌باشد.

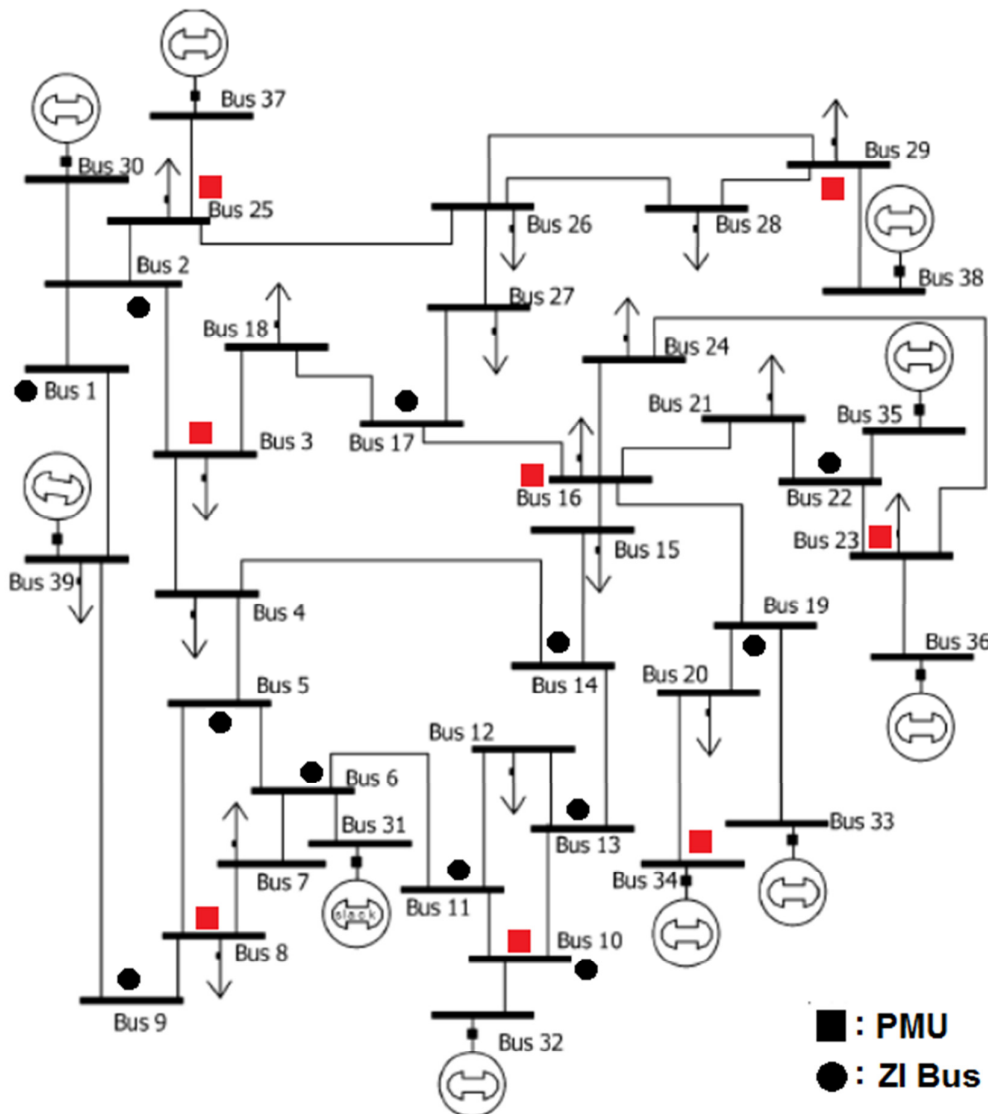


شکل ۴-۴- محل شین‌های تزریق صفر و نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۳۰ شینه

نتایج مشابه برای شبکه ۳۹ شینه در جدول ۴-۶ و شکل ۴-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۶- نتایج شبیه‌سازی در شرایط عملکرد نرمال بر روی شبکه ۳۹ شینه

ردیف	تعداد PMU	شماره شین‌ها	هزینه نصب	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	نسبت تعداد PMUها به تعداد شین‌ها (%)
۱	۸	۳، ۸، ۱۰، ۱۶، ۲۳، ۲۵، ۲۹، ۳۴	۱۰/۳	۳۲	۲۰/۵۱
۲	۸	۳، ۸، ۱۳، ۱۶، ۲۳، ۲۵، ۲۹، ۳۴	۱۰/۳	۳۲	۲۰/۵۱
۳	۸	۳، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۳، ۲۵، ۲۹، ۳۴	۱۰/۳	۳۱	۲۰/۵۱
۴	۸	۳، ۸، ۱۰، ۱۶، ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۹	۱۰/۴	۳۳	۲۰/۵۱
۵	۸	۳، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۹	۱۰/۴	۳۲	۲۰/۵۱



شکل ۴-۵- محل شین‌های تزریق صفر و نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۳۹ شینه

نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه ۵۷ شینه در جدول ۴-۷ و شکل ۴-۶ و برای شبکه ۱۱۸ شینه

در جدول ۴-۸ و شکل ۴-۷ آورده شده است.

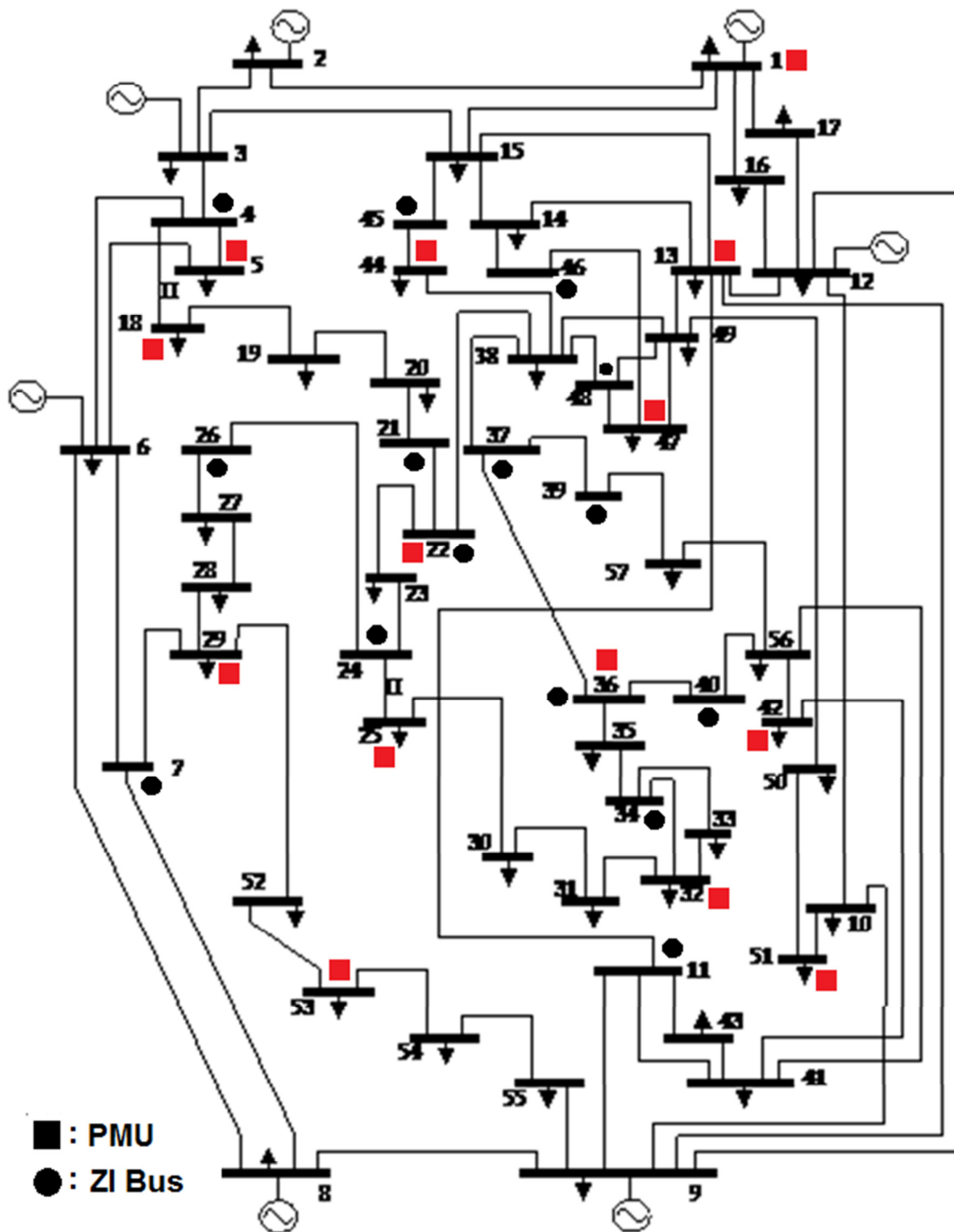
جدول ۴-۷- نتایج شبیه‌سازی در شرایط عملکرد نرمال بر روی شبکه ۵۷ شینه

ردیف	تعداد PMU	شماره شین‌ها	هزینه نصب	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	نسبت تعداد PMU ها به تعداد شین‌ها (%)
۱	۱۱	۱، ۴، ۱۳، ۲۰، ۲۵، ۲۹، ۳۲، ۳۸، ۵۱، ۵۴، ۵۶	۱۴/۷	۴۸	۱۹/۳
۲	۱۱	۱، ۶، ۱۳، ۱۹، ۲۵، ۲۹، ۳۲، ۳۸، ۵۱، ۵۴، ۵۶	۱۴/۹	۴۹	۱۹/۳

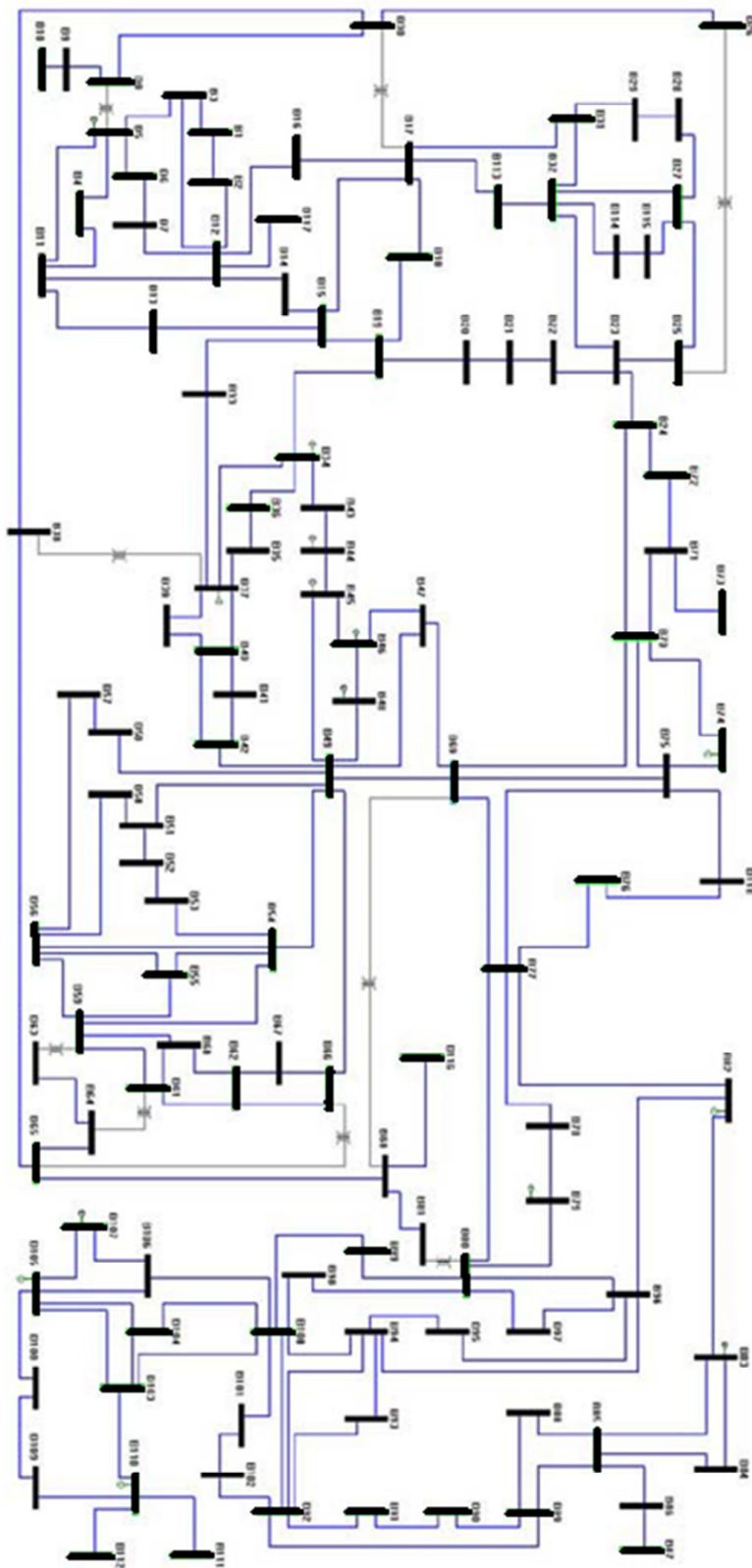
جدول ۴-۸- نتایج شبیه‌سازی در شرایط عملکرد نرمال بر روی شبکه ۱۱۸ شینه

ردیف	تعداد PMU	شماره شین‌ها	هزینه نصب	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	نسبت تعداد PMU ها به تعداد شین‌ها (%)
۱	۲۸	۱، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۲۱، ۲۵، ۲۸، ۳۴، ۴۰، ۴۵، ۴۹، ۵۲، ۵۶، ۶۲، ۶۵، ۷۲، ۷۵، ۷۷، ۸۰، ۸۵، ۸۷، ۹۱، ۹۴، ۱۰۲، ۱۰۵، ۱۱۰، ۱۱۴	۳۹/۴	۱۳۵	۲۳/۷۲
۲	۲۸	۱، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۲۰، ۲۳، ۲۹، ۳۴، ۴۰، ۴۵، ۴۹، ۵۳، ۵۶، ۶۲، ۶۵، ۷۳، ۷۵، ۷۷، ۸۰، ۸۵، ۸۷، ۹۱، ۹۴، ۱۰۲، ۱۰۵، ۱۱۰، ۱۱۵	۳۹/۴	۱۳۵	۲۳/۷۲
۳	۲۹	۱، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۲۰، ۲۳، ۲۸، ۳۵، ۴۰، ۴۳، ۴۶، ۵۰، ۵۲، ۵۶، ۶۲، ۶۴، ۷۳، ۷۵، ۷۷، ۸۰، ۸۵، ۸۷، ۹۱، ۹۴، ۱۰۲، ۱۰۵، ۱۱۰، ۱۱۴	۳۹/۴	۱۲۸	۲۴/۵۷
۴	۲۹	۱، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۲۰، ۲۳، ۲۹، ۳۵، ۴۰، ۴۳، ۴۶، ۵۰، ۵۲، ۵۶، ۶۲، ۶۴، ۷۳، ۷۵، ۷۷، ۸۰، ۸۵، ۸۷، ۹۱، ۹۴، ۱۰۲، ۱۰۵، ۱۱۰، ۱۱۵	۳۹/۷	۱۳۰	۲۴/۵۷
۵	۲۸	۳، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۷، ۲۱، ۲۳، ۲۴، ۲۸، ۳۴، ۴۰، ۴۵، ۴۹، ۵۲، ۵۶، ۶۲، ۶۴، ۷۵، ۷۷، ۸۰، ۸۵، ۸۷، ۹۱، ۹۴، ۱۰۲، ۱۰۵، ۱۱۰، ۱۱۴	۳۹/۹	۱۴۰	۲۳/۷۲

۲۳/۷۲	۱۴۱	۴۰/۱	.۲۸، .۲۳، .۲۰، .۱۷، .۱۵، .۱۲، .۹، .۳ .۶۴، .۶۲، .۵۶، .۵۲، .۴۹، .۴۵، .۴۰، .۳۴ .۹۴، .۹۰، .۸۶، .۸۵، .۸۰، .۷۷، .۷۵، .۷۱ ۱۱۴، .۱۱۰، .۱۰۵، .۱۰۱	۲۸	۶
۲۳/۷۲	۱۴۱	۴۰/۱	.۲۹، .۲۵، .۲۱، .۱۷، .۱۲، .۱۱، .۹، .۳ .۶۲، .۵۶، .۵۳، .۴۹، .۴۵، .۴۰، .۳۷، .۳۴ .۹۴، .۹۰، .۸۶، .۸۵، .۸۰، .۷۷، .۷۵، .۷۲ ۱۱۴، .۱۱۰، .۱۰۵، .۱۰۱	۲۸	۷
۲۳/۷۲	۱۴۲	۴۰/۲	.۲۹، .۲۳، .۲۱، .۱۷، .۱۵، .۱۲، .۸، .۳ .۶۴، .۶۲، .۵۶، .۵۳، .۴۹، .۴۵، .۴۰، .۳۴ .۹۴، .۹۰، .۸۶، .۸۵، .۸۰، .۷۷، .۷۵، .۷۱ ۱۱۵، .۱۱۰، .۱۰۵، .۱۰۲	۲۸	۸
۲۳/۷۲	۱۴۱	۴۰/۲	.۲۸، .۲۳، .۲۱، .۱۷، .۱۵، .۱۲، .۹، .۳ .۶۵، .۶۲، .۵۶، .۵۲، .۴۹، .۴۵، .۴۰، .۳۴ .۹۴، .۹۰، .۸۷، .۸۵، .۸۰، .۷۷، .۷۵، .۷۱ ۱۱۵، .۱۱۰، .۱۰۵، .۱۰۱	۲۸	۹
۲۳/۷۲	۱۴۰	۴۰/۲	.۲۸، .۲۳، .۲۱، .۱۷، .۱۵، .۱۲، .۹، .۳ .۶۵، .۶۲، .۵۶، .۵۲، .۴۹، .۴۵، .۴۰، .۳۴ .۹۴، .۹۰، .۸۷، .۸۵، .۸۰، .۷۷، .۷۵، .۷۲ ۱۱۴، .۱۱۰، .۱۰۵، .۱۰۱	۲۸	۱۰
۲۳/۷۲	۱۴۲	۴۰/۳	.۲۸، .۲۳، .۲۰، .۱۷، .۱۵، .۱۲، .۸، .۳ .۶۴، .۶۲، .۵۶، .۵۲، .۴۹، .۴۵، .۴۰، .۳۴ .۹۴، .۹۰، .۸۶، .۸۵، .۸۰، .۷۷، .۷۵، .۷۱ ۱۱۴، .۱۱۰، .۱۰۵، .۱۰۱	۲۸	۱۱



شکل ۴-۶- محل شین‌های تزریق صفر و نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۵۷ شینه



شکل ۴-۷- محل شین‌های تزریق صفر و نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه ۱۱۸ شینه

در جدول ۴-۹ مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده در این پروژه و سایر مقالات بر روی شبکه‌های استاندارد آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، پاسخ‌های بدست آمده در این پروژه برابر با کمترین تعداد واحد اندازه‌گیری فازور در سایر مقالات می‌باشد. علاوه بر این زمان اجرای برنامه نوشته شده در این پروژه بر روی شبکه ۱۱۸ شینه کمتر از ۲ ثانیه بوده که نسبت به سایر روش‌ها، بخصوص روش‌های بهینه‌سازی هوشمند بسیار سریع‌تر می‌باشد. همچنین این برنامه قابل اجرا بر روی شبکه‌های بسیار بزرگتر با حتی بیش از ۲۰۰۰ شین نیز می‌باشد، با وجود اینکه برخی از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند، به علت حجم بالای محاسبات و نیاز به پردازش بالا بر روی کامپیوترهای معمولی قابل اجرا نمی‌باشند.

جدول ۴-۹- مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نتایج سایر مقالات

شماره مرجع	روش حل	شبکه ۱۴ شینه	شبکه ۳۰ شینه	شبکه ۳۹ شینه	شبکه ۵۷ شینه	شبکه ۱۱۸ شینه
روش پیشنهادی	برنامه‌ریزی عددی	۳	۷	۸	۱۱	۲۸
[۱۱]	الگوریتم ژنتیک	۳	۷	۹	۱۲	۲۹
[۱۳]	سرد کردن فلزات	۳	-	۸	-	۲۹
[۱۴]	برنامه‌ریزی عددی	۳	۷	۸	۱۱	۲۸
[۱۵]	برنامه‌ریزی عددی	۳	-	-	۱۲	۲۹
[۱۶]	برنامه‌ریزی عددی	۳	۷	-	۱۱	-
[۱۷]	برنامه‌ریزی عددی	۳	۷	۸	۱۲	۲۸
[۱۸]	برنامه‌ریزی عددی	۳	۷	-	۱۳	۲۹
[۱۹]	برنامه‌ریزی عددی	۳	-	-	۱۲	۲۹
[۲۰]	برنامه‌ریزی عددی	۳	-	-	۱۲	۲۹
[۲۲]	الگوریتم ژنتیک	۳	۷	-	۱۲	۲۹
[۲۳]	الگوریتم ایمنی ژنتیک	۳	۷	-	۱۱	۲۸
[۲۵]	ذرات پراکنده	۳	۷	۸	۱۱	۲۸
[۲۶]	ذرات پراکنده	۳	۷	-	۱۱	۲۸
[۲۷]	ذرات پراکنده	۳	۷	-	۱۳	۲۹
[۳۱]	انفجار نارنجک	۳	۷	۸	۱۲	-
[۳۳]	جستجوی تابو	۳	-	۱۰	۱۳	-
[۳۵]	برنامه‌ریزی عددی	۳	-	-	۱۴	۲۹

نکته دیگر، تنوع جواب‌های بدست آمده در این پروژه می‌باشد که با وجود اینکه جواب‌های این پروژه با جواب برخی دیگر از مقالات که حتی با روش‌های مشابه مسئله بهینه‌سازی را حل نموده‌اند برابر بوده، ولی با توجه به تنوع در تعداد الگوریتم‌های حل کننده و در نتیجه تنوع در تعداد پاسخ‌های صحیح و در نظر گرفتن هزینه، از این الگوریتم جواب‌های مناسب‌تری با هزینه کم‌تری بدست آمده است.

۴-۴- نتایج شبیه‌سازی روش برنامه ریزی عددی در شرایط از دست رفتن یک واحد یا

یک خط

در این بخش احتمال از دست رفتن یک واحد اندازه‌گیری و یا یک خط انتقال در شبکه مطابق با روش ارائه شده در فصل قبل بررسی شده و نتایج آن ارائه شده است.

جدول ۴-۱۰ تا ۴-۱۴ بترتیب نشان‌دهنده پاسخ‌های بدست آمده برای شبکه ۱۴، ۳۰، ۳۹، ۵۷

و ۱۱۸ شینه می‌باشد.

جدول ۴-۱۰- نتایج شبیه‌سازی در شرایط بروز خطا بر روی شبکه ۱۴ شینه

ردیف	تعداد PMU	شماره شین‌ها	هزینه نصب	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	نسبت تعداد PMUها به تعداد شین‌ها (%)
۱	۷	۱، ۲، ۴، ۶، ۹، ۱۰، ۱۳	۹/۵	۳۱	۵۰
۲	۷	۲، ۴، ۵، ۶، ۹، ۱۱، ۱۳	۹/۷	۳۳	۵۰
۳	۷	۲، ۴، ۵، ۶، ۹، ۱۰، ۱۳	۹/۷	۳۳	۵۰

جدول ۴-۱۱- نتایج شبیه‌سازی در شرایط بروز خطا بر روی شبکه ۳۰ شینه

ردیف	تعداد PMU	شماره شین‌ها	هزینه نصب	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	نسبت تعداد PMUها به تعداد شین‌ها (%)
۱	۱۴	۱، ۲، ۳، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۴، ۲۷، ۳۰	۱۸/۱	۵۵	۴۶/۶۶
۲	۱۴	۱، ۲، ۴، ۵، ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۴، ۲۷، ۲۹	۱۸/۳	۵۷	۴۶/۶۶

۴۶/۶۶	۵۷	۱۸/۴	۱۷، ۱۵، ۱۳، ۱۲، ۱۰، ۵، ۴، ۲، ۱ ۲۹، ۲۷، ۲۴، ۱۹، ۱۸	۱۴	۳
-------	----	------	--	----	---

جدول ۴-۱۲- نتایج شبیه‌سازی در شرایط بروز خطا بر روی شبکه ۳۹ شینه

نسبت تعداد PMU ها به تعداد شین‌ها (%)	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	هزینه نصب	شماره شین‌ها	تعداد PMU	ردیف
۴۱/۰۲	۶۴	۲۰/۱	۱۸، ۱۶، ۱۳، ۱۰، ۹، ۸، ۶، ۴، ۱ ۲۹، ۲۶، ۲۵، ۲۳، ۲۲، ۲۰، ۱۹	۱۶	۱

جدول ۴-۱۳- نتایج شبیه‌سازی در شرایط بروز خطا بر روی شبکه ۵۷ شینه

نسبت تعداد PMU ها به تعداد شین‌ها (%)	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	هزینه نصب	شماره شین‌ها	تعداد PMU	ردیف
۴۳/۸۶	۹۹	۳۲	۲۲، ۱۹، ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۹، ۶، ۲، ۱ ۳۶، ۳۳، ۳۲، ۳۰، ۲۹، ۲۸، ۲۵، ۲۳ ۵۶، ۵۴، ۵۳، ۵۱، ۵۰، ۴۶، ۴۱، ۳۸	۲۵	۱
۴۳/۸۶	۱۰۰	۳۲/۶	۲۲، ۱۹، ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۹، ۶، ۲، ۱ ۳۶، ۳۳، ۳۲، ۳۰، ۲۹، ۲۷، ۲۵، ۲۴ ۵۶، ۵۴، ۵۳، ۵۱، ۵۰، ۴۶، ۴۱، ۳۸	۲۵	۲
۴۳/۸۶	۱۰۱	۳۲/۷	۲۲، ۲۰، ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۹، ۶، ۳، ۱ ۳۶، ۳۳، ۳۲، ۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۷، ۲۴ ۵۶، ۵۴، ۵۳، ۵۱، ۵۰، ۴۶، ۴۱، ۳۸	۲۵	۳

جدول ۴-۱۴- نتایج شبیه‌سازی در شرایط بروز خطا بر روی شبکه ۱۱۸ شینه

نسبت تعداد PMU ها به تعداد شین‌ها (%)	مجموع درجه مشاهده‌پذیری شین‌ها	هزینه نصب	شماره شین‌ها	تعداد PMU	ردیف
۵۰/۸۴	۲۶۸	۸۲/۵	۱۷، ۱۵، ۱۳، ۱۲، ۹، ۸، ۷، ۳، ۱ ۳۲، ۲۹، ۲۸، ۲۷، ۲۳، ۲۱، ۲۰، ۱۹ ۴۹، ۴۶، ۴۵، ۴۳، ۴۱، ۴۰، ۳۵، ۳۴ ۶۵، ۶۲، ۵۹، ۵۸، ۵۶، ۵۳، ۵۲، ۵۰ ۸۴، ۸۰، ۷۸، ۷۷، ۷۵، ۷۱، ۷۰، ۶۶ ۹۶، ۹۴، ۹۲، ۹۱، ۸۹، ۸۷، ۸۶، ۸۵ ۱۱۰، ۱۰۸، ۱۰۶، ۱۰۵، ۱۰۲، ۱۰۰ ۱۱۸، ۱۱۷، ۱۱۵، ۱۱۲، ۱۱۱	۶۰	۱

۵۰/۸۴	۲۶۷	۸۲/۵	۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۳، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۲، ۳۴، ۳۵، ۴۰، ۴۱، ۴۳، ۴۵، ۴۶، ۴۹، ۵۲، ۵۳، ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۲، ۶۵، ۶۶، ۷۰، ۷۱، ۷۵، ۷۷، ۷۸، ۸۰، ۸۴، ۸۵، ۸۶، ۸۷، ۸۹، ۹۱، ۹۲، ۹۴، ۹۶، ۱۰۰، ۱۰۲، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۰۸، ۱۱۰، ۱۱۱، ۱۱۲، ۱۱۵، ۱۱۷، ۱۱۸	۶۰	۲
۵۰/۸۴	۲۶۷	۸۲/۵	۱، ۳، ۷، ۸، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۲، ۳۴، ۳۵، ۴۰، ۴۱، ۴۳، ۴۵، ۴۶، ۴۹، ۵۰، ۵۲، ۵۳، ۵۶، ۵۸، ۵۹، ۶۲، ۶۵، ۶۶، ۷۰، ۷۱، ۷۵، ۷۷، ۷۸، ۸۰، ۸۴، ۸۵، ۸۶، ۸۷، ۸۹، ۹۱، ۹۲، ۹۴، ۹۶، ۱۰۰، ۱۰۲، ۱۰۵، ۱۰۷، ۱۰۸، ۱۱۰، ۱۱۱، ۱۱۲، ۱۱۴، ۱۱۷، ۱۱۸	۶۰	۳
۵۰/۸۴	۲۶۷	۸۲/۵	۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۳، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۲، ۳۴، ۳۵، ۴۰، ۴۱، ۴۳، ۴۵، ۴۶، ۴۹، ۵۰، ۵۲، ۵۳، ۵۶، ۵۸، ۵۹، ۶۲، ۶۵، ۶۶، ۷۰، ۷۱، ۷۵، ۷۷، ۷۸، ۸۰، ۸۴، ۸۵، ۸۶، ۸۷، ۸۹، ۹۱، ۹۲، ۹۴، ۹۶، ۱۰۰، ۱۰۲، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۰۸، ۱۱۰، ۱۱۱، ۱۱۲، ۱۱۴، ۱۱۷، ۱۱۸	۶۰	۴

با توجه به نتایج جدول ۴-۱۰ تا ۴-۱۴، برای حفظ رویت‌پذیری کامل شبکه‌های مورد مطالعه، در شرایط خروج یک واحد اندازه‌گیری و یا یک خط، در حدود ۴۵٪ شین‌های شبکه باید مجهز به این تجهیزات گردند. البته لازم به ذکر است که این نتایج با فرض امکان خروج شین‌های متصل به شبکه از طریق تنها یک خط به شبکه حاصل شده است و در صورت جدا شدن این شین‌ها، از مشاهده‌پذیری آنها صرف‌نظر می‌گردد. ولی در صورتی عدم این فرصت، حدود ۵۰٪ شین‌ها نیاز به این تجهیزات خواهند داشت.

جدول ۴-۱۵ مقایسه بین نتایج این پروژه با نتایج سایر مقالات می‌باشد. لازم به ذکر است که اکثر مقالات تنها احتمال خروج یک واحد اندازه‌گیری را در نظر گرفته‌اند و تنها دو مرجع [۱۴ و ۳۷] امکان وقوع این دو خطا را بطور همزمان بررسی کرده‌اند.

جدول ۴-۹- مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نتایج سایر مقالات

سیستم IEEE	روش پیشنهادی	[۱۴]	[۳۷]
۱۴ شینه	۷	۷	۷
۳۰ شینه	۱۴	۱۵	۱۵
۳۹ شینه	۱۶	۱۸	۱۷
۵۷ شینه	۲۵	۲۵	۲۲
۱۱۸ شینه	۶۰	-	۶۲

همانطور که مشاهده می‌شود، مقایسه این نتایج با روش‌های بیان شده در مقالات دیگر نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی در دستیابی به پاسخ بهینه مسئله جابجایی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور می‌باشد. لازم به ذکر است که زمان اجرای برنامه بر روی شبکه ۱۱۸ شینه در حدود ۲ ثانیه بوده که این امر بیانگر امکان استفاده از این روش برای تخمین حالت شبکه به صورت به‌هنگام می‌باشد. همچنین این الگوریتم به سادگی قابلیت اجرا بر روی شبکه‌های بسیار بزرگتر را نیز دارد.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

ادامه کار

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، مفاهیم رویت‌پذیری شبکه‌های قدرت با حضور واحدهای اندازه‌گیری فازور بررسی شد و معادلات مربوط به آن با روش جدید ارائه شده در این پروژه به صورت مجموعه‌ای از معادلات و نامعادلات خطی فرمول‌بندی شده است. در این پروژه برای دستیابی به کلیه مزایای استفاده از PMU در شبکه‌های قدرت، مانند پایش دائم و زمان‌واقعی شبکه، از وجود تجهیزات اندازه‌گیری معمولی زیر مجموعه سیستم SCADA صرف‌نظر شده است، ولی شین‌های بدون بار و ژنراتور به عنوان شین تزریق صفر در نظر گرفته شده و مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور با وجود تنها شین‌های تزریق صفر فرمول‌بندی و حل شده است. نکته دیگر در نظر گرفتن احتمال از دست رفتن یک واحد و یا خروج یک خط از شبکه می‌باشد، به طوریکه در صورت بروز یکی از این دو خط، کل شبکه کماکان مشاهده‌پذیر باقی بماند.

همچنین برای نصب این تجهیزات بر روی هر شین، هزینه متفاوتی در نظر گرفته شده و در نهایت هدف این پایان‌نامه، بر خلاف هدف سایر پروژه‌های مشابه که کمینه کردن تعداد تجهیزات می‌باشد، کمینه کردن هزینه نهایی نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور و یافتن محل نصب این تجهیزات در شبکه به منظور مشاهده‌پذیری کل سیستم است.

در ادامه، فرمول‌های بدست آمده در بخش قبل، به دو روش مختلف حل شده و نتیجه نهایی مسئله جایابی بهینه بدست می‌آید. روش اول بر اساس جستجوی کل فضای حالت بوده، به صورتی که تمامی حالات ممکن قرار گرفتن واحدهای اندازه‌گیری فازور بدست آمده و سپس تمامی این حالات به ترتیب بررسی شده و پاسخ‌های ارضا کننده قیود به عنوان پاسخ صحیح انتخاب می‌شود. در نهایت از بین این پاسخ‌ها، بهترین پاسخ با کمترین هزینه به عنوان جواب نهایی انتخاب می‌شود. در روش دوم نیز معادلات بدست آمده با روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط به کمک نرم‌افزار قدرتمند GAMS با چندین الگوریتم حل‌کننده مختلف حل می‌شود.

برای نمایش عملکرد روش ارائه شده و ارزیابی آن، الگوریتم نوشته شده بر روی چندین شبکه تست IEEE اعمال شده و نتایج بدست آمده با نتایج سایر مقالات مقایسه و بررسی گردید. در این بررسی اولاً تعداد PMU مورد نیاز برای مشاهده‌پذیری کل شبکه برابر با کمترین تعداد بدست آمده در سایر مقالات بوده و همچنین با توجه به تنوع پاسخ‌های بدست آمده در این روش و در نظر گرفتن آیت‌م هزینه نصب، چیدمان با کمترین هزینه به عنوان پاسخ نهایی انتخاب شده که در مقایسه با سایر مقالات، پاسخ مناسب‌تری حاصل گردید.

۵-۲- پیشنهاد ادامه کار

در راستای ادامه این تحقیق می‌توان دو پیشنهاد زیر را ارائه نمود:

- ۱- با توجه به اینکه روش جستجوی دودویی فراگیر تمامی پاسخ‌های ممکن را از بین تمامی چیدمان‌های مختلف استخراج می‌نماید ولی حجم محاسبات آن بسیار بالا می‌باشد، در صورت وجود ابررایانه‌های بسیار قوی، می‌توان از این روش به عنوان بهترین روش برای رسیدن به جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور استفاده نمود.
- ۲- دیگر اینکه با توجه به اهمیت پایش دائمی کل شبکه الکتریکی و افزایش کیفیت انرژی الکتریکی مشترکین، می‌توان راه‌کاری برای استفاده فراگیر از این تجهیزات در سطح فوق‌توزیع و توزیع و جایابی آن در شبکه ارائه نمود.

پیوست الف

الگوریتم CPLEX

الف - ۱ - مقدمه

الگوریتم CPLEX روشی برای حل مسائل خطی است. این الگوریتم قادر است مسائل بهینه سازی شبکه^{۵۸} را که نوع خاصی از مسائل برنامه ریزی خطی هستند با سرعت بسیار بالایی حل کند. علاوه بر این مسائل بهینه سازی درجه دو با تابع هدف خطی و همچنین مسائل عدد صحیح مخلوط خطی با این الگوریتم قابل حل است. این روش قابلیت های بسیاری دارد. از جمله این قابلیت ها می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- قابلیت پیش پردازش برنامه های پیچیده
- توانایی خواندن و نوشتن پارامترها و متغیرها
- انجام فرایندهای کنترلی و تصمیم گیری
- قابلیت اصلاح متقابل در طول پیشبرد فرایند تصمیم گیری منطقی
- شروع مجدد از یک پاسخ اولیه به شکل کارا و موثر
- قابلیت انجام آنالیز حساسیت
- قابلیت بکارگیری روش های تعیین مسائل نشدنی^{۵۹}

در سال ۱۹۹۲ اولین نسخه از الگوریتم CPLEX 2.0 تهیه و تنظیم شد. این الگوریتم ترکیبی از روش شاخه و کران و صفحات برش بود. با ترکیب این دو روش جستجو در فضای ممکن پاسخ سریعتر به جواب ممکن همگرا می شود زیرا با اضافه کردن قید به مساله در روش صفحات برش فضای ممکن محدود شده و در حقیقت بزرگی مساله کاهش می یابد و رسیدن به جواب ممکن سریعتر می شود.

در سال ۱۹۹۸ نسخه کامل تری از الگوریتم به نام CPLEX 6.0 تهیه شد. در این الگوریتم علاوه بر استفاده از دو روش شاخه و کران و همچنین صفحات برش، برای حرکت در میان گره های درخت جستجو به شکل بهینه و تصمیم گیری در انتخاب گره مناسب از روش های هوشمند کمک

⁵⁸ Network Flow

⁵⁹ Infeasible

گرفته شده است مضاف بر این در هر گره، هنگامی که مساله به یک بهینه سازی خطی تبدیل می شود، از روش بسیار قوی سیمپلکس دوگان استفاده شده است.

سرعت این الگوریتم بسیار بالاست و همچنین در رنج خطای قابل قبول به جواب بهینه می رسد زیرا در هر گره انتخابی یک مساله خطی را با روش سیمپلکس حل می کند و این الگوریتم در صورتی که مساله دارای پاسخ باشد همیشه به جواب بهینه همگرا می شود.

الگوریتم CPLEX را بر مبنای نوع مساله می توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد.

- بهینه ساز سیمپلکس^{۶۰}

بهینه ساز تعریف مانع^{۶۱}

بهینه ساز عدد صحیح مخلوط^{۶۲}

در ادامه معرفی مختصری از هر یک آورده شده است.

الف-۲- بهینه ساز سیمپلکس

مسائل بهینه سازی خطی و یا درجه دو با وجود میلیون ها قید و متغیر پیوسته با سرعت بالایی با این روش حل می شود. این روش کاربرد مقاومی از سیمپلکس اولیه و دوگان است. مسائل بهینه سازی شبکه و همچنین مسائلی با قیدهای جهت دار نیز با این الگوریتم قابل حل هستند. بکارگیری روش صفحات برش در کاهش بزرگی مساله و افزایش سرعت الگوریتم موثر است. خصوصیات برجسته این الگوریتم سیمپلکس را می توان مطابق زیر ذکر کرد.

- الگوریتم سریع اولیه و دوگان

- تشخیص نشدنی بودن مساله

⁶⁰ Cplex Simplex Optimizer

⁶¹ Cplex Barrier Optimizer

⁶² Cplex Mixed Integer Optimizer

- قدرت تجزیه تحلیل پیشرفته
- شروع موثر از یک پاسخ اولیه
- الگوریتم کاهش ابعاد مساله به کمک پردازش پیشین و پسین آن
- خصوصیت الگوریتم شبکه
- تعریف گره ها و شاخه های شبکه
- استخراج شبکه به شکل اتوماتیک
- شروع موثر الگوریتم از یک شبکه اولیه

الف-۳- بهینه ساز تعریف مانع

نوع خاصی از الگوریتم سیمپلکس است که توانایی حل مساله خطی و درجه دو با ابعاد زیاد را دارد. این الگوریتم به کمک روش صفحات برش پیش پردازشی انجام می دهد. این روش ابعاد سیستم را کاهش می دهد و سرعت حل مساله را بالا می برد. این الگوریتم برای شروع نیاز به یک پاسخ اولیه دارد. این پاسخ به کمک روش سیمپلکس محاسبه می شود و در آنالیز حساسیت نیز بکار می رود.

ویژگی هایی که این الگوریتم را متمایز می کند:

- تعیین پاسخ اولیه برای شروع الگوریتم
- کاهش ابعاد مساله به کمک پردازش پیشین و پسین آن
- قابلیت همراه شدن با دیگر روش های بهینه سازی
- قابلیت اعمال بر روی مسائل عدد صحیح مخلوط
- ۳-۲-۵ بهینه ساز عدد صحیح مخلوط

این الگوریتم از روش بهینه سازی شاخه و کران استفاده می کند و با بکارگیری روش صفحات برش سرعت الگوریتم را بالا می برد. نحوه شاخه زنی روش شاخه و کران در این الگوریتم قابل تغییر است. مسائل خطی عدد صحیح مخلوط و همچنین مسائل درجه دوم عدد صحیح مخلوط با این روش

حل می شوند. برای افزایش سرعت الگوریتم و حذف بخش های اضافی فضای ممکن جواب، پنج نوع مختلف از روش های صفحات برش بکارگرفته شده است که می توان به روش برش گوموری^{۶۳}، برش خوشه و کران^{۶۴}، روش گردشی^{۶۵}، روش گاب^{۶۶} و کران ضمنی^{۶۷} اشاره کرد. بدنه اصلی الگوریتم را درخت جستجو تشکیل می دهد. این درخت در روش شاخه و کران تنظیم می گردد. در تشکیل این درخت استراتژی های خاصی برای انتخاب متغیرها^{۶۸} و همچنین انتخاب گره های^{۶۹} واقع در درخت جهت حل مساله خطی در آن گره بکار گرفته می شود. این الگوریتم برای دستیابی به جواب ممکن عدد صحیح و حرکت میان گره های درخت از روش های هوشمند نیز استفاده می کند.

عملکرد ویژه این الگوریتم را می توان به شکل زیر بیان کرد:

- بکارگیری روش های برش مختلف شامل روش گوموری، روش گردشی، روش گاب، کران ضمنی، رند کردن ترکیبی عدد صحیح^{۷۰}، مسیرهای ترتیبی^{۷۱}، روش انفصال^{۷۲}، روش خوشه ای
- دستیابی به پاسخ بهینه
- بکارگیری روشهای هوشمند
- کاهش ابعاد مساله به کمک پردازش پیشین و پسین آن
- امکان انتخاب گره های درخت به کمک روش های عمقی و عرضی
- امکان انتخاب متغیرها
- تعیین اولویت جهت شاخه زنی

⁶³ Goory cut

⁶⁴ Clique and cover

⁶⁵ Flow cover

⁶⁶ Gub cover

⁶⁷ Implied bound

⁶⁸ Variable selection strategies

⁶⁹ Node selection strategies

⁷⁰ Mixed Integer rounding

⁷¹ Flow paths

⁷² Disjunctive

- بکارگیری الگوریتم سیمپلکس برای حل مساله خطی و آرام سازی اولیه
- بکارگیری روش ها و تکنیک های قطع شاخه
- گمانه زنی در مورد مقادیری که متغیرها قادرند به خود بگیرند^{۷۳}

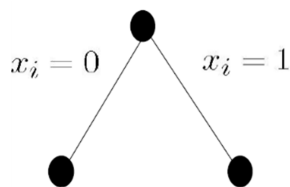
با این آشنایی مختصر نسبت به الگوریتم CPLEX به عنوان یک روش ترکیبی، نوبت به معرفی الگوریتم بکار رفته در این پروژه می رسد.

الف-۴- الگوریتم ترکیبی CPLEX بکار گرفته شده در پروژه

روش بکار گرفته شده در این پروژه روشی حاصل از ترکیب روش شاخه-کران، صفحات برش، سیمپلکس اولیه و دوگان و روش هوشمند است. جهت وضوح بیشتر توضیح مختصری در مورد هر یک در ادامه آورده شده است.

روش شاخه و کران

این روش یک الگوریتم کلاسیک و کاملاً مناسب برای حل مسائل با متغیرهای گسسته است. آنچه که در این پروژه اهمیت دارد مسائل عدد صحیح مخلوط با متغیر گسسته باینری است. این روش هنگام حل مساله ابتدا یکی از متغیرهای گسسته را انتخاب کرده و یکبار به آن مقدار صفر و بار دیگر مقدار یک را اختصاص می دهد و در هر مورد بقیه متغیرهای گسسته را آزاد فرض می کند. در واقع اولین مرحله از شاخه زنی را آغاز می کند. شکل ۱ اولین مرحله از تشکیل درخت جستجو را نشان می دهد.

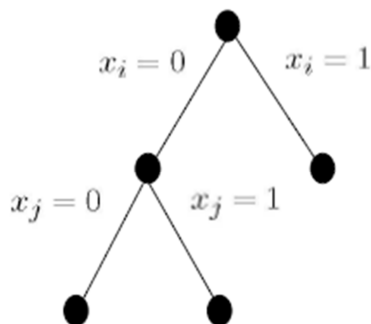


شکل ۱- اولین مرحله شاخه زنی

⁷³ Probing

سپس در هر یک از گره های درخت یک مساله برنامه ریزی خطی^{۷۴} حل می شود. مقدار تابع هدف بدست آمده پس از حل مساله خطی به عنوان یک کران بالا جهت مقایسه مقادیر تابع هدف در گره های دیگر، ذخیره می شود. پس از اینکه مساله برنامه ریزی خطی حل شد ممکن است مقادیر بدست آمده برای دیگر متغیرهای گسسته عددی باینری باشد و یا خیر. اگر مجموعه جواب مربوط به متغیرهای گسسته همگی اعداد صفر و یا یک بود که جواب شدنی است فقط بهینه بودن آن مورد سوال است و مقدار تابع هدف باید جایگزین مقدار فرضی اولیه شود.

در غیر این صورت می بایست به فرایند شاخه زنی ادامه داد. در هر یک از گره های انتهایی متغیر گسسته دیگری را انتخاب کرده و در یک شاخه به آن مقدار یک و در شاخه دیگر مقدار صفر را اختصاص داد. شکل ۲ چگونگی شاخه زنی در لایه دوم از درخت جستجو را نشان می دهد.



شکل ۲- شاخه زنی در لایه دوم درخت

البته در شکل ۲ در لایه دوم درخت فقط برای یک گره شاخه های درخت ادامه پیدا کرده است همین اتفاق عیناً برای گره دیگر این لایه نیز می بایست تکرار شود. مجدداً در هر یک از گره های انتهایی بدست آمده مساله برنامه ریزی خطی حل می شود و بنا به مقادیری که برای متغیرهای دیگر بدست می آید شدنی و یا نشدنی بودن پاسخ مشخص می شود، همچنین کران بالای پاسخ می تواند جایگزین شود. این عملیات تا انتها می تواند ادامه پیدا کند البته در این میان یک سری تصمیم گیری

⁷⁴ Linear Programming

های منطقی منجر به کوچک شدن ابعاد درخت می شود. مسلماً هر مرحله از شاخه زنی یک قید به مساله اضافه می شود زیرا در هر مرحله یکی از متغیرهای گسسته محدود به دو عدد صفر و یک می شود پس یک قید سنگین به مساله اضافه می گردد و لذا انتظار می رود مقدار تابع هدف محاسبه شده در هر گره نسبت به گره مرحله قبل مقدار بدتری به خود بگیرد. حال اگر در یک لایه از درخت مقدار تابع هدف یک گره بدتر از یک گره دیگر بود مسلماً در مراحل بعدی نیز بدتر می شود پس ادامه دادن در این شاخه بیهوده است پس اصطلاحاً آن شاخه قطع می شود و در واقع فرایند جستجو در ادامه این شاخه از درخت صورت نمی گیرد.

- عملیات شاخه زنی در فرایند تشکیل درخت جستجو شامل دو مرحله است:

- انتخاب متغیر

- انتخاب گره

در مرحله انتخاب متغیر در واقع به مقدار پیوسته ای که در حل مساله بهینه سازی خطی برای این متغیر بدست می آید توجه می شود. سپس مقدار صحیح و یا اصطلاحاً جزء صحیح آن را جدا کرده و به هنگام شاخه زنی دو قید به مساله اضافه می شود. یک شاخه با فرض کمتر بودن مقدار متغیر از جزء صحیح و شاخه دیگر با فرض بیشتر بودن مقدار متغیر از این مقدار تشکیل می شود.

مرحله انتخاب گره و اینکه در کدام گره مساله برنامه ریزی خطی حل شود مرحله ای پیچیده تر است و انواع متنوع تری دارد. هدف این مرحله پیدا کردن پاسخ شدنی مناسب و ایجاد بهبود در پاسخ زیر بهینه بدست آمده در مراحل جستجوی درخت است. روش هایی که در این مرحله مطرح می شود شامل موارد زیر هستند:

- روش ایستا^{۷۵}

- روش تخمین^{۷۶}

⁷⁵ Static

- روش دو فازی^{۷۷}

- روش بازگشتی^{۷۸}

روش ایستا خود شامل دو نوع انتخاب است.

۱- روش عرضی^{۷۹}

در این روش پس از یک مرحله شاخه زنی در درخت جستجو عملیات محاسبه مقدار تابع هدف و حل مساله برنامه ریزی خطی در گره های مربوط به همان لایه از درخت انجام می شود به این ترتیب در همگی مسائل برنامه ریزی خطی که در هر گره حل می شود یک قید مشابه مربوط به مقدار گسسته یک متغیر به مساله اضافه شده است.

این طریقه جستجو تعداد گره هایی که می بایست بررسی شوند را کم می کند اما به حجم حافظه زیادی نیاز دارد و زمان محاسباتی را بالا می برد.

۲- روش عمقی^{۸۰}

در این روش عملیات جستجو در یک شاخه و تا انتهای آن صورت می گیرد سپس نتایج آن با شاخه بعدی مقایسه می گردد.

این طریقه بررسی گره ها به حجم حافظه کمی نیاز دارد، زمان محاسباتی و بررسی گره ها را پایین می برد و همچنین شانس رسیدن به پاسخ شدنی و ممکن در این روش بالا است اما درخت جستجو در این طریقه بزرگ است.

⁷⁶ Estimated-based

⁷⁷ Two-Phase

⁷⁸ Back-tracking

⁷⁹ Breadth-first

⁸⁰ Depth-first

در روش تخمین پس از حل مساله برنامه ریزی خطی در یک گره، ممکن است پاسخ حاصله عدد صحیح نباشد. در این صورت تصمیم گیری برای اینکه کدام متغیر برای شاخه زنی انتخاب شود و یا به این متغیر عدد صفر و یا یک تخصیص داده شود با این روش انجام می شود. روش تخمین شامل دو نوع بهترین تصویر و بهترین تخمین است. هر یک از انواع معرفی شده خود دسته ای از فرمول های ریاضی را در بر می گیرند که از حوصله این بحث خارج است.

روش دو فازی سعی دارد در فاز اول پاسخی شدنی را پیدا کند و در فاز دوم میزان بهینگی این پاسخ را بهبود بخشد. معمولاً ترکیبی از روش عمقی و عرضی در این بخش مطرح می شود. در فاز اول جستجو به طریق عمقی صورت می گیرد و در فاز دوم به طریق عرضی گرهی با مقدار تابع هدف بهتر جستجو می شود. گاهی نیز در فاز اول از روش بهترین تخمین، گره مناسب و ممکن پیدا می شود و در فاز دوم با تعریف درصد خطا گره مناسب انتخاب می شود.

روش بازگشتی ابتدا جستجو را به طریق عمقی آغاز می کند و در اواسط کار اگر مقدار بهینه تابع هدف بدتر شد شاخه را قطع کرده و جستجو را به شکل عرضی پیگیری می کند.

برای بالا بردن سرعت فرایند حل مساله بهینه سازی دو مفهوم پیش پردازش مساله^{۸۱} و گمانه زنی^{۸۲} مطرح می شود. این دو مفهوم بسیار کلیدی هستند. عملیات پیش پردازش مساله خود سه مرحله دارد.

تشخیص نشدنی بودن مساله^{۸۳}: این بخش به قیود مساله نگاهی کلی دارد و در صورت تناقض هر یک از قیود با دیگر قیود مساله را غیر شدنی معرفی می کند. برای چنین مساله ای نیاز به تشکیل درخت و انجام عملیات جستجو نیست.

⁸¹ Preprocessing

⁸² Probing

⁸³ Detecting infeasibility

امکان سنجی کاهش محدوده تغییرات متغیرها^{۸۴}: بررسی دقیق تری بر روی کران های هر یک از متغیرها و همچنین دیگر قیود مساله گاهی این امکان را می دهد که بازه تعریف شده برای تغییرات متغیر را محدود تر کرده و در واقع با این کار می توان فضای ممکن پاسخ را به طرز مفیدی کوچک کرد.

بهبود بخشیدن به قیدها^{۸۵}: در بررسی قیدها گاهی مشخص می شود که تعریف برخی از قیود اضافی است در این حالت می توان این قیود را حذف کرد.

هدف اصلی از فرایند گمانه زنی در ابتدای فرایند حل مساله بررسی رفتار کلیه متغیرها در باند مجاز تغییرات آنهاست. در واقع این بخش امکان اینکه هر یک از متغیرها مقدار حداکثر و یا حداقل تعریف شده در مساله را به خود بگیرند، بررسی می کند. در واقع با کاهش و یا افزایش کلی هر یک از متغیرها و بررسی تغییرات مقدار تابع هدف در این فرایند امکان سنجی لازم صورت می گیرد و اصلاحات مورد نیاز انجام می شود. این بخش از کار شامل سه مرحله است:

- تخصیص مقدار ثابت به متغیر
 - بهبودی حاصله در ضریب عملکرد (به عنوان نمونه مقدار تابع هدف)
 - تصمیم گیری منطقی بر مبنای بهبودی مشاهده شده
- به این ترتیب در این قسمت روش شاخه-کران معرفی گردید. بخش های دیگر روش هایی را معرفی می کنند که با این روش ترکیب شده اند و عملکرد را بهبود بخشیده اند.

الف-۵- روش صفحات برش

این روش جهت افزایش سرعت و کاهش وسعت فضای ممکن پاسخ بکارگرفته شده است. عملکرد این روش به این گونه است که فضای ممکن جواب ها را در نظر می گیرد سپس با الگوریتم

⁸⁴ Detecting redundancy

⁸⁵ Improving bounds

های خاصی به مساله اصلی قید اضافه می کند. این قید بر اساس پارامترهای مختلفی در مساله با ضرایب خاص تعریف شده و به آن اضافه می شود و مجدداً این مساله حل می شود. روش صفحات برش پیشینه بسیار طولی دارد. در سال ۱۹۸۳ با معرفی مساله پایه کوله پشتی^{۸۶} و ایجاد مشابهت برخی مسائل با آن، روش کوله پشتی مطرح شد. روش گردشی در سال ۱۹۸۵ توسط پادبرگ^{۸۷}، روی^{۸۸} و ولسی^{۸۹} ارائه شد. رویکرد به این روش ها و تاثیر بسزایی که اضافه کردن قیود در طی مراحل پیشبرد الگوریتم بر سرعت و دقت الگوریتم داشت منجر به انجام فعالیت های بسزایی در این زمینه گردید. جدول ۱ به معرفی کلی این روش ها پرداخته است.

تشریح چگونگی تعریف قید در هر یک از این روش ها از حوصله این بخش خارج است. مرجع [۳۵] این مباحث ریاضی را به تفصیل شامل می شود. در الگوریتم بکار گرفته شده به هنگام پیشروی و جستجو میان گره های درخت انواع برش های معرفی شده در جدول بجز برش کوله پشتی، بکار گرفته شده است. با بکارگیری این برش ها و اضافه کردن قید به مساله خطی، برخی از شاخه های زاید درخت حذف شده و درخت جستجو کوچکتر شده و فرایند جستجو سریعتر صورت می گیرد.

جدول الف-۱- معرفی اجمالی انواع برش

نوع برش	سال ارائه روش	ارائه دهندگان
Knapsack Covers	۱۹۸۳	Crowder, Johnson, and Padberg
	۱۹۹۷	Weismantel
Cliques	۱۹۹۱	Johnson and Padberg
	۱۹۹۹	Atamturk, Nemhauser, and Savelsbergh
Flow Covers	۱۹۸۵	Padberg, Van Roy, and Wolsey
	۱۹۹۹	Gu, Nemhauser, and Savelsbergh
GUB Covers	۱۹۹۸	Gu, Nemhauser, and Savelsbergh

⁸⁶ Knapsack cover

⁸⁷ Padberg

⁸⁸ Van roy

⁸⁹ Wolsey

Implied Bounds	۱۹۹۱	Hoffman and Padberg
Gomory Fractional Cuts	۱۹۶۰	Gomory
	۱۹۹۶	Balas, Ceria, Cornuejols and Natraj
MIR (Mixed Integer Rounding)	۱۹۹۸	Marchand and Wolsey
Disjunctive Cuts	۱۹۷۱	Balas
	۱۹۹۳	Balas, Ceria, and Cornuejols

الف-۶- روش سیمپلکس

روش سیمپلکس یکی از روش های بسیار قوی در حل مسائل خطی است. این روش طی یک فرایند تکراری جواب بهینه مساله خطی را در صورت وجود حاصل می کند. در هر مرحله تکرار این روش مقدار بهینه یکی از متغیرها و همچنین مقدار تابع هدف در آن مرحله بدست می آید و به عنوان ورودی مرحله بعد الگوریتم در نظر گرفته می شود. مقدار تابع هدف در مراحل مختلف این الگوریتم جهت انجام آنالیز حساسیت و تعیین نرخ حساسیت مساله به هر یک از متغیرها مورد استفاده قرار می گیرد. روش سیمپلکس می تواند بر روی مساله اولیه و یا دوگان آن اعمال شود. در حل مسائل بهینه سازی خطی بهتر است ابتدا مساله دوگان از روی مساله اولیه ساخته شود سپس الگوریتم سیمپلکس بر روی آن اعمال شود. برای ساخت مساله دوگان به ازای هر قید یک پارامتر تعریف می شود. این پارامترها همان متغیرهای مساله دوگان هستند. از روی تابع هدف مساله اولیه قیدهای مساله دوگان تعریف می شود و از روی قیدهای مساله اولیه تابع هدف دوگان ساخته می شود. معمولاً ابعاد مساله دوگان کوچکتر از ابعاد مساله اولیه است. در الگوریتم بکارگرفته شده در پروژه هنگامی که در هر گره مساله به یک برنامه ریزی خطی تبدیل می شود، برای بدست آوردن جواب بهینه آن مساله و محاسبه تابع هدف در آن گره الگوریتم سیمپلکس دوگان بکار گرفته می شود و در صورت نشدنی بودن مساله دوگان الگوریتم سیمپلکس بر روی مساله اولیه اعمال می شود.

الف-۲- روش هوشمند

تا کنون درباره درخت جستجو و نحوه حرکت میان گره های آن مطالبی گفته شد. دیدیم که پس از انتخاب یک گره در حقیقت رشته باینری مربوط به حضور و یا عدم حضور واحدها در آن گره تعیین می شود و مساله به یک مساله خطی تبدیل خواهد شد. برای حل این مساله خطی روش سیمپلکس معرفی گردید. پس از حل مساله برنامه ریزی خطی در گره، ممکن است پاسخی که بدست می آید عدد صحیح نباشد در این صورت این جواب شدنی نخواهد بود. در این حالت بنا به روش شاخه و کران متغیر های گسسته ای که در گره مربوطه آزاد فرض شده اند و برای آنها مقدار عددی پیوسته بدست آمده بر مبنای مقدار اعشاری آنها به عدد صحیح گرد می شوند (اصطلاحاً آرام سازی^{۹۰} می شوند) و به این ترتیب شاخه جدید بوجود می آید. حال اگر در عمق بیشتر درخت این آرام سازی و اضافه کردن کران نتواند بهبودی حاصل کند و جهت گیری شاخه زنی را به سمت گره های درست هدایت کند آنگاه پیدا کردن جواب درست دشوار خواهد بود. در این مواقع بکار گرفتن یک جستجوی محلی بسیار مفید خواهد بود. روش جستجوی همسایگی بزرگ^{۹۱} یک روش هوشمند است که با حل یک زیر مساله عدد صحیح مخلوط همسایگی یک نقطه خاص را به دنبال نقطه بهتر جستجو می کند. زیر مساله نام برده با تثبیت مقادیر برخی از متغیرهای عدد صحیح و همچنین با اضافه کردن قید به مساله بوجود می آید. این زیر مساله نسبت به مساله اصلی آسان تر حل می شود و انتظار می رود جواب بهتری نیز داشته باشد. روش جستجوی همسایگی بزرگ بر چهار نوع مختلف است که همگی این الگوریتم ها به اتفاق از یک جواب ممکن شروع می شوند. در ادامه به اختصار این الگوریتم ها معرفی شده اند. مرجع به طور کاملتر به این موضوع پرداخته است.

⁹⁰ Relaxation⁹¹ Large Neighborhood Search

الگوریتم شاخه زنی محلی^{۹۲}: در این روش قیدی بر مبنای فاصله تغییرات مجاز برخی متغیرها به مساله اضافه می شود و تنها به برخی متغیرها اجازه داده می شود مقداری متفاوت با تکرار قبل به خود بگیرند.

الگوریتم جستجوی همسایگی کوچک شده و آرام سازی شده^{۹۳} RINS: این روش متغیرهایی که در گره مربوطه بر مبنای قرارداد تشکیل درخت به شکل عدد صحیح تعریف شده اند را ثابت در نظر می گیرد.

الگوریتم تقاطعی^{۹۴}: در این روش متغیرهای عدد صحیحی که در چند تکرار مقدارشان تغییر نکرده است را ثابت فرض می کند.

الگوریتم جهشی^{۹۵}: این روش به طور رندم متغیرها را ثابت فرض می کند.

الگوریتم CPLEX در هر گره برای بهبود بخشیدن به پاسخ بدست آمده از روش هوشمند RINS استفاده می کند. این روش در هر گره جواب بدست آمده از روش سیمپلکس را به عنوان پاسخ اولیه استفاده می کند و در یک همسایگی از جواب جاری جهت پیدا کردن پاسخ بهتر به جستجو می پردازد. در واقع در آن گره متغیرهای قراردادی را در مقدار معینشان ثابت در نظر می گیرد و یک زیر مساله عدد صحیح مخلوط بوجود می آورد. این زیر مساله یک جواب نیمه کامل شده از مساله اصلی است که طی فرایند جستجوی محلی باید تکمیل شود. این زیر مساله عدد صحیح مخلوط نیز حل می شود و مجدداً یک پاسخ اولیه برای جستجو در یک همسایگی جدید را بوجود می آورد. این مراحل پیچیده تکرار می شود و معیار توقف این تکرار در یک گره می تواند زمان تعریف شود. به این ترتیب در طی فرایند جستجو ممکن است گره های نشدنی دیگری را نیز از لیست جستجو حذف کند و اصطلاحاً مسیر جستجو در بین شاخه ها را نیز به سمت گره هایی هدایت می کند که وضعیت بهتری

⁹² Locsl branching

⁹³ Relaxation Induced Neighborhood Search

⁹⁴ Crossover

⁹⁵ Mutation

نسبت به گره جاری دارند و همچنین در این راستا شاخه های اضافی بسیاری نیز قطع می شوند و درخت جستجو کوچک می شود.

در طی فرایند تعیین همسایگی دو نکته تاثیر گذار است. اولاً مرکز همسایگی کدام گره خواهد بود و ثانیاً طریقه گرد کردن متغیر های آزاد در نظر گرفته شده در آن گره به چه ترتیبی انجام خواهد شد. این دو نکته منجر به تعریف مناسبی از همسایگی در هر گره می شوند. اگر در یک گره الگوریتم RINS به طور کامل استفاده شود معلوم می شود آیا گره انتخاب شده برای اعمال الگوریتم می تواند با گرد کردن و آرام سازی به جواب درست برسد و آیا روش آرام سازی بکار رفته درست است یا خیر.

لازم به تذکر است که روش بکار گرفته شده در این پژوهش ترکیبی از چهار روش نام برده شده است البته در تمامی گره های درخت جستجو الگوریتم هوشمند RINS بکار گرفته نمی شود بلکه اگر در هنگام شاخه زنی و انتخاب یک گره آرام سازی و گرد کردن متغیرها در جهت رسیدن به گره بهتر صورت نگیرد، این روش مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

مراجع

- [1] K. E. Martin, J. R. Carroll, "Phasing in the Technology", IEEE power & energy magazine, Sep/Oct 2008.
- [۲] فیروزه رامشخواه، مهرداد عابدی و سید حسین حسینیان، "رویکردی نو در سیستم‌های کنترل و دیسپاچینگ شبکه قدرت ایران با استفاده از امکانات پایش و کنتررا فراگیر (WACS)", بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۷.
- [3] J. S. Thorp, A. Abur, M. Begovic, J. Giri, R. Avila-Rosales, "Gaining a Wider Perspective", IEEE power & energy magazine, Sep/Oct 2008.
- [4] A. G. Phadke, "The Wide World of Wide-Area Measurement" IEEE power & energy magazine, Sep/Oct 2008.
- [5] A. P. S. Meliopoulos, G. J. Cokkinides, F. Galvan, B. Fardanesh, P. Myrda, "Delivering Accurate and Timely Date to All", IEEE power & energy magazine, May/June 2007.
- [6] R. F. Nuqui, "State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements", PHD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, July 2001.
- [7] Consortium for Electric Reliability Technology Solution (CERTS), "Real Time Dynamic Monitoring System (RTDMS)", Available online at:
http://www.phasor-rtcms.com/Phasorconcept/Phasor_adv_faq.html
- [8] Power System Relaying Committee, "IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems", IEEE Std. C37 118™, 22 March 2006.
- [۹] وبسایت شرکت مهندسی گیتا زمین پردازش، فعال در زمینه های زمین شناسی، نقشه برداری و معدنی، قابل دسترسی به صورت آنلاین در: <http://geology-group.blogfa.com/post-16.aspx>

[۱۰] حامد مسگرزاد، سید محمد شهرتاش، "مکان‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور با حفظ

رویت‌پذیری در شرایط N-1 دستگاه‌های اندازه‌گیری"، PSC 2008.

[۱۱] بهنام محمدی ایواتلو، حسین مختاری، مصطفی پرنیانی، احمد صالحی دوبخشیری، "مکان‌یابی

بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری جهت مشاهده‌پذیری شبکه سراسری ایران"، PSC 2008.

[12] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", 2th Edition, John Willy & sons Inc. ,1996.

[13] T. L. Baldwin, L. Mili, M.B. Boisen, R. Adapa, "Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement", IEEE Transactions on Power System, 1993, pp.707-715.

[14] F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabadi and M. Shahidipour, "Contingency constrained PMU placement in power networks." IEEE Transaction on Power Systems, vol. 25, No. 1, pp. 516-523, February 2010.

[15] B. Gou, "Optimal placement of PMUs by integer linear programming," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1525-1526, August 2008.

[16] B. Gou, "generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement," IEEE Transaction on Powr Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1099-1104, August 2008.

[۱۷] حسین عبدالله زاده سنگرودی، محمد تقی عاملی و محمد رضا مشکوه‌الدینی، "جایابی بهینه

واحدهای اندازه‌گیری فازوری برای مشاهده‌پذیری شبکه"، بیست و چهارمین کنفرانس بین-

المللی برق، ۱۳۸۸.

[18] N. H. Abbasy, H. M. Ismail, "A Unified Approach for the Optimal PMU Location for Power System State Estimation", IEEE Transaction on Power Systems, VOL. 24, No. 2, May 2009.

[19] B. Xu, Y. J. Yoon, and A. Abur, "Optimal Placement And Utilization of Phasor Measurements For State Estimation," PSERC Pub. 05-20, 2005.

- [20] B. Xu and A. Abur, "Observability Analysis and Measurement Placement for Systems with Pmus", IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Vol. 2, pp. 943-94, New York, 10-13 October 2004.
- [۲۱] حسین عسکریان ابیانه، سید سیاوش گرامیان و کاظم مظلومی، "یافتن محل و تعداد بهینه واحدهای اندازه‌گیری فیزور با استفاده از روش برنامه‌ریزی باینری به منظور مشاهده‌پذیری شبکه"، پانزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۱۳۸۶.
- [22] F. J. marin, F. Garcia-Lagos, G. Joya and F. Sandoval, "Genetic algorithm for optimal placement of Phasor measurement units in electrical networks", Electronics Letters, Vol. 39, No. 19, pp. 1403-1405, September 2003.
- [23] F. Aminfar, C. Lucas, A. Khodaei, M. Fotuhi, "Optimal Placement of Phasor measurement Units Using Immunity Genetic Algorithm", IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 24, No. 3, July 2009.
- [24] S. Chakrabarti, G. K. Venayagamoorthy and E. Kyriakides, "PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization", Australian Universities Power Engineering Conferences, pp. 1-5, 14-17 December 2008.
- [25] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee and B. Mozafari, "Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a midified BPSO algorithm", Journal of Electrical Power systems, Vol. 33, No.1, pp. 28-34, January 2011.
- [26] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee and A. R. Shirani, "Optimal placement of phasor measurement units: Particle swarm optimization approach", International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, pp. 1-6, 5-8 November 2007.
- [۲۷] احمد احمدی، یوسف علی‌نژاد برمی و مرتضی مرادی، "مکان‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فیزور با استفاده از الگوریتم BPSO"، بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۸.
- [28] Y. Gao, Z. Hu, X. He and D. liu, "optimal placement of PMUs in power system based on omproved PSO algothrithm", Industrial Electronics and Applications, ICIEA, pp. 2464-2469, 3-5 June 2008

- [29] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No. 4, October 2005.
- [30] B. Wang, D. Liu and L. Xiong, "An improved ant colony system in optimization power system PMU placement algorithm", Asia-Pacific and Energy Engineering Conference, pp. 1-3, 27-31 March 2009.
- [۳۱] علی حسامی نقش‌بندی، فرشاد خاوری و وحید ناصری، "جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور جهت مشاهده‌پذیری سیستم‌های قدرت با استفاده از روش انفجار نارنجک"، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۹.
- [32] H. Mesgarnejad and S. M. Shahrtash, "Multi-Objective measurement placement with new parallel tabu search method", IEEE Electrical Power & Energy Conference, pp. 1-6, 6-7 October 2008.
- [33] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 28, No. 4, pp. 223–231, May 2006.
- [34] K. Mazlumi and H. Vahedi, "Optimal placement of PMUs in power systems based on bacterial foraging algorithm", 18th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 885-888, 11-13 May 2010.
- [35] D. Dua, S. Dambhare, R. K. Gajbhiye and S. A. Soman, "Optimal multistage scheduling of PMU placement: an ILP approach", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, pp. 1812-1820, October 2008.
- [36] GAMS, Rev. 147, 2007, GAMS Development Corporation.
- [37] G. B. Dengeri, M. Invernizzi, F. Milano, M. Fiorina and P. Scarpellini, "A security oriented approach to PMU positioning for advanced monitoring of a transmission grid", International conference on Power System Technology, Vol. 2, pp. 798-803, 2002.

Abstract:

Phasor Measurement Units (PMUs) are being considered as essential tools in modern power system studies. In this Project the instruction of Phasor Measurement Unit and their application in power electrical networks is completely introduces and a general approach is proposed to place the PMUs optimally in a power system and minimize the total installation cost to make the entire system completely observable, as a basic step for linear state estimation. In this project, the placement of PMUs is performed with respect to the maximum measurement redundancy and considering single PMU loss or single branch outages.

The proposed approach employs Binary Integer Linear Programming and Exhaustive search to formulate and solve the objective function. This method to using more practical assumptions, with and without consideration of zero injections buses, does not utilize the existing conventional measurement in the power network. The proposed approach is then applied to several standard IEEE test systems (14-bus, 30-bus, 39-bus, 57-bus and 118-bus) to find the optimal placement of the PMUs. The simulation results approve the capability of the proposed method in finding the optimal place of the PMUs and minimizing the installation cost.

Key words:

Phasor Measurement Unit (PMU), Optimal Placement, Integer Linear Programming, Exhaustive Search.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Title:

**Optimal Placement of Phasor Measurement Units
(PMUs) in Power Systems**

Supervisor:

Dr. Mahdi Banejad

By:

Nima Amin

July 2011