بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٨٦٨

۸۷/۱/۱۰۹۱۲۷
۸۷-۰۲-۲۵

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق (قدرت)

جایابی بهینه وسایل اندازه‌گیری جهت مطالعات تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از روشهای هوشمند

به وسیله‌ی:
رضا کیهانی

۱۳۸۷/۱۰/۲۱

استاد راهنما:
دکتر علیرضا سیفی

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
شعبه مدارک

شهریور ماه ۸۷

۱۰۸۶۰۸

به نام خدا

جایابی بهینه وسایل اندازه‌گیری جهت مطالعات تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از روشهای هوشمند

به وسیله:

رضا کیهانی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی

از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

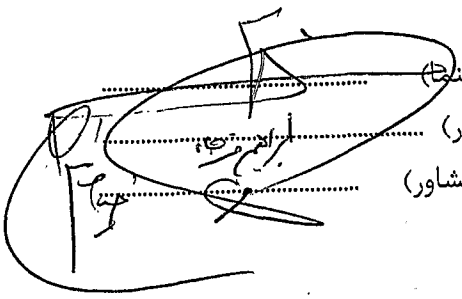
در رشته:

مهندسی برق- قدرت

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران



ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: **عالی**

دکتر علیرضا سیفی، استادیار بخش مهندسی برق(استاد راهنما) .....

دکتر ابراهیم فرجاه، دانشیار بخش مهندسی برق(استاد مشاور) .....

دکتر علیرضا خیاطیان، دانشیار بخش مهندسی برق(استاد مشاور) .....

شهریور ماه ۱۳۸۷

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است.

و به پاس قلب‌های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید .

و تقدیم به همسر مهربانم

به پاس صبر و محبت‌های بی‌دریغش که هرگز فروکش نمی‌کند.

سپاسگزاری

قبل از هر چیز لازم می‌دانم از زحمات و راهنمایی‌های استاد فرهیخته جناب آقای دکتر علیرضا سیفی تشکر و سپاسگزاری نمایم. بیشک دانش، رفتار متواضعانه و حسن سلوک ایشان همیشه الگویی برای اینجانب خواهد بود. همچنین از زحمات بی‌دریغ اساتیدِ مشاورجناب آقایان دکتر ابراهیم فرجاه و دکتر علیرضا خیاطیان کمال تشکر را داشته و برای ایشان سلامتی همراه با موفقیت را از خدواند بزرگ خواستارم.

چکیده

جایابی بهینه وسایل اندازه‌گیری جهت مطالعات تخمین حالت سیستم قدرت با استفاده از روشهای هوشمند

به وسیله‌ی:

رضا کیهانی

جایابی وسایل اندازه‌گیری از همان ابتدای تدوین و تکوین تخمین حالت در سیستمهای قدرت از موضوعات اساسی این بحث بوده است. لازمه مکانیابی وسایل اندازه‌گیری در سیستم قدرت رؤیت‌پذیر نمودن سیستم قدرت می‌باشد. بنحوی که حل معادله تخمین حالت میسر گردد. در این پایان‌نامه، ابتدا با هدف کم‌کردن هزینه وسایل اندازه‌گیری و RTUها، کاهش دادن تعداد وسایل اندازه‌گیری بحرانی و گروه بحرانی، حفظ رؤیت‌پذیری در برابر قطع خطوط، کم‌کردن تعداد نقاط اهرمی یک طراحی اولیه انجام می گیرد. با توجه به تأثیر مستقیم محل وسایل اندازه‌گیری روی پایداری عددی و در نتیجه سرعت همگرایی در این قسمت کم کردن عدد وضعیت ماتریس بهره نیز ملاک عمل قرار داده شده است. در این مرحله جهت بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در مرحله بعد سعی شده تا با اضافه نمودن وسایل اندازه گیری جدید به طراحی مرحله قبل، دقت تخمین حالت بهبود داده شود. در نهایت روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های ۱۴و۳۹ باسه IEEE تست شده است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول : مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته	
۱-۱- مقدمه	۱
۱-۳-اندازه‌گیری در سیستمهای قدرت	۵
فصل دوم : ابزارهای تحقیق	
۲-۱-تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزنی	۱۱
۲-۱-۱-مقدمه	۱۱
۲-۱-۲- تخمین بر اساس معیار حداکثر شباهت	۱۲
۲-۱-۲-۱-تابع چگالی احتمال نرمال	۱۳
۲-۱-۲-۲-تابع شباهت	۱۴
۲-۱-۲-۳-مدل اندازه‌گیری و فرضیات	۱۵
۲-۱-۳-الگوریتم تخمین حالت به روش WLS	۱۷
۲-۱-۳-۱-تابع اندازه‌گیری	۱۹
۲-۱-۳-۲-ماتریس ژاکوبین اندازه‌گیری (H)	۲۱
۲-۱-۳-۳-ماتریس بهره	۲۳
۲-۱-۳-۳-۱-تجزیه Cholesky ماتریس بهره	۲۴
۲-۱-۴- فرم کاهش‌یافته روش WLS	۲۶

۲-۳-الگوریتم ژنتیک ۲۸
۲-۳-۱- مقدمه ۲۸
۲-۳-۲-پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک ۲۸
۲-۳-۲-۱- انتخاب ۲۸
۲-۳-۲-۱-۱- انتخاب بر اساس رتبه‌بندی ۲۹
۲-۳-۲-۱- ۲-انتخاب بر اساس چرخ گردان ۲۹
۲-۳-۲-۲-عملگر ترکیب ۳۰
۲-۳-۲-۳-عملگر جهش ۳۱
۲-۳-۲-۴- گزینش نسل جدید ۳۲
۲-۳-۳- همگرایی الگوریتم‌های تکاملی ۳۳
فصل سوم : مفاهیم و معیارهای اساسی در جایابی وسایل اندازه‌گیری
۳-۱-آنالیز رؤیت‌پذیری در سیستمهای قدرت ۳۴
۳-۱-۱-مقدمه ۳۴
۳-۱-۲-روشهای آنالیز رؤیت‌پذیری ۳۶
۳-۱-۲-۱-آنالیز عددی ۳۶
۳-۱-۲-۱-۱-روش مبتنی بر تست رتبه ماتریس H و غیر مؤکد بودن G ۳۷
۳-۱-۲-۱-۲-روش مبتنی بر فاکتورگیری ماتریسی ۳۸
۳-۱-۲-۱-۳-آنالیز عددی با استفاده از روش تخمین حالت DC ۴۰
۳-۱-۲-۲-آنالیز توپولوژی ۴۲
۳-۱-۳-دسته‌بندی وسایل اندازه‌گیری ۴۳
۳-۱-۴-روش تشخیص وسایل اندازه‌گیری بحرانی و گروههای بحرانی ۴۳

۳-۱-۴-۱-روش فاکتورگیری مثلثی ماتریس ژاکوبین ۴۴
۳-۱-۴-۲-روش خطای باقیمانده ۴۵
۳-۱-۴-۲-۱- الگوریتم شناسایی وسایل و گروه بحرانی بروش خطای باقیمانده ۴۶
۳-۲-واحدهای اندازه‌گیری فازوری همزمان ۴۸
۳-۲-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲-۲-استاندارد IEEE برای وسایل اندازه‌گیری فازوری ۵۳
۳-۲-۳-مکانیابی وسایل اندازه‌گیری فازوری در سیستم قدرت ۵۴
۳-۲-۵-عناصر مرتبط با PMU در ماتریس ژاکوبین اندازه‌گیری ۵۶
۳-۲-۶-تأثیر اضافه نمودن PMU به سیستم برروی عدد وضعیت ۵۸
۳-۳-عدد وضعیت ۶۱
۳-۳-۱-فاصله تکین و فاکتور مقیاسی ۶۷
۳-۳-۲-روشهای جایگزین برای سیستمهای بدوضعیت ۶۸

فصل چهارم : نقاط اهرمی

۴-۱-مقدمه ۷۰
۴-۱-۲-مفهوم نقاط اهرمی ۷۱
۴-۱-۳-تعیین وسایل اندازه‌گیری اهرمی ۷۴
۴-۱-۳-۱-Mahalanobis Distances ۷۶
۴-۱-۳-۲-روش آمارتصویری ۷۷

فصل پنجم : مطالعات عددی

۵-۱- مقدمه ۸۰
۵-۲- روش پیشنهادی ۸۱

۵-۲-۱-مرحله ۱ ۸۱
۵-۲-۱- الگوریتم ژنتیک ۸۱
۵-۲-۱-۱- ایجاد یک جمعیت اولیه مناسب ۸۱
۵-۲-۱-۲- تابع هدف ۸۲
۵-۲-۱-۳- انجام ازدواج و جهش روی کروموزم‌های تولید شده ۸۴
۵-۲-۱-۴- انتخاب اعضای نسل بعد ۸۴
۵-۲-۱-۵- شرط خاتمه ۸۴
۵-۲-۲-مرحله ۲ ۸۶
۵-۲-۲-۱-جایابی وسایل اندازه‌گیری جدید جهت افزایش دقت ۸۶
۵-۲-۲-۱-۱-افزایش دقت با استفاده از وسایل اندازه‌گیری سنتی ۸۶
۵-۲-۲-۱-۲-افزایش دقت با استفاده از وسایل اندازه‌گیری فازوری ۸۷
۵-۳-نتایج شبیه‌سازی ۸۹
۵-۳-۱-شبکه۱۴ باسه IEEE ۸۹
۵-۳-۱-۱- اطلاعات شبکه ۸۹
۵-۳-۱-۲-مرحله اول ۹۰
۵-۳-۱-۳-مرحله دوم ۱۰۳
۵-۳-۲-شبکه ۳۹ باسه IEEE ۱۰۷
۵-۳-۲-۱- اطلاعات شبکه ۱۰۷
۵-۳-۲-۲-مرحله اول ۱۰۹
۵-۳-۲-۳-مرحله دوم
۱۱۶

فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۹

۶-۲- پیشنهادات ۱۲۰

مراجع ۱۲۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: فرآیند تعیین حالت سیستم قدرت وانجام اعمال کنترلی ونظارتی ۵

شکل ۱-۲: سیستم اندازه‌گیری نمونه ۶

شکل ۲-۱: مدار معادل π برای خط انتقال ۲۰

شکل ۲-۲: چرخ گردان ۳۰

شکل ۲-۳: عملگر ترکیب تک نقطه‌ای ۳۰

شکل۲-۴: عملگر ترکیب چند نقطه‌ای ۳۱

شکل ۳-۱: دیاگرام تصویری از یک سیستم اندازه‌گیری فازوری ۵۰

شکل ۳-۲: سیستم موقعیت‌یاب مورد استفاده در PMU ۵۱

شکل ۳-۳: روش نمونه‌برداری از سیگنال توسط PMU ۵۱

شکل ۳-۴: تأثیر نصب یک PMU بر روی رؤیت‌پذیری سیستم ۵۵

شکل ۳-۵: مدار معادل π برای خط انتقال بفرم قطبی ۵۷

شکل ۵-۱: فلوچارت برنامه مرحله اول ۸۵

شکل ۵-۲: شبکه ۱۴ باسه ۹۰

شکل۵-۳- شبکه ۱۴ باسه بهمراه وسایل اندازه‌گیری ۹۸

شکل ۵-۴: روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در مرحله اول جایابی وسایل اندازه‌گیری شبکه ۱۴ باسه ۱۰۱

شکل ۵-۵: شبکه ۳۹ باسه بهمراه وسایل اندازه‌گیری ۱۰۸

شکل ۵-۶: روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در مرحله اول جایابی وسایل اندازه‌گیری شبکه ۳۹ باسه ۱۱۳

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۳-۱: روشهای ارزیابی دقت در تخمین حالت ۵۶

جدول ۳-۲: برخی از ویژگیهای نرم یک تابع ۶۵

جدول ۴-۱: تعیین ضرایب f_m(ضریب تصحیح) با توجه به تعداد وسایل اندازه‌گیری نصب شده ۷۸

جدول۵-۱: انحراف معیار استاندارد وسایل اندازه‌گیری ۸۸

جدول ۵-۲: اطلاعات باسهای شبکه ۱۴ شینه ۸۹

جدول ۵-۳: داده‌های پخش بار برای شبکه ۱۴ شینه ۸۹

جدول ۵-۴: آمار تصویری محاسبه شده برای وسایل اندازه‌گیری ۹۹

جدول ۵-۵: روش تعیین وسایل اندازه‌گیری بحرانی وکاندیداهای گروه بحرانی ۱۰۰

جدول۵-۶: نتایج مربوط به فاکتورهای مختلف طراحی سیستم اندازه‌گیری بر اساس توابع هدف متفاوت ۱۰۲

جدول ۵-۷: واریانس خطای محاسبه شده برای حالتهای سیستم قبل و بعد از اضافه نمودن وسایل جدید ۱۰۳

جدول ۵-۸: تعیین کاندیداهای وسایل اندازه‌گیری جدید جهت افزایش دقت تخمین حالت ۱۰۴

جدول ۵-۹: مقایسه تأثیر اضافه نمودن وسایل اندازه‌گیری سنتی وPMU بر دقت ۱۰۵

جدول ۵-۱۰: مقایسه تأثیر اضافه نمودن PMU وسایل اندازه‌گیری سنتی برروی عدد وضعیت شبکه ۱۴ باسه ۱۰۶

جدول ۵-۱۱: اطلاعات باسها وخطوط شبکه ۳۹ شینه ۱۰۷

جدول ۵-۱۲: آمار تصویری محاسبه شده برای وسایل اندازه‌گیری ۱۱۴

جدول ۵-۱۳: نتایج مربوط به فاکتورهای مختلف طراحی سیستم اندازه‌گیری بر اساس توابع هدف متفاوت ۱۱۵

جدول ۵-۱۴: واریانس خطای محاسبه شده برای حالتهای سیستم قبل و بعد از اضافه نمودن وسایل جدید ۱۱۶

جدول ۵-۱۵: تعیین کاندیداهای وسایل اندازه‌گیری جدید جهت افزایش دقت تخمین حالت ۱۱۷

جدول ۵-۱۶: مقایسه تأثیر اضافه نمودن PMU و وسایل اندازه‌گیری سنتی برروی دقت تخمین حالت شبکه ۳۹ باسه ۱۱۸

جدول ۵-۱۷: مقایسه تأثیر اضافه نمودن PMU و وسایل اندازه‌گیری سنتی برروی عدد وضعیت شبکه ۳۹ باسه ۱۱۸

فصل اول

مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۱-مقدمه

سیستمهای قدرت بوسیله اپراتورها از مراکز کنترل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. هدف اصلی اپراتور، نگهداشتن سیستم در شرایط نرمال امن[1] می‌باشد. تضمین این امر مستلزم یک مونیتورینگ پیوسته و هدفمند از شرایط سیستم و اطلاع از وضعیت موجود سیستم و همچنین تعیین اعمال پیشگیرانه لازم در حالتیکه سیستم شرایط نرمال غیر امن دارد، می‌باشد.

اولین گام جهت آنالیز امنیت شبکه، مونیتور نمودن وضعیت فعلی سیستم می‌باشد که این امر شامل جمع‌آوری داده‌های اندازه‌گیری شده از تمامی قسمتهای سیستم و سپس تجزیه و تحلیل آنها جهت تعیین وضعیت سیستم می‌باشد. اینکار در سیستمهای قدرت بوسیله تخمینگر حالت انجام می‌گیرد. در واقع تخمینگر حالت، هسته و محور اصلی بحث آنالیز امنیت[2] در شبکه خواهد بود که به مثابه یک فیلتر بین داده‌های خام برگرفته از وسایل اندازه‌گیری و بانک اطلاعاتی مورد نیاز برای ارزیابی وضعیت جاری سیستم عمل می‌نماید.

در ابتدا، شبکه‌های قدرت تنها توسط سیستمهای کنترل نظارتی مونیتور می‌شدند که اساساً مبتنی بر مونیتور و کنترل وضعیت بریکرها بودند. همچنین توان خروجی ژنراتورها و فرکانس سیستم برای استفاده در کنترل اتوماتیک تولید، توسط این سیستم مونیتور می‌شدند و این مراحل انجام گردید تا اولین سیستم SCADA[3] پایه‌گزاری گردید. در ادامه قابلیت جمع‌آوری داده از مقادیر زمان واقعی[4] متغیرهای سیستم از وسایل اندازه‌گیری به سیستم کنترل نظارتی افزوده گردید و هدف آن رسیدن به آنالیز واقعی از امن بودن سیستم برای تصمیم‌گیریهای بعدی بود. در حقیقت تجزیه و تحلیل اکثر موضوعات کاربردی در شبکه همچون آنالیز اتفاقات و پخش بار بهینه توانهای اکتیو و راکتیو بدون داشتن اطلاعات زمان واقعی از شبکه قدرت

---

[1] Secure
[2] Security analysis
[3] Supervisory Control And Data Acquisition
[4] Real time

امکان‌پذیر نمی‌باشد و توسعه و تکامل انجام شده در سیستمهای SCADA در همین راستا بوده است. بهرحال اطلاعات گرفته شده بوسیله SCADA همیشه قابل اطمینان نبوده و ممکن است، همراه با خطا در وسایل اندازه‌گیری و وسایل ارتباطی و... باشد. بعلاوه داده‌های موجود ممکن است، پاسخگوی وضعیت روشنی از سیستم نباشد. بعنوان مثال زوایای ولتاژ باسها اندازه‌گیری نمی‌شوند و همچنین اطلاعات مربوط به توان عبوری از خطوط در تمامی نقاط بدلیل عدم نصب وسایل اندازه‌گیری آماده و در دسترس نمی‌باشد. ازطرف دیگر نصب وسایل اندازه‌گیری در تمامی نقاط از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. بهمین دلیل ضرورت داشتن یک تخمینگر حالت امری اجتناب‌ناپزیر خواهد بود.

بطور کلی توابع موجود در یک تخمینگر حالت استاندارد بشرح زیر می‌باشد:[۱]

Topology processor: در این قسمت، اطلاعات مربوط به وضعیت سوئیچها و بریکرها جمع‌آوری شده و وضعیت سیستم از نظر توپولوژی مشخص می‌گردد.

Observability analysis: تعیین می‌کند که آیا حل معادلات تخمین حالت با توجه به تعداد وسایل اندازه‌گیری و محل نصب آنها امکان‌پذیر می‌باشد یا نه. همچنین تعیین شاخه‌های رؤیت‌ناپذیر و یا مناطقی از سیستم که رؤیت‌ناپذیر می‌باشند (جزایر رؤیت‌ناپذیر) از وظایف این قسمت می‌باشد.

State estimation solution: حل معادلات تخمین حالت با استفاده از داده‌های وسایل اندازه‌گیری و مدل سیستم و بدست آوردن دامنه ولتاژ و زاویه آن در باسهای شبکه در این قسمت انجام می‌پزیرد. همچنین برحسب نیاز، خروجی ممکن است توان تزریقی باسها، توان خطوط، وضعیت تپ ترانسفرمرها و خروجی ژنراتورها بوده و علاوه بر دامنه و زاویه ولتاژ، این اطلاعات نیز محاسبه و استخراج گردد.

Bad data processing: وجود و یا عدم وجود خطاهای احتمالی در داده‌های اندازه‌گیری شده توسط وسایل اندازه‌گیری، در این قسمت مشخص می‌گردد و در صورت وجود چنین داده‌هایی این اطلاعات از مجموعه اطلاعات اولیه حذف می‌گردند که این امر مستلزم اینست که افزونگی کافی در تعداد وسایل وجود داشته باشد تا حذف بعضی از آنها منجر به رؤیت‌ناپذیر شدن سیستم نگردد.

Parameter and structural error processing: تخمین پارامترهای مختلف در شبکه همچون پارامترهای موجود در مدل خطوط انتقال و وضعیت تپ‌چنجرها و خازنها و راکتورها در این قسمت انجام می‌پذیرد و در صورت مشاهده تفاوت با پارامترهای پیش فرض، وجود اشکال در توپولوژی شبکه مشخص می‌گردد.

در شکل (۱-۱) عملکرد یک تخمینگر حالت نمونه بصورت شماتیک نمایش داده شده است. همانطوریکه در شکل مشخص می‌باشد، داده‌های خام وسایل اندازه‌گیری که البته شامل وضعیت سوئیچها و بریکرها و تپ‌چنجرها نیز می‌باشد. توسط Topology processor مورد بررسی قرار می‌گیرند و ساختار و پیکره و توپولوژی سیستم قدرت برای تخمینگر حالت تعریف می‌گردد که همان مدل تک خطی سیستم خواهد بود. این مدل نه تنها مدل سیستم در منطقه عملیاتی EMS را در بر می‌گیرد، بلکه مدل مناطق همسایه و خارج از محدوده مورد نظر EMS را نیز شامل خواهد شد. بدیهی است اطلاعات و اندازه‌گیری بدست آمده از مناطق همسایه برای ساختن مدل این قسمت مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعلاوه ممکن است، مناطقی در داخل منطقه مورد نظر و یا بیرون آن باشند که بدلیل وجود خطاهای ارتباطی، کم بودن تعداد وسایل اندازه‌گیری و یا خطا در خود وسایل باعث رؤیت‌ناپذیر شدن قسمتی از سیستم گردند که کمبود آنها باید بوسیله داده‌های مجازی جبران گردد. این دسته از داده‌ها معمولاً از سوابق قبلی و یا پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت و برنامه‌ریزی تولید برای ژنراتورها استحصال می‌گردد.

طبیعتاً این اطلاعات دارای اعتبار کمتری بوده و برای آنها وزن کمتری در محاسبات در نظر گرفته خواهد شد. همانطوریکه از شکل (۱-۱) مشخص می‌باشد نتایج بدست آمده از تخمین حالت مشخص می‌نماید که سیستم قدرت در کدام وضعیت بهره‌برداری (نرمال، اضطراری و یا تجدیدشونده) قرار گرفته است. در صورتیکه سیستم در وضعیت نرمال باشد، آنالیز اتفاقات باید در ادامه انجام گیرد تا امنیت سیستم مشخص گردد. در صورتیکه نتیجه آنالیز، امن نبودن سیستم باشد، باید اقدامات اصلاحی مورد نیاز صورت گیرد که اینکار از طریق یک نرم افزار شامل پخش بار بهینه انجام گرفته تا در نهایت استراتژی لازم برای خروج سیستم از وضعیت غیر امن معلوم گردد و سیستم به وضعیت نرمال امن باز گردد. همچنین در صورتیکه وضعیت سیستم اضطراری و یا تجدیدشونده تشخیص داده شود، باید اقدامات کنترلی مناسب جهت مهار وضعیت حادث شده، صورت پذیرد.

داده‌های خروجی تخمینگر حالت در اکثر قسمتهای سیستم مدیریت انرژی همچون آنالیز اتفاقات، کنترل اتوماتیک تولید، پیش‌بینی بار و پخش بار بهینه و... کاربرد دارد. همچنین این اطلاعات بطور همزمان برای استفاده جهت طراحی و توسعه روی شبکه بصورت off-line استفاده می‌شود.