پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

ارائه روشی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها در فرایند تخمین حالت سیستم قدرت بر مبنای بهینه‌سازی مقاوم

دانشجو:

مجتبی هنری شانه‌چی

استاد راهنما:

دکتر نیما امجدی

زمستان ۹۲

تقدیم به مادر و پدر عزیزم

سپاس فروان و تشکر ویژه

از زحمات استاد گرامی، جناب آقای پروفسور امجدی، که راهنمایی‌های ایشان همواره باعث پیشبرد اهداف این پایان‌نامه بوده است.

و با سپاس از زحمات دکتر دهقان که مرا در به ثمر رسیدن این مطالعه یاری کردند.

چکیده

از آنجا که تخمین‌گر سیستم قدرت اطلاعات ورودی برای توابع سیستم مدیریت انرژی را مهیا می‌کند، عملکرد این توابع (مانند تحلیل‌های امنیتی و پخش بار اقتصادی) شدیدا به دقت اطلاعات خروجی تخمین حالت وابسته است. برای دست‌یابی به روشی مطمئن و دقیق برای تخمین حالت، شناخت کامل نسبت به عوامل احتمالی به‌وجودآورنده خطا که منجر به عدم قطعیت در این مساله می‌شوند نیاز است.

در این مطالعه روشی جدید مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم ارائه شده است که می‌تواند عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها و پارامترهای شبکه را در مساله تخمین حالت لحاظ کند. بهینه‌سازی مقاوم روشی با توسعه روزافزون است که برای حل مسائل با متغیرهای دارای عدم قطعیت و محدودشده به کار می‌رود. اگر چه روش معرفی‌شده علاوه بر عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها توانایی درنظرگرفتن عدم قطعیت پارامترهای شبکه را نیز داراست، هدف این پژوهش حل مساله تخمین حالت با اندازه‌گیری‌های دارای عدم قطعیت است.

کلیدواژگان: تحلیل‌های امنیتی سیستم قدرت، تخمین حالت سیستم قدرت، عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌ها، *عدم قطعیت در پارامترهای شبکه*، بهینه‌سازی مقاوم.

فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها ..... ج

فهرست جدول‌ها ..... د

فصل اول: مقدمه

۱-۱ شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت ۱

۱-۲ تحلیل امنیت سیستم قدرت ۲

۱-۳ تخمین حالت سیستم قدرت ۳

۱-۴ عدم قطعیت در مساله تخمین حالت ۴

۱-۵ ساختار پایان نامه ۵

فصل دوم: توابع فرایند تخمین حالت

۲-۱ مقدمه ۶

۲-۲ پردازشگر پیکربندی سیستم ۶

۲-۳ تحلیل‌گر رویت‌پذیری سیستم ۷

۲-۴ تابع تخمین‌گر حالت سیستم ۹

۲-۴-۱ مدل‌های زمانی تخمین‌گرهای حالت سیستم ۹

۲-۴-۱-۱ تخمین حالت استاتیکی ۹

۲-۴-۱-۲ تخمین حالت دنبال کننده ۱۱

۲-۴-۱-۳ تخمین حالت پویا ۱۲

۲-۴-۲ ساده‌سازی‌های ممکن برای تخمین‌گر حالت ۱۵

۲-۴-۲-۱ تخمین حالت با استفاده از معادلات تفکیک شده ۱۵

۲-۴-۲-۲ تخمین حالت DC ۱۷

۲-۴-۳ استحکام روش تخمین حالت در برابر داده های غلط ۱۸

۲-۵ تشخیص و شناسایی اطلاعات غلط ۱۹

۲-۵-۱ ویژگی‌های باقیمانده‌های اندازه‌گیری‌ها ۲۰

۲-۵-۲ دسته‌بندی اندازه‌گیری‌ها ۲۱

۲-۵-۳ تشخیص و شناسایی اطلاعات غلط ۲۲

۲-۵-۳-۱ تشخیص اطلاعات غلط ۲۲

۲-۵-۳-۲ شناسایی اطلاعات غلط ۲۵
۲-۵-۴ تخمین گرهای مقاوم ۲۹
۲-۶ تخمین پارامترهای شبکه ۳۳

فصل سوم: روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت و منابع عدم قطعیت در مساله تخمین حالت

۳-۱ مقدمه ۳۴
۳-۲ عوامل بوجود آورنده عدم قطعیت در مسائل بهینه‌سازی و خطرات ناشی از آن ۳۴
۳-۳ روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت ۳۵
۳-۳-۱ آنالیز حساسیت ۳۶
۳-۳-۲ برنامه ریزی تصادفی ۳۶
۳-۳-۲-۱ معادل قطعی مساله برنامه‌ریزی تصادفی ۳۷
۳-۳-۲-۲ بهینه‌سازی درصدی و قیود روی شانس ۳۷
۳-۳-۲-۳ حل مسائل برنامه ریزی تصادفی ۳۷
۳-۳-۳ بهینه‌سازی مقاوم ۳۸
۳-۳-۳-۱ مدل مقاوم سویستر ۴۱
۳-۳-۳-۲ مدل مقاوم بن‌تال و نمیروسکی ۴۳
۳-۳-۳-۳ مدل مقاوم برتسیماس و سیم ۴۳
۳-۴ منابع عدم قطعیت در مساله تخمین حالت ۴۴
۳-۴-۱ خطا در پیکربندی شبکه ۴۵
۳-۴-۲ خطا در پارامترهای شبکه ۴۵
۳-۴-۳ خطا در اندازه‌گیری‌ها ۴۷
۳-۴-۳ خطا در پیش‌بینی بار ۴۸

فصل چهارم: مقدمات شبیه‌سازی و الگوریتم پیشنهادی

۴-۱ مقدمه ۴۹
۴-۲ مقدمات شبیه‌سازی ۴۹
۴-۲-۱ توابع اندازه‌گیری‌ها، $h(x)$ ۵۰
۴-۲-۲ ماتریس ژاکوبین اندازه گیری ها، H ۵۱
۴-۲-۳ ماتریس وزن ها، R^{-1} ۵۳
۴-۲-۴ ماتریس اندازه‌گیری‌ها، z ۵۳
۴-۳ الگوریتم پیشنهادی ۵۴

فصل پنجم: نتایج عددی روش مقاوم پیشنهادی

۵-۱ مقدمه ۵۸
۵-۲ سناریوهای شبیه‌سازی ۵۸
۵-۲-۱ سناریوی ۱ ..... ۵۸
۵-۲-۲ سناریوی ۲ ..... ۶۳

فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهادات

۶-۱ جمع‌بندی ۶۵
۶-۲ پیشنهادات ۶۶

منابع و مراجع ۶۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: دیاگرام حالت برای بهره برداری سیستم قدرت ۲
شکل ۱-۲: دیاگرام کاربردی تحلیل امنیت سیستم ۴
شکل ۲-۱: سیستم دو باسه به همراه اندازه‌گیری‌ها ۸
شکل ۲-۲: مدل π دو انتهایی یک شاخه شبکه ۱۰
شکل ۲-۳: تفاوت روش‌های استاتیکی و دنبال کننده ۱۲
شکل ۲-۴: تابع چگالی احتمال χ^2 ..... ۲۳
شکل ۲-۵: توزیع‌های آماری نمونه متناظر با H_0 و H_1 ..... ۲۷
شکل ۳-۱: الگوریتم پیشنهادی مقاله [۴۳] برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای شبکه ۴۶
شکل ۴-۱: مدل π دو انتهایی یک شاخه شبکه ۵۰

شکل ۵-۱: مقایسه خطای توان اکتیو انتقالی طبق سناریوی۱، به‌دست‌آمده از روش WLS و حالت‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی به ازای مجموعه اندازه‌گیری‌های خطادارشده و برروی سیستم ۳۰باسه ۶۰

شکل ۵-۲: مقایسه خطای توان راکتیو انتقالی طبق سناریوی۱، به‌دست‌آمده از روش WLS و حالت‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی به ازای مجموعه اندازه‌گیری‌های خطادارشده و برروی سیستم ۳۰باسه ۶۰

شکل ۵-۳: مقایسه خطای توان اکتیو تزریقی طبق سناریوی۱، به‌دست‌آمده از روش WLS و حالت‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی به ازای مجموعه اندازه‌گیری‌های خطادارشده و برروی سیستم ۳۰باسه ۶۱

شکل ۵-۴: مقایسه خطای توان راکتیو تزریقی طبق سناریوی۱، به‌دست‌آمده از روش WLS و حالت‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی به ازای مجموعه اندازه‌گیری‌های خطادارشده و برروی سیستم ۳۰باسه ۶۱

شکل ۵-۵: مقایسه خطای ولتاژ طبق سناریوی۱، به‌دست‌آمده از روش WLS و حالت‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی به ازای مجموعه اندازه‌گیری‌های خطادارشده و برروی سیستم ۳۰باسه ۶۲

فهرست جدول ها

جدول ۵-۱: مقایسه میانگین خطای انواع اندازه‌گیری طبق سناریوی۱، به‌دست‌آمده از روش WLS و حالت‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی به ازای مجموعه اندازه‌گیری‌های خطادارشده و برروی سیستم ۱۱۸باسه.....۶۲

جدول ۵-۲: مقایسه میانگین خطای انواع اندازه‌گیری طبق سناریوی۲، به‌دست‌آمده از روش WLS و حالت‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی به ازای مجموعه اندازه‌گیری‌های خطادارشده و برروی سیستم ۳۰باسه.....۶۳

جدول ۵-۳: مقایسه میانگین خطای انواع اندازه‌گیری طبق سناریوی۲، به‌دست‌آمده از روش WLS و حالت‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی به ازای مجموعه اندازه‌گیری‌های خطادارشده و برروی سیستم ۱۱۸باسه.....۶۳

فصل اول

مقدمه

۱-۱ شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت

گستردگی و پیچیده‌گی روزافزون سیستم قدرت، بهره‌برداری ایمن از آن را به امری ضروری و دشوار مبدل کرده است. سیستم قدرت با تغییر در شرایط بهره‌برداری می‌تواند در سه وضعیت عادی[۱]، اضطراری[۲] و احیای دوباره[۳] قرار گیرد[۱].

در طی شرایط عادی، تقاضای تمامی بارهای سیستم بدون نقض هیچ یک از قیود بهره‌برداری به‌وسیله توان تولیدی ژنراتورهای موجود ارضا می‌شود. قیود بهره‌برداری سیستم شامل محدودیت توان‌های عبوری از خطوط و محدودیت‌های حداقل و حداکثر ولتاژ باس‌ها می‌باشد. ایمن[۴] بودن شرایط عادی سیستم منوط به این است که سیستم با رخ دادن برخی از اتفاقات احتمالی نظیر خارج شدن برخی از خطوط یا ژنراتورها همچنان در شرایط عادی باقی بماند. در غیر این‌صورت، سیستم در وضعیت عادی و غیر ایمن[۵] قرار دارد که در این حالت تمام قیود بهره‌برداری و تعادل توان در باس‌ها ارضا شده‌اند اما

---

[۱] Normal

[۲] Emergency

[۳] Restorative

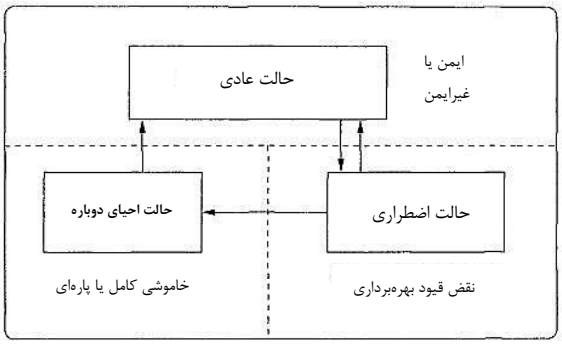
[۴] Secure

[۵] Insecure

سیستم در مقابل برخی پیشامدهای محتمل آسیب‌پذیر است. در این شرایط برای جلوگیری از اضطراری شدن احتمالی شرایط سیستم اقدامات پیشگیرانه‌ای[۱] باید صورت پذیرد.

در حالت اضطراری، شرایط بهره‌برداری سیستم ممکن است به دنبال حادثه‌ای ناگهانی بطور چشم-گیری تغییر کند و در حالی‌که تمامی بارهای سیستم تغذیه می‌شوند، برخی از قیود بهره برداری نقض شوند. به دنبال این شرایط برای خروج سیستم از این حالت و بازگشتن آن به حالت عادی اقدامات اصلاحی[۲] مناسب باید صورت گیرد.

در شرایط اضطراری اقدامات اصلاحی و کنترلی برای پیشگیری از فروپاشی سیستم در ازای حذف برخی از بارها و خطوط و تجهیزات صورت می‌پذیرد و سیستم پایداری خود را با مقادیر بار کمتر و پیکربندی[۳] جدید بدست می‌آورد. در این شرایط (که به آن احیای دوباره می‌گویند)، تعادل بین تولید و بار باید دوباره برقرار شود تا سیستم قادر به ارضای تمامی بارها باشد.



شکل ۱-۱: دیاگرام حالت برای بهره‌برداری سیستم قدرت

۱-۲ تحلیل امنیت سیستم قدرت[۴]

سیستم قدرت توسط اپراتورهای سیستم در مراکز کنترل بهره‌برداری می‌شود. هدف اصلی بهره‌بردار سیستم حفظ سیستم در شرایط عادی و ایمن است در حالتی‌که شرایط بهره‌برداری سیستم در حال تغییر است. دست‌یابی به این هدف نیازمند نظارت مداوم بر شرایط سیستم، شناسایی حالت بهره برداری سیستم و اتخاذ اقدامات پیشگیرانه ضروری در شرایطی است که سیستم غیر ایمن تشخیص داده می‌شود. به این مجموعه اقدامات تحلیل امنیت سیستم می‌گویند.

---

[۱] Preventive actions

[۲] Corrective actions

[۳] Topology

[۴] Power system security analysis

گام نخست در راستای تحلیل امنیت سیستم، مشاهده و نظارت بر حالت فعلی سیستم است که شامل دست‌یابی به اندازه‌گیری‌ها از تمامی قسمت‌های سیستم و تحلیل آن‌ها به منظور تخمین حالت‌های سیستم است. اندازه‌گیری‌هایی که به سیستم کنترل مخابره می‌شوند شامل توان انتقالی خطوط، ولتاژ باس‌ها، جریان خطوط، خروجی ژنراتورهای سیستم، بارها، وضعیت بریکرها، کلیدها و تپ ترانسفورماتورها می‌باشد. این اطلاعات خام و اندازه‌گیری‌ها توسط تخمین‌گر سیستم پردازش می‌شوند و بر پایه آن تخمینی بهینه از حالت‌های سیستم بدست می‌آید. حالت‌های تخمین زده شده سپس برای توابع سیستم مدیریت انرژی مانند کنترل اتوماتیک تولید، پیش‌بینی بار و پخش بار بهینه استفاده می‌شود.

۳-۱ تخمین حالت سیستم قدرت[۱]

ایده تخمین حالت در سیستم قدرت برای اولین بار توسط شووپ[۲] مطرح شد[۴-۲]. تخمین‌گر سیستم به عنوان هسته آنالیزهای به‌روز امنیت ایفای نقش می‌کند. فرایند تخمین حالت سیستم قدرت معمولا شامل توابع زیر است:

- پردازشگر توپولوژی[۳]: اطلاعات بریکرها و کلیدها را جمع‌آوری و دیاگرام به‌روز سیستم را تهیه می‌کند.
- تحلیل رویت‌پذیری سیستم[۴]: با توجه به مجموعه اندازه‌گیری‌های موجود امکان دست‌یابی تخمین‌گر سیستم به راه‌حل را بررسی می‌کند. این تابع همچنین شاخه‌های رویت ناپذیر و قسمت‌های رویت پذیر سیستم را در صورت وجود مشخص می‌کند.
- راه حل تخمین حالت[۵]: بر پایه مدل شبکه و اندازه‌گیری‌های جمع‌آوری شده تخمینی بهینه از حالت های سیستم شامل اندازه و فاز تمامی باس‌ها بدست می‌دهد.
- پردازش اطلاعات غلط[۶]: شناسایی و حذف اطلاعات غلط موجود در مجموعه اندازه‌گیری‌ها را بر عهده دارد.
- تخمین‌گر خطاهای ساختاری و پارامترهای شبکه[۷]: خطاهای موجود در پارامترهای خط و خطاهای احتمالی در توپولوژی سیستم را تشخیص می‌دهد.

---

[۱] Power system state estimation

[۲] Schweppe

[۳] Topology processor

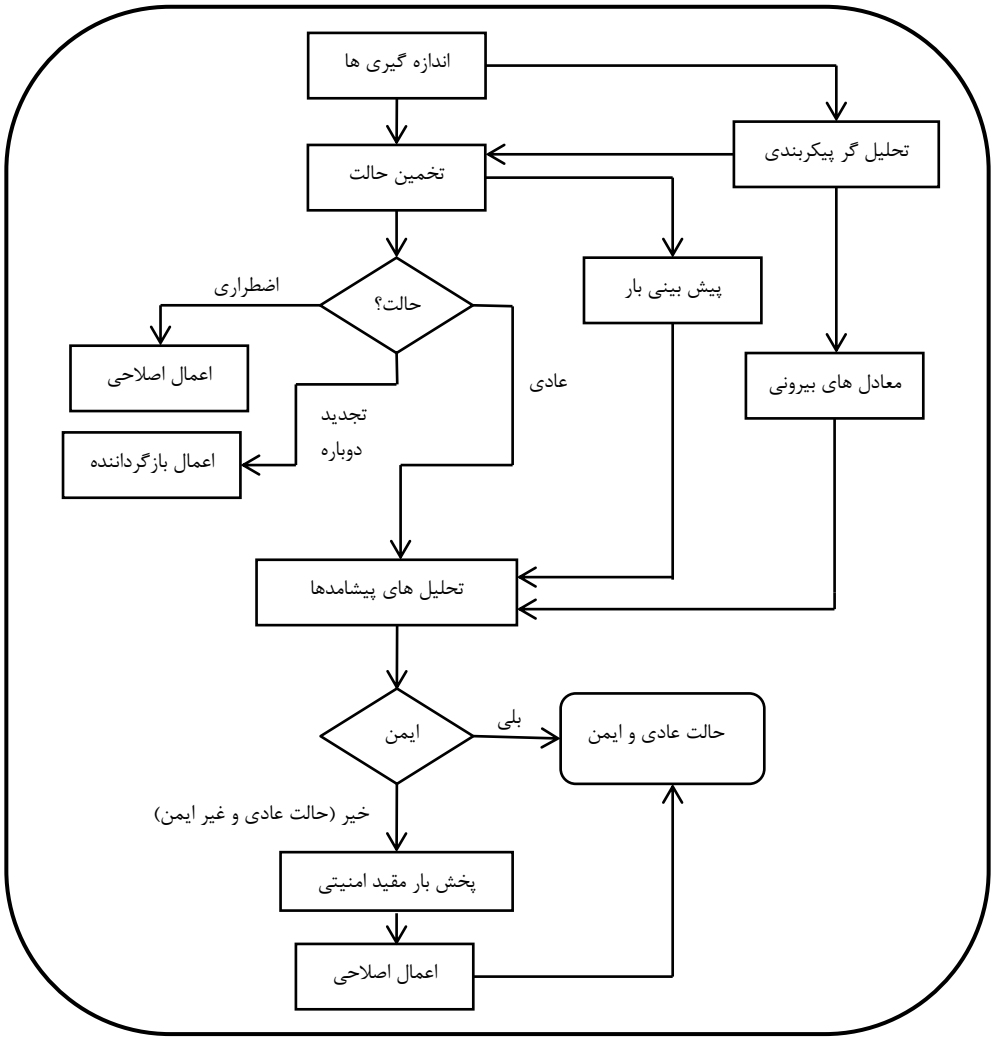
[۴] Observability analysis

[۵] State estimation solution

[۶] Bad data processing

[۷] Parameter and structural error processing

در شکل ۱-۲ دیاگرام تحلیل امنیت سیستم آورده شده است.



شکل ۱-۲: دیاگرام کاربردی تحلیل امنیت سیستم

۱-۴ عدم قطعیت در مساله تخمین حالت

یکی از دغدغه‌های مهم که اخیرا در مسائل بهینه‌سازی در زمینه‌های مختلف مورد توجه گرفته است، عدم قطعیت موجود در پارامترها و داده‌های ورودی مورد استفاده در این مسائل می‌باشد. در اکثر مسائل بهینه‌سازی از فرض قطعی و بدون خطا بودن مقادیر ورودی برای دست‌یابی به راه‌حل مساله استفاده می‌شود که این امر می‌تواند صحت این پاسخ ها را به خطر اندازد. در مسائل عملی مانند تخمین حالت مقادیر ورودی به‌وسیله اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط ابزار مختلف بدست می‌آیند که به دلیل دقت محدود این ابزار، مقادیر اندازه‌گیری شده را همواره می‌توان آلوده به درصدی خطا در

نظر گرفت. هدف اصلی این مطالعه بررسی منابع عدم قطعیت در مساله تخمین حالت و یافتن راهی مناسب برای حل این مساله با در نظر گرفتن عدم قطعیت می‌باشد.

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

در ادامه این پایان‌نامه و در فصل دو، به بررسی توابع مختلف فرایند تخمین حالت سیستم قدرت پرداخته خواهد شد. فصل سه به بررسی مبانی و روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت در مسائل بهینه-سازی و منابع عدم قطعیت در مساله تخمین حالت و مطالعات انجام شده در این زمینه اختصاص دارد. در فصل چهارم به ارائه توضیحاتی درباره محاسبه داده‌های موردنیاز برای اجرای فرایند تخمین و شرح الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی در قبال سناریوهای مختلف شبیه‌سازی در فصل پنجم مورد ارزیابی قرار گرفته است. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نیز در فصل ششم انجام شده است.

فصل دوم

توابع فرایند تخمین حالت

۲-۱ مقدمه

فرایند تخمین حالت در سیستم قدرت به طور ساده، به فرایندی اطلاق می‌شود که در طی آن تخمین‌گر با دریافت مقادیر اندازه‌گیری شده (عمدتا اندازه و فاز ولتاژها، توان‌های تزریقی به باس‌ها و توان‌های عبوری از خطوط) از نقاط مختلف سیستم، مقادیر حالت سیستم یعنی همان اندازه و فاز ولتاژ در تمام باس‌ها را تخمین می‌زند. در کنار هسته اصلی فرایند تخمین حالت که وظیفه فوق را بر عهده دارد، وجود توابعی مانند پردازشگر پیکربندی سیستم و تحلیل‌گر رویت‌پذیری سیستم برای اجرای فرایند تخمین حالت ضروری است. همچنین توابعی مانند تشخیص دهنده خطای اندازه‌گیری و تشخیص دهنده خطای پیکربندی سیستم علاوه بر اینکه می‌توانند در بسیاری از موارد عملکرد کل فرایند را بهبود دهند، در برخی موارد هم وجودشان برای اجرای فرایند ضروری است. در این فصل به بررسی مفصل‌تر این توابع می‌پردازیم.

۲-۲ پردازشگر پیکربندی سیستم

پردازشگر پیکربندی سیستم، وضعیت بریکرها و کلیدهای سیستم را مشخص می‌کند. به طور واضح‌تر می‌توان وظیفه این تابع را بدست آوردن دیاگرام و توپولوژی سیستم بر اساس داده‌های ورودی تعریف

کرد. اطلاعات بدست آمده از این تابع از ملزومات اجرای فرایند اصلی تخمین می‌باشند. پردازشگر پیکربندی باید بتواند در مواردی که اطلاعات کاملی از وضعیت کلیدها وجود ندارد، موقعیت درست آن‌ها را تخمین بزند. در صورتی‌که اطلاعات مخابره شده توسط این تابع غلط باشند، تابع تشخیص دهنده خطای توپولوژی باید خطا را تشخیص داده و اصلاح کند.

۲-۳ تحلیل‌گر رویت‌پذیری سیستم

تحلیل‌گر رویت‌پذیری سیستم، پیش از اجرای تابع اصلی تخمین‌گر، با دریافت اندازه‌گیری‌های مخابره شده و با توجه به نوع و محل آن‌ها امکان به دست آمدن تخمینی یکتا با توجه به این اندازه‌گیری‌ها را می‌سنجد. اگر بتوان حالت‌های سیستم را با توجه به اندازه‌گیری‌های موجود تخمین زد، سیستم را رویت‌پذیر[۱] و در غیر این‌صورت سیستم را رویت‌ناپذیر[۲] می‌گویند[۵]. در صورت رویت‌ناپذیر بودن سیستم، با افزودن دستگاه‌های اندازه‌گیری مناسب در محل‌های خاص می‌توان سیستم را رویت‌پذیر نمود. خطا در مخابره مقادیر اندازه‌گیری، تغییر توپولوژی سیستم و خرابی دستگاه‌های اندازه‌گیری از جمله دلایلی هستند که می‌توانند باعث تخمین زده نشدن تمامی حالت‌های سیستم شوند. در این شرایط سیستم اصطلاحا به چند جزیره رویت‌پذیر تقسیم می‌شود که هر یک مقدار فاز مرجع مستقل خود را دارند.

تحلیل‌های رویت‌پذیری می‌توانند با استفاده از معادلات کاملا جفت‌شده[۳] و جداشده[۴] صورت پذیرند. یکی از مشکلات پیش آمده در استفاده از معادلات جفت‌شده برای تحلیل رویت‌پذیری امکان بدست آمدن جواب‌های غیر یکتا است. به عنوان مثال مطابق شکل ۲-۱ اگر امپدانس خطی ۰/۲j پریونیت باشد و اندازه‌گیری‌هایی به صورت زیر داشته باشیم:

$V_1 = 1.00\ p.u.,\quad V_2 = 0.99\ p.u.,\quad Q_{12} = -0.8\ p.u.$

مقدار متغیر حالت θ_2 می‌تواند با حل معادله زیر به دست آید:

$$Q_{12} = \frac{V_1 V_2}{X} \cos\theta_2 - \frac{V_1^2}{X} \qquad (۲-۱)$$

$$-0.8 = 49.5 \cos\theta_2 - 50 \qquad (۲-۲)$$

[۱] Observable
[۲] Unobservable
[۳] Fully coupled
[۴] Decoupled

شکل ۲-۱: سیستم دو باسه به همراه اندازه‌گیری‌ها

مثال فوق خطر متناظر در استفاده از Q برای تخمین زوایا (یا P برای اندازه ولتاژها) را نشان می‌دهد. روش‌های تحلیل رویت‌پذیری برای جلوگیری از چنین مواردی معمولا برای هر خط از هر دو اندازه گیری P و Q و از مدل جداشده اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌کنند[۵].

روش‌های تحلیل رویت‌پذیری شبکه می‌توانند به دو دسته اصلی روش‌های مبتنی بر پیکربندی شبکه و روش‌های عددی تقسیم شوند. روش‌های مبتنی بر پیکربندی شبکه از مدل جداشده اندازه‌گیری‌ها و نظریه گراف استفاده می‌کنند . روش‌های عددی، امکان استفاده از معادلات جداشده و جفت‌شده را دارند و می‌توانند هم بر پایه متغیرهای گره و هم بر پایه متغیرهای شاخه نوشته شوند. مرور کاملی بر روش های ذکر شده در مرجع [۵] آمده است. مطالعه [۶] مساله رویت‌پذیری سیستم و کفایت اندازه-گیری‌ها را به طور جامع و با توجه به الگوریتم‌های پردازش داده‌های غلط و پردازش خطای توپولوژی سیستم بررسی کرده است. مقاله [۷] با ارائه روشی جدید، شیوه انتخاب اندازه‌گیری‌ها که معمولا با اضافه شدن اندازه‌گیری‌ها به صورت تک تک و در فرایندی تکراری صورت می‌پذیرفت را به صورت هم‌زمان و با انتخاب حداقلی اندازه‌گیری‌ها در نظر گرفته است. مقاله [۸] نیز مساله رویت‌پذیری سیستم را با الگوریتم جست‌وجوی تصادفی تابو[۱] حل کرده است.

در سال‌های اخیر با ورود ادوات اندازه‌گیری فازوری[۲] به سیستم‌های قدرت، مطالعات و مقالات فراوانی به بررسی مساله رویت‌پذیری سیستم در حضور این ادوات پرداخته‌اند. PMUها مقادیر فاز باسی که به آن متصل شده‌اند و خطوطی که به آن باس متصل‌اند را با دقت بسیار بالا اندازه می‌گیرند. با توجه به هزینه قابل توجه نصب هر واحد PMU تعداد محدودی از این ادوات را در سیستم قدرت می‌توان به کار بست که همین امر مساله جایابی بهینه این ادوات در سیستم قدرت را بسیار حائز اهمیت می‌کند. مقاله [۹] مساله تخمین را در حضور ادوات PMU بررسی کرده است و مطالعات [۶] و [۸] مساله جایابی بهینه PMUها را با توجه به انواع اندازه‌گیری‌های موجود در سیستم را بررسی کرده‌اند.

[۱] Tabu search

[۲] Phasor Measurement Units (PMU)

۲-۴ تابع تخمین‌گر حالت سیستم

پس از انجام فرایند تحلیل رویت‌پذیری سیستم و اطمینان از وجود جوابی یکتا برای فرایند تخمین حالت، با توجه به پیکربندی شبکه و نوع و مکان اندازه‌گیری‌ها، تابع تخمین‌گر حالت سیستم به عنوان هسته اصلی فرایند تخمین حالت با پردازش اندازه‌گیری‌های رسیده از نقاط مختلف سیستم تخمینی یکتا از مقادیر حالت سیستم یا همان ولتاژ و فاز تمام باس‌های سیستم به دست می‌دهد.

ضرورت وجود تخمین‌گری دقیق در سیستم قدرت که تحلیل‌های امنیتی سیستم بتوانند با اتکا به آن به درستی صورت پذیرند، باعث شکل گرفتن مطالعات فراوانی در این زمینه شده است. در ادامه با معرفی شاخص‌های گوناگون که می‌توانند وجه تمایز روش‌های تخمین حالت از دیدگاه‌های متفاوت به شمار آیند، به بررسی این روش‌ها از جوانب گوناگون پرداخته شده است.

۲-۴-۱ مدل‌های زمانی تخمین‌گرهای حالت سیستم

۲-۴-۱-۱ تخمین حالت استاتیکی[۱]

همانگونه که اشاره شد فرایند تخمین حالت به استخراج مقدار دقیق و عاری از خطای متغیرهای حالت سیستم از اندازه‌گیری‌های موجود اطلاق می‌شود. حال اگر بردار حالت در یک لحظه از زمان از اندازه‌گیری‌های همان لحظه به دست آید، این فرایند را تخمین حالت استاتیک می گویند[۵]. برای دانستن بردار حالت به طور منظم این فرایند باید در بازه‌های مناسب زمانی تکرار شود. تخمین حالت استاتیکی به طور گسترده در سیستم‌های قدرت به کار گرفته می‌شود و نقش بسیار مهمی در بهره-برداری ایمن از سیستم ایفا می‌کند. در ادامه به تشریح روش شناخته شده حداقل مربعات وزن‌دار[۲] که از پرکاربردترین روش‌های تخمین حالت استاتیکی می‌باشد می‌پردازیم.

معادله اندازه‌گیری‌ها را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$z=\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} h_1(x_1,x_2,x_3,\ldots,x_n) \\ h_2(x_1,x_2,x_3,\ldots,x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1,x_2,x_3,\ldots,x_n) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix}=h(x)+e \qquad (۳-۲)$$

که در معادله فوق:

$z^T=[z_1,z_2,\ldots,z_m]$ بردار اندازه‌گیری‌های انجام شده از نقاط مختلف سیستم می‌باشد. این اندازه‌گیری‌ها عمدتا شامل توان‌های اکتیو و راکتیو خطوط، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به هر باس، فاز و اندازه ولتاژ باس های مختلف و جریان خطوط می‌باشند.

---

[۱] Static state estimation

[۲] Weighted Least Square (WLS)

$x^T=[x_1,x_2,\ldots,x_n]$ بردار شامل حالت‌های سیستم می‌باشد.

$h^T=[h_1(x),h_2(x),\ldots,h_m(x)]$: $h_i(x)$ تابعی است که متناظر با نوع اندازه‌گیری در دسترس i، آن نوع خاص از اندازه‌گیری را به متغیرهای حالت سیستم مرتبط می‌کند. به عنوان مثال اگر اندازه‌گیری از توان اکتیو انتقالی از یک خط انجام گرفته باشد این تابع به صورت زیر در می‌آید:

$$P_{ij}=V_i^2\left(g_{si}+g_{ij}\right)-V_iV_j(g_{ij}\cos\theta_{ij}+b_{ij}\sin\theta_{ij}) \qquad (۴-۲)$$

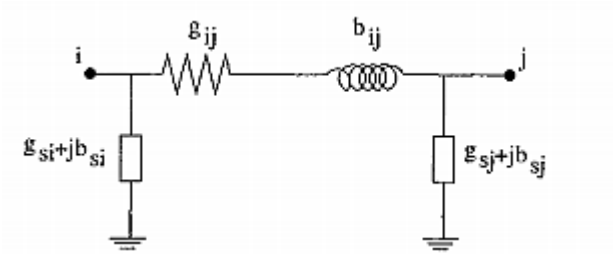
که در این رابطه:

V_i و θ_i مقادیر اندازه و فاز ولتاژ در باس i می‌باشند.

$\theta_{ij}=\theta_i-\theta_j$.

$g_{ij}+jb_{ij}$ ادمیتانس شاخه سری واصل باس i و j هستند.

g_{si} قسمت حقیقی ادمیتانس شاخه موازی متصل به باس i مطابق شکل زیر است:



شکل ۲-۲: مدل π دو انتهایی یک شاخه شبکه

e بیانگر خطای اندازه‌گیری است که متغیری دارای توزیع نرمال با ویژگیهای آماری زیر در نظر گرفته می‌شود:

- $E(e_i)=0, \quad i=1,\ldots,m$.
- خطاهای اندازه‌گیری‌ها از یکدیگر مستقلند به عبارت دیگر $E(e_ie_j)=0$.
- $Cov(e)=E[e.e^T]=R=diag\{\sigma_1^2,\sigma_2^2,\ldots,\sigma_m^2\}$.

برای هر اندازه‌گیری، مقدار باقیمانده متناظر با آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_i=z_i-h_i(x) \qquad (۵-۲)$$

تخمین‌گر WLS سعی در کمینه کردن مجموع مربعات وزن‌دار شده‌ی باقیمانده‌های اندازه‌گیری‌ها در غالب تابع هدف زیر دارد:

$$J(x)=[z-h(x)]^T R^{-1}[z-h(x)] \qquad (۶-۲)$$

در رابطه (۲-۶)، R ماتریس کوواریانس خطای اندازه‌گیری‌هاست که هر کدام از درایه‌های آن متناظر با نوع خاص اندازه‌گیری رسیده، نمایانگر دقت دستگاه اندازه‌گیری مربوطه است. با مشتق‌گیری از تابع هدف فوق و اعمال شرط بهینگی داریم:

$$g(x)=\frac{\partial J(x)}{\partial x}=-H^{T}(x)R^{-1}[z-h(x)]=0 \qquad (۲-۷)$$

که در رابطه بالا $H(x)=\frac{\partial h(x)}{\partial x}$ می‌باشد. با بسط دادن دادن تابع g(x) حول نقطه x_k و صرف نظر از جملات درجه دو و بالاتر معادله نهایی این روش به صورت زیر در می آید:

$$[G(x^k)]\Delta x^{k+1}=H^{T}(x^k).R^{-1}.(z-h(x^k)) \qquad (۲-۸)$$

که در این رابطه:

$$G(x^k)=\frac{\partial g(x^k)}{\partial x}=H^{T}(x^k).R^{-1}.H^{T}(x^k) \qquad (۲-۹)$$

$\Delta x^{k+1}=x^{k+1}-x^k$ و k شاخص تکرار می‌باشد.

راه‌حل روش تخمین حالت WLS با استفاده از معادله (۲-۸) و در نظر گرفتن مقدار اولیه برای متغیرهای حالت و به‌روزآوری آن در فرایندی تکراری به دست می‌آید.

۲-۱-۴-۲ تخمین حالت دنبال کننده

در شرایط عادی، سیستم قدرت سیستمی شبه استاتیک است بدین معنا که تغییرات آرام و پایداری دارد. تخمین‌گرهای استاتیکی علی‌رغم اینکه ابزاری کارامد برای تخمین حالت سیستم قدرت به شمار می‌روند، ممکن است در برخی از موارد به دلیل بزرگ بودن ابعاد سیستم و نیاز به اجرای الگوریتم تخمین حالت در بازه‌های زمانی کوتاه و منابع پردازشی سنگین، عملکرد مناسبی نداشته باشند. همین امر موجب پیدایش روش‌های تخمین حالت دنبال کننده[۱] گردیده است که در آن فرایند تخمین یک بار انجام می‌شود و متغیرهای حالت برای لحظات بعدی به جای اجرای دوباره فرایند با توجه به مجموعه اندازه‌گیری‌های همان لحظه به سادگی به روز می‌شوند. این روش‌ها به سیستم مدیریت انرژی کمک می‌کنند تا بتواند تغییرات سیستم را بدون انجام دوباره پروسه دنبال کند[۱۱][۱۰].

تفاوت تخمین حالت استاتیک و دنبال‌کننده را می‌توان در شکل ۲-۳ مشاهده کرد. در این روش به جای اجرای دوباره فرایند تخمین، بردار حالت با استفاده از حالت‌های مرحله قبل و اندازه‌گیری‌های فعلی سیستم به روز می‌شود.

[۱] Tracking state estimation