





دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در مهندسی برق
گرایش قدرت

عنوان

طراحی تخمین گر حالت پویا در سیستم قدرت
با در نظر گرفتن اولویت بندی برای گره های شبکه

نگارنده

حمید ملانیا

استاد راهنما

دکتر مجید علومی بایگی

خرداد ۹۶

تعهدنامه

اینجانب حمید ملانیا به شماره دانشجویی ۹۲۱۳۴۰۳۱۳۶ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - قدرت دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده پایان نامه: طراحی تخمین گر حالت پویا در سیستم قدرت با در نظر گرفتن اولویت بندی برای گره های شبکه، تحت راهنمایی جناب آقای دکتر مجید علومی بایگی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه فردوسی مشهد » و یا « Ferdowsi University of Mashhad » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله/پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

سپاس و تقدیر

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود، عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. ضمن تقدیر و تشکر شایسته از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر مجید علومی بایگی که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راهگشای اینجانب در اتمام و اکمال پایان‌نامه بوده است، این پایان‌نامه را تقدیم به پدرم به استواری کوه، مادرم به زلالی چشمه و خواهرانم به صمیمیت باران می‌کنم.

حمید ملانیا

۱ تیرماه ۹۶



بسمه تعالی

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله/پایان نامه: طراحی تخمین گر حالت پویا در سیستم قدرت با در نظر گرفتن اولویت بندی برای گره های شبکه

نام نویسنده: حمید ملانیا

نام استاد(ان) راهنما: دکتر مجید علومی بایگی

دانشکده: مهندسی

گروه: برق

رشته تحصیلی: مهندسی برق - قدرت

تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۲/۲۲

تاریخ دفاع: ۱۳۹۶/۳/۲۹

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ●

دکتری ○

تعداد صفحات: ۹۹ صفحه

چکیده رساله/پایان نامه:

به منظور مدیریت صحیح شبکه و جلوگیری از بروز خاموشی های گسترده همواره بهره بردار مستقل سیستم به دنبال رصد لحظه ای متغیرهای سیستم قدرت از قبیل سطح ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط انتقال و توان مصرفی و تولیدی گره های مختلف سیستم است. به همین منظور ابزارهای اندازه گیری نصب شده در نقاط مختلف شبکه، متغیرهای شبکه را اندازه گیری می کنند و اطلاعات توسط بسترهای ارتباطی متفاوت، به بهره بردار سیستم منتقل می شود. بدلیل وجود خطا در دستگاه های اندازه گیری و احتمال تغییر در بستر مخابراتی، بهره بردار مستقل شبکه می بایست با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده تخمین مناسبی از متغیرهای حالت را بدست آورد. با توجه به پیچیدگی و به هم پیوستگی شبکه قدرت، نقص در اطلاعات جمع آوری شده و حملات سایبری که شبکه قدرت کنونی با آن ها روبروست، لازم است در برخی از فرآیندهای سیستم قدرت نظیر تخمین حالت که از جانب این خطرهای بالقوه مورد تهدید قرار می گیرند، بازنگری صورت گیرد. در این پایان نامه با هدف کاهش حجم محاسبات در فرآیند تخمین حالت و کاهش وابستگی فرآیند به خطای دستگاه های اندازه گیری، داده های اندازه گیری دست کاری شده یا نرسیده به بهره بردار، یک روش تخمین حالت پویا ارائه شده است. تخمین حالت پویا از دو مرحله ی کلی پیش بینی و فیلترگذاری تشکیل شده است. در این پژوهش، مرحله ی پیش بینی با توجه وابستگی زیاد متغیر حالت زاویه به توان اکتیو، وابستگی زیاد متغیر حالت اندازه ولتاژ به توان راکتیو، و تاثیرپذیری متغیرهای حالت هر گره به متغیرهای تخمینی لحظات قبل همان گره و گره های متصل به آن، انجام شده است. در مرحله ی فیلترگذاری به منظور افزایش سرعت و کاهش حجم محاسبات در فرآیند تخمین، گره های شبکه براساس میزان توان عبوری، ارتباط با دیگر گره ها و در دسترس بودن اطلاعات، به سه دسته تقسیم بندی شده اند. دسته ی اول، گره هایی است که اطلاعات آن ها به علت نقص در سیستم مخابراتی و یا حملات سایبری برای تخمین حالت به موقع به دست بهره بردار شبکه نمی رسد. دسته ی دوم، گره های عادی شبکه می باشند که از درجه اهمیت بالا برخوردار نیستند. دسته ی سوم، گره های خاص، که از درجه اهمیت بالایی برخوردار هستند. برای تخمین متغیرهای حالت گره های نوع اول، دوم و سوم به ترتیب از روش های پیش بینی با توجه به متغیرهای حالت تخمینی در لحظه ی قبل، تخمین حالت ایستا و تخمین حالت پویای پیشنهادی استفاده شده است. در انتها روش پیشنهادی به شبکه ی ۱۴ گره ی استاندارد IEEE اعمال شده است. از داده های نرمالیزه شده ی شبکه ی مستقل نیویورک در دو روز متوالی، ۲۱ و ۲۲م ماه مارس سال ۲۰۱۶، به عنوان داده های تخمینی لحظات قبل و از اطلاعات شبکه ی استاندارد IEEE به عنوان اطلاعات صحیح و بدون خطای لحظه ی تخمین استفاده شده است. به منظور نزدیک شدن به حالت

واقعی در هر آزمایش تعداد هزار خطای مختلف با واریانس‌های مشخص به اطلاعات صحیح اضافه شده و به عنوان اطلاعات اندازه-گیری شده در لحظه‌ی تخمین استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی اثر افزایش خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری، نرسیدن اطلاعات گره‌های مختلف شبکه به مرکز کنترل، انتخاب ترکیب‌های مختلف از گره‌ها به عنوان گره مهم و دست‌کاری اطلاعات در گره‌ها و خطوط، با دو شاخص عملکرد خطای نسبی متغیرهای حالت و خطای نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از سرعت مطلوبی برخوردار است. همچنین این روش در مقابل افزایش خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری و دست‌کاری یا نرسیدن اطلاعات برخی گره‌های شبکه، مقاوم بوده و می‌تواند تخمین مناسبی از متغیرهای حالت را حاصل نماید.	
کلید واژه: ۱- تخمین حالت ۲- حمله سایبری ۳- پیش‌بینی متغیر حالت ۴- اولویت‌بندی ۵- سیستم مخابراتی	امضای استاد راهنما: تاریخ:

چکیده

به منظور مدیریت صحیح شبکه و جلوگیری از بروز خاموشی‌های گسترده همواره بهره‌بردار مستقل سیستم به دنبال رصد لحظه‌ای متغیرهای سیستم قدرت از قبیل سطح ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط انتقال و توان مصرفی و تولیدی گره‌های مختلف سیستم است. به همین منظور ابزارهای اندازه‌گیری نصب شده در نقاط مختلف شبکه، متغیرهای شبکه را اندازه‌گیری می‌کنند و اطلاعات توسط بسترهای ارتباطی متفاوت، به بهره‌بردار سیستم منتقل می‌شود. بدلیل وجود خطا در دستگاه‌های اندازه‌گیری و احتمال تغییر در بستر مخابراتی، بهره‌بردار مستقل شبکه می‌بایست با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده تخمین مناسبی از متغیرهای حالت را بدست آورد. با توجه به پیچیدگی و به هم پیوستگی شبکه قدرت، نقص در اطلاعات جمع‌آوری شده و حملات سایبری که شبکه قدرت کنونی با آن‌ها روبروست، لازم است در برخی از فرآیندهای سیستم قدرت نظیر تخمین حالت که از جانب این خطرهای بالقوه مورد تهدید قرار می‌گیرند، بازنگری صورت گیرد. در این پایان‌نامه با هدف کاهش حجم محاسبات در فرآیند تخمین حالت و کاهش وابستگی فرآیند به خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری، داده‌های اندازه‌گیری دست‌کاری شده یا نرسیده به بهره‌بردار، یک روش تخمین حالت پویا ارائه شده است. تخمین حالت پویا از دو مرحله کلی پیش‌بینی و فیلترگذاری تشکیل شده است. در این پژوهش، مرحله پیش‌بینی با توجه وابستگی زیاد متغیر حالت زاویه به توان اکتیو، وابستگی زیاد متغیر حالت ولتاژ به توان راکتیو، و تاثیرپذیری متغیرهای حالت هر گره به متغیرهای تخمینی لحظات قبل همان گره و گره‌های متصل به آن، انجام شده است. در مرحله فیلترگذاری به منظور افزایش سرعت و کاهش حجم محاسبات در فرآیند تخمین، گره‌های شبکه براساس میزان توان عبوری، ارتباط با دیگر گره‌ها و در دسترس بودن اطلاعات، به سه دسته تقسیم بندی شده‌اند. دسته اول، گره‌هایی است که اطلاعات آن‌ها به علت نقص در سیستم مخابراتی و یا حملات سایبری برای تخمین حالت به موقع به دست بهره‌بردار شبکه نمی‌رسد. دسته دوم، گره‌های عادی شبکه می‌باشند که از درجه اهمیت بالا برخوردار نیستند. دسته سوم، گره‌های خاص، که از درجه اهمیت بالایی برخوردار هستند. برای تخمین متغیرهای حالت گره‌های نوع اول، دوم و سوم به ترتیب از روش‌های پیش‌بینی با توجه به متغیرهای حالت تخمینی در لحظه قبل، تخمین حالت ایستا و تخمین حالت پویای پیشنهادی استفاده شده - است. در انتها روش پیشنهادی به شبکه‌ی ۱۴ گرهی استاندارد IEEE اعمال شده است. از داده‌های نرمالیزه شده‌ی شبکه‌ی مستقل نیویورک در دو روز متوالی، ۲۱ و ۲۲م ماه مارس سال ۲۰۱۶، به عنوان

داده‌های تخمینی لحظات قبل و از اطلاعات شبکه‌ی استاندارد IEEE به عنوان اطلاعات صحیح و بدون خطای لحظه‌ی تخمین استفاده شده است. به منظور نزدیک شدن به حالت واقعی در هر آزمایش تعداد هزار خطای مختلف با واریانس‌های مشخص به اطلاعات صحیح اضافه شده و به عنوان اطلاعات اندازه‌گیری شده در لحظه‌ی تخمین استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی اثر افزایش خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری، نرسیدن اطلاعات گره‌های مختلف شبکه به مرکز کنترل، انتخاب ترکیب‌های مختلف از گره‌ها به عنوان گره مهم و دست‌کاری اطلاعات در گره‌ها و خطوط، با دو شاخص عملکرد خطای نسبی متغیرهای حالت و خطای نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از سرعت مطلوبی برخوردار است. همچنین این روش در مقابل افزایش خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری و دست‌کاری یا نرسیدن اطلاعات برخی گره‌های شبکه، مقاوم بوده و می‌تواند تخمین مناسبی از متغیرهای حالت را حاصل نماید.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: طرح مسئله	۱
۱-۱	انگیزه پژوهش	۱
۲-۱	فرضیات مسئله	۵
۳-۱	تعریف مسئله	۶
۴-۱	اهداف	۷
۵-۱	مروری بر پایان نامه	۸
۲	فصل دوم: مقدمات تخمین حالت در سیستم قدرت و چالش‌های آن	۹
۱-۲	مقدمه	۹
۲-۲	ساختار شبکه قدرت	۱۰
۳-۲	مقدمات تخمین حالت در سیستم قدرت	۱۱
۱-۳-۲	متغیرهای حالت و انواع تجهیزات اندازه‌گیری	۱۳
۲-۳-۲	ترکیب دستگاه‌های اندازه‌گیری	۱۴
۳-۳-۲	پیش‌بینی متغیرهای تصادفی و مفهوم روند	۱۵
۴-۲	چالش‌های پیش‌رو در فرآیند تخمین حالت	۱۶
۱-۴-۲	پدیده‌ی اطلاعات ناقص در شبکه	۱۶
۲-۴-۲	حمله‌ی سایبری	۱۸
۱-۲-۴-۲	انواع حملات سایبری	۱۸
۲-۲-۴-۲	تاثیر حملات سایبری و نمونه‌هایی از این آسیب‌پذیری‌ها	۲۰
۳	فصل سوم: روش‌های تخمین حالت	۲۳
۱-۳	مقدمه	۲۳
۲-۳	تخمین حالت ایستا و روش حداقل مربعات وزن‌دار	۲۵
۱-۲-۳	مدل ساده شده‌ی خطی	۲۷
۲-۲-۳	مدل کامل‌تر غیرخطی	۲۶
۳-۳	وارد کردن خطای نرمال به معادلات تخمین حالت	۲۸

۳۰	تخمین حالت پویا	۴-۳
۳۲	پیش‌بینی متغیرهای حالت	۳-۴-۱
۳۴	مرحله‌ی فیلترگذاری و روش‌های پایه فیلتر کالمن	۳-۴-۲
۳۹	تخمین حالت متمرکز و غیرمتمرکز	۳-۵
۳۹	تخمین گر حالت متمرکز	۳-۵-۱
۴۰	تخمین گر حالت غیر متمرکز	۳-۵-۲
۴۱	فصل چهارم: طراحی تخمین گر پویای متغیرهای حالت در شبکه قدرت	۴
۴۱	مقدمه	۴-۱
۴۲	مدل‌سازی و مقدمات مسئله	۴-۲
۴۳	روابط پخش بار و معادلات حاکم بر شبکه	۴-۲-۱
۴۳	مقدمات فرآیند تخمین حالت	۴-۲-۲
۴۸	طراحی تخمین گر پویا	۴-۳
۴۹	الویت‌بندی گره‌های شبکه	۴-۳-۱
۵۰	روش پیشنهادی برای پیش‌بینی متغیرهای حالت	۴-۳-۲
۵۴	روش پیشنهادی برای فیلتر پویای متغیرهای حالت	۴-۳-۳
۶۰	فصل پنجم: شبیه‌سازی و تحلیل نتایج	۵
۶۰	مقدمه	۵-۱
۶۱	اطلاعات شبکه آزمون	۵-۲
۶۸	اثر افزایش خطای ابزار اندازه‌گیری	۵-۳
۶۸	اثر افزایش خطا در حالت بدون داده‌ی نرسیده	۵-۳-۱
۷۰	اثر افزایش خطا با داده‌های نرسیده	۵-۳-۲
۷۴	بررسی حالات مختلف برای گره‌های مهم	۵-۴
۷۴	اثر در نظر گرفتن گره‌های مختلف به عنوان گره مهم	۵-۴-۱
۷۵	تاثیر انتخاب گره بدون اندازه‌گیر به عنوان گره مهم	۵-۴-۲
۷۶	انتخاب گره‌های تاثیرگذار به عنوان گره مهم	۵-۴-۳

۵-۵-۵	مقایسه تاثیر داده‌ی نرسیده و دست‌کاری شده در اندازه‌گیری‌های خطوط و گره‌های شبکه قدرت.....	۷۷
۵-۵-۱	مقایسه تاثیر از دست دادن اندازه‌گیر در خطوط و گره‌ها.....	۷۷
۵-۵-۲	مقایسه تاثیر دست‌کاری مقادیر اندازه‌گیری شده بین خطوط و گره‌ها.....	۷۸
۵-۶	جمع‌بندی	۸۱
۶	فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۸۳
۶-۱	نتیجه‌گیری	۸۳
۶-۲	پیشنهادهای	۸۷
	مراجع	۸۸
	پیوست‌ها.....	۹۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ نمودار بلوکی سیستم مدیریت انرژی ۱۲
- شکل ۲-۲ ارتباط تجهیزات ثبت داده، سیستم اسکادا و مرکز کنترل ۱۲
- شکل ۳-۲ نمایی از ترکیب تجهیزات ثبت داده‌ی به‌روز و سنتی ۱۴
- شکل ۴-۲ مفهوم روند متغیرهای تصادفی ۱۶
- شکل ۵-۲ سیستم ارتباطی در شبکه اسکادا ۱۸
- شکل ۱-۳ نمودار بلوکی تخمین حالت در سیستم قدرت ۲۴
- شکل ۲-۳ فلوچارت تخمین حالت ایستا ۲۹
- شکل ۳-۳ نمای کلی شبکه ۱۴ گره IEEE در تخمین گر غیر متمرکز ۴۱
- شکل ۱-۴ روند زمانی فرآیند تخمین حالت پویا ۵۰
- شکل ۲-۴ شبکه ۱۴ گره IEEE ۵۲
- شکل ۳-۴ ارتباط گره‌ها با یکدیگر ۵۴
- شکل ۱-۵ شبکه ۱۴ گره IEEE و مکان قرارگیری اندازه‌گیری ۶۴
- شکل ۲-۵ توزیع خطای نرمال ۶۶
- شکل ۳-۵ توزیع چگالی احتمال اندازه‌گیر توان تزریقی ۶۷
- شکل ۴-۵ خطای خروجی مقادیر اندازه‌گیری شده به ازای ضرایب متفاوت واریانس ۷۰
- شکل ۵-۵ مقایسه تخمین گر حالت پویا و ایستا به ازای ضرایب متفاوت واریانس ۷۱
- شکل ۶-۵ خطای خروجی مقادیر متغیرهای حالت به ازای ضرایب متفاوت واریانس ۷۲
- شکل ۷-۵ خطای خروجی مقادیر اندازه‌گیری شده به ازای ترکیب‌های مختلف نرسیدن اطلاعات گره‌ها ۷۳
- شکل ۸-۵ میانگین خطای خروجی بعد از حذف آزمایش‌های واگرا شده ۷۴
- شکل ۹-۵ خطای خروجی مقادیر اندازه‌گیری شده به ازای نرسیدن اطلاعات گر های مختلف در مقایسه با یکدیگر ۷۵
- شکل ۱۰-۵ اثر افزایش تعداد گره‌های مهم در خطای خروجی ۷۶
- شکل ۱۱-۵ اثر انتخاب ترکیب‌های سه‌تایی از گره‌ها به عنوان گره‌های مهم در خطای خروجی ۷۷
- شکل ۱۲-۵ تاثیر انتخاب گره بدون اندازه‌گیر به عنوان گره مهم ۷۸
- شکل ۱۳-۵ اثر انتخاب گره ۱۰ به عنوان گره مهم در خطای خروجی ۷۹

- شکل ۵-۱۴ خطای خروجی به ازای نرسیدن اطلاعات اندازه‌گیرهای نصب شده در گره‌ها ۸۰
- شکل ۵-۱۵ خطای خروجی به ازای نرسیدن اطلاعات اندازه‌گیرهای نصب شده در خطوط ۸۰
- شکل ۵-۱۶ خطای خروجی به ازای تغییر اطلاعات گره‌ها ۸۲
- شکل ۵-۱۷ خطای خروجی به ازای تغییر اطلاعات خطوط ۸۲
- شکل ۵-۱۸ خطای خروجی متغیرهای حالت به ازای تغییر اطلاعات گره‌ها ۸۳

فهرست جداول

جدول ۵-۱	مقادیر ثبت شده توسط اندازه‌گیرهای موجود در گره‌ها.....	۶۴
جدول ۵-۲	مقادیر ثبت شده توسط اندازه‌گیرهای موجود در خطوط.....	۶۵
جدول ۵-۳	ترکیب‌های مختلف نرسیدن اطلاعات و تعداد آزمون‌ها.....	۷۳
جدول ۵-۴	اندازه‌گیرهای تغییر کرده در گره‌ها.....	۸۱
جدول ۵-۵	اندازه‌گیرهای تغییر کرده در خطوط.....	۸۲
جدول ۱	اطلاعات بار در لحظه‌ی تخمین حالت (داده‌ی شبکه استاندارد IEEE).....	۹۳
جدول ۲	کمیات ژنراتورهای شبکه ۱۴ گره‌ی IEEE.....	۹۳
جدول ۳	کمیات خطوط انتقال شبکه ۱۴ گره‌ی IEEE.....	۹۴
جدول ۴	اطلاعات نرمالیزه شده‌ی بار در شبکه‌ی مستقل نیویورک در روزهای ۲۱ و ۲۲م ماه مارس سال ۲۰۱۶ میلادی.....	۹۵

فصل اول: طرح مسئله

۱-۱- انگیزه پژوهش

شبکه‌ی قدرت، یکی از بزرگترین دستاوردهای مهندسی، در قرن بیستم محسوب می‌شود که از اوایل قرن بیست و یکم دستخوش تغییرات بسیاری بوده است. به خاطر کاهش اثرات زیست محیطی و تولید کربن کمتر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر همچون سلول‌های فتوولتاییک^۱ (PV) و توربین‌های بادی مورد توجه قرار گرفته است [۶]. با ورود انرژی‌های نو به شبکه‌ی برق و افزایش روز افزون مصرف، شبکه‌ی قدرت تبدیل به سیستم پویا و بزرگی شده است، به تبع شبکه‌ی کنونی نیاز به ابزارهای کنترلی و تحلیل‌های به‌روزتری دارد. به منظور پایش و کنترل بهینه و قابل انعطاف این چنین سیستم پیچیده‌ای، تجهیزات جمع‌آوری اطلاعات همچون اسکادا^۲، به عنوان زیربنای فن‌آوری اطلاعات^۳ (IT) در سیستم قدرت، باید با استفاده از حسگرها و فن‌آوری‌های شبکه گسترش یابند همچنین استفاده از

^۱ Photo Voltaic

^۲ Supervisory Control And Data Acquisition

^۳ Information Technology

دستگاه‌های اندازه‌گیری به‌روز همچون واحد اندازه‌گیر فازور^۱ و فن‌آوری‌های جدید ارتباطی، باید مورد توجه قرار گیرد [۲۱].

واحدهای اندازه‌گیر فازور، دستگاه‌های اندازه‌گیری پیشرفته‌ای می‌باشند که از سال ۱۹۸۰ به منظور ثبت و ارسال اطلاعات شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این دستگاه‌های اندازه‌گیری قابلیت ثبت همزمان اندازه‌ی ولتاژ و جریان و همچنین زاویه‌ی فاز را دارا می‌باشند. واحدهای اندازه‌گیر فازور برخلاف دستگاه‌های اندازه‌گیری قدیمی، واحدهای ترمینال از راه دور^۲، دارای فرکانس نمونه‌برداری به مراتب بالاتری می‌باشند همچنین تمامی واحدهای اندازه‌گیر فازور مجهز به GPS^۳ و سیستم ثبت زمان نمونه‌برداری می‌باشند. زمانی که تعداد کافی از این دستگاه‌های اندازه‌گیری جدید در سیستم قدرت وجود داشته باشد، تمامی متغیرهای حالت سیستم قدرت قابل اندازه‌گیری می‌باشند. تعویض تمامی واحدهای ترمینال از راه دور با این دستگاه‌های اندازه‌گیری جدید برای اهداف پیش‌بینی و بررسی حالات سیستم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست، به همین دلیل همواره تحلیل‌ها و پژوهش‌های بسیاری برای بهترین حالت ترکیب واحدهای ترمینال از راه دور و واحدهای اندازه‌گیر فازور و همچنین بهترین تخمین متغیرهای حالت از روی دستگاه‌های قدیمی اندازه‌گیری انجام گرفته است. با وجود این که واحدهای اندازه‌گیر فازور، اندازه‌گیری بسیار دقیق و زمان‌داری را انجام می‌دهند، اما سیستم ارتباطی که وظیفه انتقال اطلاعات از ابزارهای ثبت داده به مرکز کنترل را برعهده دارد، در شبکه‌ی قدرت نقش بسیاری حساسی را ایفا می‌کند [۴۳].

براساس طول خط انتقال و توانایی‌های مناطق مختلف، فن‌آوری‌های ارتباطی متفاوتی از قبیل خط انتقال برق، شبکه‌ی سیمی و شبکه‌ی بیسیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. خطوط انتقال برق که عموماً برای انتقال انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند، با استفاده از تکنیک‌های مدولاسیون سیگنال^۴ قابلیت انتقال اطلاعات را دارند که عموماً برای انتقال اطلاعات بین دو ترانسفورماتور که سیگنالی نمی‌تواند در

^۱ Phasor Measurement Unit

^۲ Remote Terminal Unit

^۳ Global Positioning System

^۴ Signal Modulation Techniques

ناحیه بین این دو منتقل شود، استفاده می‌گردد. خطوط سیمی که از طریق خط تلفن یا کابل های فیبر نوری می‌توانند ارتباط قابل اعتمادی را برای حتی مناطق دور از هم فراهم آورند. این شیوه‌ی ارتباطی نیازمند سرمایه‌گذاری بسیاری برای ارتباط تمام نقاط این شبکه‌ی پیچیده‌ی کنونی قدرت می‌باشد. در مقایسه با شبکه‌ی سیمی، شبکه‌ی بیسیم دارای فوایدی از قبیل هزینه نگهداری و نصب کم و سهولت در ارتباطات می‌باشد اما دارای مضراتی از قبیل حساسیت بالاتر نسبت به اختلالات خارجی و نویز می‌باشد که کیفیت و امنیت انتقال را پایین می‌آورد. اگرچه استفاده از شبکه‌های جدید قابلیت و کارایی سیستم اسکادا را بهبود بخشیده است اما همچنان محدودیت‌های پهنای باند در انتقال حجم وسیعی از اطلاعات برای مسافت‌های دور از هم وجود دارد [۵]. در چنین حالتی ممکن است پدیده‌های ناشی از شبکه همچون تاخیر در انتقال اطلاعات، ناهماهنگی در ارسال داده‌ها از بخش‌های مختلف، از دست رفتن بسته‌های انتقالی داده و غیره رخ دهند [۲]. به عنوان مثال در مرجع [۹] بر طبق گزارش سیستم مدیریت برق بانویل^۱ برای انتقال بسته‌های داده از دستگاه اندازه‌گیری به مرکز کنترل، با استفاده از مودم تاخیر ۶۰-۱۰۰ میلی ثانیه و با استفاده فیبرنوری دیجیتالی ۳۰ میلی ثانیه تاخیر ایجاد می‌گردد. در نتیجه پدیده‌های ناشی از شبکه باعث می‌شوند تا مرکز کنترل اطلاعات ناقصی از دستگاه‌های اندازه‌گیری در اختیار داشته باشند. یا به عبارت دیگر استفاده‌ی فراگیر از شبکه‌های ارتباطی موجب آسیب‌پذیری در مقابل حملات سایبری می‌شود، از آنجاییکه شبکه‌ی قدرت یک سیستم به هم پیوسته‌ی سایبری- فیزیکی می‌باشد، حملات سایبری می‌تواند باعث به اشتباه انداختن بهره بردار شبکه و به تبع تاثیر در پویایی فیزیکی سیستم قدرت شود. یک ایده‌ی به ظاهر طبیعی برای رسیدگی به مسائل ناشی از شبکه همچون اندازه‌گیری‌های متنوع، اطلاعات ناقص و حملات سایبری، گسترش تعداد واحدهای اندازه‌گیر فازور و بهبود زیربنای شبکه ارتباطی به منظور ارتباطی امن و با تاخیر کم در سیستم اسکادا می‌باشد [۱ و ۳]. متأسفانه به خاطر محدودیت‌های فن‌آوری و اقتصادی، رسیدن به این هدف در سال‌های نزدیک میسر نمی‌باشد، در نتیجه گسترش روشهای جدید و به روز رسانی نرم‌افزار سیستم مدیریت انرژی^۲ موجود چه از نظر عملی و تئوری مهم و قابل توجه است. در این پایان‌نامه توجه بیشتر ما بر تخمین

^۱ Bonneville^۲ Energy Management System

حالت سیستم قدرت^۱ می‌باشد. تخمین حالت در سیستم قدرت به منظور پایش لحظه‌ای متغیرهای حالت است و به سیستم مدیریت انرژی امکان عملیات بهینه‌سازی و کنترلی از قبیل یافتن داده‌ی غلط، پی بردن به حملات سایبری، اشکالات موجود در شبکه‌ی قدرت و پخش بار بهینه را می‌دهد. روش‌های قدیمی تخمین حالت که در مرکز کنترل مورد استفاده قرار می‌گرفتند، به منظور استفاده از داده‌ی واحدهای ترمینال از راه دور و تحت آسیب‌پذیری‌های قدیمی طراحی شده بودند در نتیجه با توجه به تفاوت‌های دستگاه‌های اندازه‌گیری کنونی و آسیب‌پذیری‌های جدید سایبری در شبکه‌ی قدرت کنونی روش‌های قدیمی دیگر پاسخگو نیستند، به همین منظور تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است.

اطلاعات ناقصی که به دلیل پدیده‌های شبکه به مرکز کنترل می‌رسند، در روش‌های قدیمی در نظر گرفته نمی‌شدند، طبیعی است که روش‌های قدیمی دیگر نمی‌توانند دقت و صحت تخمین صورت گرفته را تحت پدیده‌های کنونی ناشی از شبکه همچون تاخیر در شبکه، نقص اطلاعات و حملات سایبری تضمین کنند. در نتیجه احتیاج به تخمین حالتی که در برابر اطلاعات ناقص مقاوم بوده و همچنین بتواند در مقابل پدیده‌های کنونی شبکه واکنش مناسبی نشان دهد، وجود دارد. حملات سایبری متنوعی با اهدافی متفاوت می‌تواند شبکه‌ی قدرت کنونی را تهدید کند، یکی از این نوع حملات که در چند سال اخیر توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است، حمله‌ی تزریق داده‌ی غلط یا FDI^۲ می‌باشد [۷ و ۱۰]، این نوع حمله می‌تواند موجب تغییر اندازه‌گیری‌ها و به تبع آن تغییر متغیرهای حالت سیستم قدرت و به اشتباه انداختن بهره‌بردار شبکه گردد. در نتیجه بهبود آسیب‌پذیری‌های روش‌های تخمین حالت کنونی و ارائه‌ی روش‌های مؤثر شناسایی حمله و مکانیزم‌های حفاظتی از داده‌های سیستم قدرت ضروری است [۱۲].

^۱ Power System State Estimation

^۲ False Data Injection

۱-۲- فرضیات مسئله

- یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته شامل بازار ساعت بعد^۱ را در نظر بگیرید. فرض کنید که
- در بازار ساعت بعد بازیگران بازار شامل تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان برای ساعت پیش-رو، پیشنهادهای خود را ارائه می‌دهند.
 - بهره‌بردار بازار با بیشینه کردن رفاه اجتماعی و در نظر گرفتن قیود فنی واحدها و شبکه میزان تولید هر شرکت و قیمت راتعیین و نتایج بازار را اعلام می‌کند.
 - سیستم‌های جمع‌آوری داده که مسئولیت جمع‌آوری داده‌ها را از سراسر شبکه، از طریق ابزارهای اندازه‌گیری همچون واحد اندازه‌گیر فازور و واحدهای ترمینال از راه دور برعهده دارند، اطلاعات را ثبت و در زمان اجرا (تحویل واقعی توان)، داده‌های ثبت شده در شبکه از طریق خطوط انتقال اطلاعات همچون شبکه‌های سیمی و بی‌سیم به مرکز کنترلی منتقل می‌شوند.
 - در مرکز کنترل با استفاده از روشهای تخمین حالت، متغیرهای اساسی شبکه به منظور اهداف کنترلی و برنامه‌ریزی تخمین زده می‌شوند.
 - بر اساس نتایج حاصل از تخمین حالت، پخش بار مجدد با هدف کمترین تغییرات به منظور ارضای قیود فنی شبکه انجام می‌شود و بر اساس آن قیمت‌های حدی گرهی در زمان اجرا محاسبه می‌شوند.
- حال اگر در زمان اجرا اطلاعات ابزارهای اندازه‌گیری به صورت نادرست و یا در زمان نامناسب به عنوان مثال تاخیر زیاد و یا به صورت ناقص در اختیار بهره‌بردار شبکه قرار بگیرد، منجر به برداشت نادرست از نقطه کار سیستم یعنی برداشت نادرست از میزان توان خطوط و تولید واحدها خواهد شد. در برخی شرایط تغییرات کوچک در مقادیر قرائت شده از ابزارهای اندازه‌گیری می‌تواند تاثیرات محسوسی در ارزیابی وضعیت شبکه بگذارد. در این پایان‌نامه روشی برای تخمین حالت پویا در شبکه‌ی برق ارائه

¹ Hour-ahead Market

می‌گردد، تا علاوه بر اینکه در مقابل داده‌های نرسیده به دست بهره‌بردار شبکه مقاوم بوده، دارای خطای تخمین نسبتاً کم، و سرعت مناسب به منظور برآورده کردن نیاز شبکه‌ی برق باشد.

۱-۳- تعریف مسئله

فرض می‌کنیم تجهیزات موجود در شبکه از نوع سنتی است. اطلاعات برداشت شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری ممکن است در اثر پدیده‌های حاصل از شبکه همچون تاخیر در ارسال اطلاعات، ناهماهنگی در ارسال اطلاعات، اطلاعات به صورت ناقص به دست بهره‌بردار شبکه برسد. این مشکلات ممکن است در اثر محدودیت‌های موجود در شبکه‌ی انتقال داده همچون محدودیت در حجم ارسالی از طریق خطوط ارتباطی و یا به صورت عمدی از طریق یک یا چند حمله سایبری سودجویانه به منظور ارسال اطلاعات غلط به مرکز کنترل، در شبکه رخ دهد. در حالت کلی هدف از ارسال اطلاعات غلط از وضعیت فعلی سیستم به بهره‌بردار شبکه می‌تواند متفاوت باشد. یکی از پیچیده‌ترین نوع حملات، دست کاری گروهی از ابزارهای اندازه‌گیری مرتبط با هم به منظور تغییر نقطه کار سیستم است به گونه‌ای که به راحتی قابل شناسایی نباشد. در این پایان‌نامه به دنبال آن هستیم تا تخمین گر حالت را به گونه‌ای طراحی نماییم که ضمن مقاوم بودن در برابر دریافت داده‌های غلط یا ناقص، در تخمین حالت به اهمیت گره‌ها از نظر میزان توان عبوری و تاثیر در شبکه توجه نماید. هدف نهایی این پایان‌نامه طراحی الگوریتمی برای تخمین حالت پویاست بگونه‌ای که تغییرات عمدی و غیرعمدی اطلاعات شبکه تاثیر زیادی بر فرآیند تخمین حالت نداشته باشد و در نتیجه آن تغییر داده‌ها، سبب برداشت نادرست بهره‌بردار از شرایط شبکه و تغییر در نقطه تسویه بازار، در زمان اجرا نگردد و از نقل و انتقالات مالی غیر عادلانه ناشی از حملات سایبری جلوگیری نماید. همانطور که می‌دانیم معادلات حاکم بر شبکه که رابطه‌ی بین مقادیر صحیح اندازه‌گیری شده را با متغیرهای حالت بیان می‌کنند غیر خطی هستند. تغییرات کوچکی در قرائت ابزار اندازه‌گیری ممکن است سبب تغییرات عمده‌ای در متغیرهای حالت که در مرکز کنترل برای اهداف پیش‌بینی و برنامه ریزی و حفاظت بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند، شود. تغییر در این متغیرهای اساسی شبکه، حتی می‌تواند منجر به برآورده کردن اهداف تروریستی و سودجویانه همچون تغییر قیمت‌های تسویه بازار شود. در این پایان‌نامه مدل غیرخطی برای شبکه‌ی قدرت در نظر گرفته شده است. گره‌های شبکه‌ی مورد مطالعه از نظر میزان اهمیت تقسیم‌بندی شده‌اند، تا علاوه بر اینکه عملیات محاسباتی در الگوریتم تخمین حالت سریع‌تر شود، بروی گره‌هایی که در شبکه تاثیرگذار تر هستند و