٨٧/١/١٠١٠٨٤
٨٧/٧/٨

١٠٨٦٤٢

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه برق

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی برق گرایش قدرت

مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین استاتیکی حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت با استفاده از الگوریتم ژنتیک

استاد راهنما:

دکتر بهزاد میزرائیان دهکردی

استاد مشاور:

دکتر آرش کیومرثی

پژوهشگر:

فریبرز حقیقت‌دار فشارکی

مهرماه ۱۳۸۷

۱۰۸۶۴۲

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.

شیوه نگارش پایان نامه
رعایت شده است.
تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه برق

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی برق گرایش قدرت آقای فریبرز حقیقت‌دار فشارکی

تحت عنوان

مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین استاتیکی حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در تاریخ ۸۷/۷/۱۷ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	آقای دکتر بهزاد میرزائیان دهکردی	با مرتبه‌ی علمی استادیار	امضا
۲- استاد مشاور پایان نامه	آقای دکتر آرش کیومرثی	با مرتبه‌ی علمی استادیار	امضا
۳- استاد داور داخل گروه	آقای دکتر رحمت ا... هوشمند	با مرتبه‌ی علمی دانشیار	امضا
۴- استاد داور خارج از گروه	آقای دکتر حمیدرضا نجفی	با مرتبه‌ی علمی استادیار	امضا

امضای مدیر گروه

سپاسگزاری

در ابتدا، خداوند منان را شاکرم، بخاطر نعمت ارزشمندی که در وجود هر انسانی قرار داد تا با بکار بستن قدرت فکر و اندیشه خود پیوسته در تلاش برای آموختن و بهتر زیستن باشد.

دوم، برخود لازم می‌دانم از ریاست محترم دانشگاه اصفهان و ریاست محترم دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اصفهان بخاطر زحماتی که در فراهم آوردن یک محیط آموزشی مناسب جهت رشد استعدادها و شکوفایی توانایی‌های دانشجویان کشور عزیز ایران، متقبل می‌شوند، تشکر کنم.

سوم، از استاد ارجمندم آقای دکتر میرزائیان که بعنوان استاد راهنمای این پایان‌نامه، راهنمایی‌های ارزشمند ایشان مشخص کننده مسیر و تشویق‌های پرمهرشان انگیزه حرکت در مسیر پیش روی من بود، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

چهارم، برخود لازم می‌دانم از استاد گرامی، آقای دکتر کیومرثی که بعنوان استاد مشاور، با ایده‌های بدیع و هوشمندانه خود نقش بسزایی در پیشرفت کار این پایان‌نامه داشتند، نهایت قدردانی را بعمل آورم.

پنجم، از استاد بزرگوارم آقای دکتر عطایی که هم بعنوان مدیریت آموزشی گروه برق و هم بعنوان استاد برخی از واحدهای درسی‌ام زحمات دلسوزانه ایشان، بسیار تأثیرگذار و تعالی‌بخش بوده است، تشکر می‌کنم.

در آخر، از سایر اساتید محترم گروه برق دانشگاه اصفهان که در مدت سه سال تحصیل خود در دوره کارشناسی ارشد، از کلاس‌های درسی ایشان بسیار استفاده نمودم و فراوان آموختم، قدردانی می‌نمایم.

تقدیم به

فداکاری‌های مادرم

چکیده

امروزه اهمیت تخمین حالت هارمونیکی در شبکه های قدرت بدلیل کاربرد آن در ارزیابی کیفیت توان کاملاً مشخص گردیده است. همچنین استانداردهایی وضع شده که ضمن آن که تولید کننده انرژی الکتریکی را موظّف به تولید ولتاژهای نزدیک به سینوسی خالص می‌نماید، مصرف کننده را نیز ملزم به محدود ساختن محتوای هارمونیکی بارهای خود می‌سازد. از طرفی، انجام اندازه‌گیری مستقیم در تمامی نقاط شبکه قدرت، برای ارزیابی میزان آلودگی‌های هارمونیکی آن، بدلیل وسعت شبکه‌های قدرت در عمل امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر، تغییرات دوره‌ای در توپولوژی شبکه قدرت و افزوده شدن بارهای جدید در فواصل زمانی معین به آن، نیاز تولید کننده انرژی الکتریکی را به داشتن اطلاعات به‌روز در مورد میزان آلودگی‌های هارمونیکی در نقاط مختلف شبکه قدرت، توجیه می‌کند. از این‌رو، مسأله تخمین حالت هارمونیکی در چند سال اخیر بدلیل گسترش روزافزون استفاده از بارهای غیرخطی و در نتیجه آن، افزایش منابع تولید هارمونیک در شبکه‌های قدرت از سوی بسیاری از محققین مورد توجه قرار گرفته است. در علوم مهندسی، همواره دستیابی به روش هایی که ضمن افزایش دقت محاسبات به کاهش هزینه‌ها منجر شود، مدنظر بوده است. مسأله تخمین حالت هارمونیکی نیز از این قاعده مستثنی نیست. اما دقت تخمین، نسبت مستقیمی با تعداد وسایل اندازه‌گیری نصب شده در شبکه دارد و دستگاه‌های مذکور، غالباً بسیار گران و پر هزینه هستند. بنابراین، مسأله بهینه‌سازی در تخمین حالت هارمونیکی، مسأله‌ای پیچیده و مستلزم درنظر گرفتن قیود متضاد و مخالف با یکدیگر است. علاوه بر آن، مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی کاملاً به معیار و روش محاسبه تخمین حالت توسط تخمین‌زن حالت هارمونیکی بستگی دارد.

در این تحقیق، پس از بررسی روش‌های مختلفی که تاکنون جهت مکانیابی بهنیه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت بکار گرفته شده‌اند، یک روش کاملاً عملی جهت انجام تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های انتقال قدرت با معیار حداقل مربعات وزن‌دار انتخاب شده است. پس از آن روشی برای مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در انجام تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت با استفاده از تخمین‌زن حداقل مربعات، پیشنهاد شده است. روش مکانیابی پیشنهادی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مکان‌های نصب تجهیزات اندازه‌گیری را بگونه‌ای تعیین می‌کند که انجام تخمین با درنظر گرفتن دو فاکتور دقت و هزینه بطور همزمان بهینه شود.

در پایان، برای نشان دادن میزان کارآیی روش پیشنهادی در این پایان‌نامه، مقایسه‌ای میان نتایج حاصل از تخمین برمبنای مکانیابی نصب تجهیزات اندازه‌گیری با استفاده از روش مذکور و نتایج حاصل از تخمین برمبنای مکانیابی نصب تجهیزات اندازه‌گیری با استفاده از الگوریتم حذف ترتیبی، انجام شده است. شایان ذکر است که روش مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری با استفاده از الگوریتم حذف ترتیبی، بعنوان یک روش شناخته شده بطور عملی در مکانیابی بهینه نصب تجهیزات انداره‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های انتقال قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی روی شبکه استاندارد ۳۰- باس IEEE، بهبود قابل توجهی در دقت تخمین را بدون افزایش هزینه انجام اندازه‌گیری‌های هارمونیکی، در صورت استفاده از روش پیشنهاد شده در این پایان‌نامه نشان می‌دهد.

کلید واژه: حالت هارمونیکی، هارمونیک‌های شبکه قدرت، تخمین حالت استاتیکی، ارزیابی کیفیت سیستم قدرت

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- تاریخچه ۱

۱-۲- روند ارائه مطالب در پایان‌نامه ۵

فصل دوم: هارمونیک‌ها در شبکه‌های قدرت

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- طبیعت هارمونیک‌ها ۸

۲-۳- مفاهیم و تعاریف اولیه ۹

۲-۳-۱- تولید فرکانس هارمونیکی ۹

۲-۳-۲- فرکانس اصلی و فرکانس سیستم ۱۰

۲-۳-۳- تعریف هارمونیک‌ها، میان‌هارمونیک‌ها و زیرهارمونیک‌ها ۱۱

۲-۴- منابع تولید هارمونیک در شبکه های قدرت ۱۱

۲-۴-۱- مبدل‌های توان بالا ۱۱

۲-۴-۲- مبدل‌های توان متوسط ۱۲

۲-۴-۳- مبدل‌های توان پایین ۱۲

۲-۴-۴- کنترل فاز مدوله شده ۱۲

۲-۴-۵- اعوجاج تولید شده توسط کوره های قوس ۱۳

۲-۴-۶- هارمونیک های لامپ فلورسنت ۱۳

۲-۴-۷- دیگر منابع تولید هارمونیک ۱۳

فصل سوم: مفاهیم کلی در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت

۳-۱- مقدمه ۱۵

۳-۲- اهمیت و کاربرد تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت ۱۷

۳-۳- اهمیت مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت ۱۹

۳-۴- ملزومات اساسی در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت ۲۰

عنوان | صفحه

۳-۴-۱- سیستم اندازه‌گیری هارمونیکی ۲۱
۳-۴-۲- تخمین‌زن حالت هارمونیکی ۲۳
۳-۵- پاسخ فرکانسی یک شبکه قدرت خطی ۲۴

فصل چهارم: تخمین استاتیکی حالت هارمونیکی در شبکه قدرت با استفاده از معیار حداقل مربعات وزن‌دار

۴-۱- مقدمه ۲۸
۴-۲- مدل ریاضی تخمین با معیار حداقل مربعا وزن‌دار ۲۹
۴-۲-۱- تعیین تابع هدف ۲۹
۴-۲-۲- حل تخمین به روش حداقل مربعات وزن‌دار ۳۲
۴-۳- مدل مداری اجزاء شبکه قدرت ۳۴
۴-۳-۱- خطوط انتقال انرژی الکتریکی ۳۵
۴-۳-۲- خازن‌ها و راکتورهای موازی ۳۵
۴-۳-۳- ترانسفورماتورهای دارای تپ‌چنجر ۳۵
۴-۳-۴- مولدها و بارها ۳۷
۴-۴- مدل‌سازی هارمونیکی شبکه قدرت ۳۷
۴-۵- فرمول‌بندی مسأله تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت جهت انجام تخمین با معیار حداقل مربعات وزن‌دار ۴۱

فصل پنجم: مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری جهت تخمین حالت هارمونیکی

۵-۱- مقدمه ۴۶
۵-۲- مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت از نقطه نظر دقت تخمین ۴۷
۵-۲-۱- مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت تنها با درنظر گرفتن فاکتور دقت با استفاده از الگوریتم حذف ترتیبی ۵۰
۵-۲-۲- مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت تنها با درنظر گرفتن فاکتور دقت، با استفاده از الگوریتم ژنتیک ۵۲

عنوان | صفحه

۵-۳- مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت با درنظر گرفتن همزمان دو فاکتور دقت و هزینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک..... ۵۵

فصل ششم: مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE برمبنای الگوریتم ژنتیک و مقایسه نتایج حاصل از آن با روش حذف ترتیبی

۶-۱- مقدمه..... ۶۱

۶-۲- پخش بار تحت فرکانس اصلی ۶۲

۶-۳- پخش بار هارمونیکی..... ۶۲

۶-۴- معرفی شبکه استاندارد ۳۰- باس IEEE..... ۶۴

۶-۵- روند شبیه‌سازی ۶۶

۶-۶- بررسی نتایج شبیه‌سازی..... ۶۹

۶- ۶- ۱- مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری تنها با درنظر گرفتن فاکتور دقت ...۶۹

۶- ۶- ۲- مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری با درنظر گرفتن همزمان فاکتور دقت و فاکتور هزینه ۷۱

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه‌گیری ۸۶

۷-۲- پیشنهادات..... ۸۷

پیوست‌ها ۸۸

منابع و مآخذ..... ۱۰۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۳- ۱)- قسمت‌های مختلف یک ایستگاه اندازه‌گیری هارمونیکی محلی..... ۲۲

شکل (۳- ۲)- قسمت‌های مختلف یک سیستم اندازه‌گیری هارمونیکی نمونه..... ۲۲

شکل (۳- ۳)- اصول کلی تخمین حالت هارمونیکی در سیستم قدرت..... ۲۳

شکل (۴- ۱)- یک نمودار نوعی تابع چگالی احتمال برای یک توزیع نرمال ۳۰

شکل (۴- ۲)- مدار معادل یک خط انتقال انرژی الکتریکی ۳۵

شکل (۴- ۳)- مدار معادل ترانسفورماتور با تپ بی‌بار..... ۳۶

شکل (۴- ۴)- مدار معادل ترانسفورماتور با تپ چنجر..... ۳۷

شکل (۴- ۵)- دیاگرام تک- خطی یک سیستم قدرت ۲- باس ۳۸

شکل (۴- ۶)- گراف جهت‌دار سیستم قدرت ۲- باس نشان داده شده در شکل (۴- ۵)..... ۳۸

شکل (۶- ۱)- دیاگرام تک- خطی شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE ۶۵

شکل (۶- ۲)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی پنجم..... ۷۳

شکل (۶- ۳)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی هفتم..... ۷۴

شکل (۶- ۴)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی یازدهم ۷۴

شکل (۶- ۵)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی سیزدهم ۷۵

شکل (۶- ۶)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی هفدهم ۷۶

شکل (۶- ۷)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی نوزدهم ۷۶

شکل (۶- ۸)- خلاصه نتایج تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مراتب هارمونیکی ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۹، با بکارگیری الگوریتم ژنتیک در مکانیابی نصب تجهیزات اندازه‌گیری..... ۷۷

عنوان **صفحه**

شکل (۶- ۹)- خلاصه نتایج تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مراتب هارمونیکی ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۹، با بکارگیری الگوریتم حذف ترتیبی در مکانیابی نصب تجهیزات اندازه‌گیری..... ۷۸

شکل (۶- ۱۰)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی پنجم..... ۸۰

شکل (۶- ۱۱)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی هفتم..... ۸۰

شکل (۶- ۱۲)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی یازدهم ۸۱

شکل (۶- ۱۳)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی سیزدهم ۸۱

شکل (۶- ۱۴)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی هفدهم ۸۲

شکل (۶- ۱۵)- خطای تخمین ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مرتبه هارمونیکی نوزدهم ۸۲

شکل (۶- ۱۶)- خلاصه نتایج تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مراتب هارمونیکی ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۹، با بکارگیری الگوریتم ژنتیک در مکانیابی نصب تجهیزات اندازه‌گیری..... ۸۴

شکل (۶- ۱۷)- خلاصه نتایج تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE، در مراتب هارمونیکی ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۹، با بکارگیری الگوریتم حذف ترتیبی در مکانیابی نصب تجهیزات اندازه‌گیری..... ۸۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۶- ۱)- شماره باس‌های موجود در هر سایت اندازه‌گیری محلی..... ۶۶

جدول (۶- ۲)- نتایج پخش بار مؤلفه اصلی ۶۸

جدول (۶- ۳)- مقایسه نتایج مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت، صرفاً با درنظر گرفتن فاکتور دقت، حاصل از دور روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم حذف ترتیبی در مرتبه هارمونیکی پنجم..... ۷۰

جدول (۶- ۴)- نتایج حاصل از ده اجرای متوالی برنامه مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت، صرفاً با درنظر گرفتن فاکتور دقت، در مرتبه هارمونیکی پنجم..... ۷۰

جدول (۶- ۵)- مقایسه نتایج مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت، با درنظر گرفتن همزمان دو فاکتور دقت و هزینه، حاصل از دو روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم حذف ترتیبی، در مرتبه هارمونیکی پنجم ۷۲

جدول (۶- ۶)- ایستگاه‌های اندازه‌گیری محلی مورد استفاده قرار گرفته در مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری با درنظر گرفتن همزمان دو فاکتور دقت و هزینه ۷۲

جدول (۶- ۷)- مقایسه عدد وضعیت ماتریس‌های اندازه‌گیری و مجموع مربعات خطاهای تخمین، با انجام تخمین بر اساس مکان‌های تعیین شده بوسیله دو روش الگوریتم ژنتیک و الگوریتم حذف ترتیبی با انجام مکانیابی در مرتبه هارمونیکی پنجم ۷۶

جدول (۶- ۸)- نتایج مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه قدرت، حاصل از دو روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم حذف ترتیبی، با درنظر گرفتن اثر تمامی مراتب هارمونیکی مورد تخمین در انجام مکانیابی ۷۹

جدول (۶- ۹)- مقایسه عدد وضعیت ماتریس‌های اندازه‌گیری و مجموع مربعات خطاهای تخمین، با انجام تخمین بر اساس مکان‌های تعیین شده بوسیله دو روش الگوریتم ژنتیک و الگوریتم حذف ترتیبی با درنظر گرفتن اثر تمامی مراتب هارمونیکی مورد تخمین در انجام مکانیابی ۸۳

جدول (ز- ۱)- اطلاعات باسهای سیستم قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE ۱۰۱

جدول (ز- ۲)- اطلاعات شاخه‌های شبکه قدرت استاندارد ۳۰- باس IEEE در فرکانس اصلی (۶۰ هرتز) ... ۱۰۲

فصل اول

مقدمه

۱- ۱- تاریخچه

مسأله تخمین حالت برای نخستین بار توسط گاوس[۱] و لژاندر[۲] در حدود سال ۱۸۰۰ میلادی مطرح گردید. ایده اصلی آن‌ها تنظیم دقیق متغییرهای حالت با مینیمم‌سازی مجموع مربعات خطا (تفاضل مقادیر حقیقی از مقادیر تخمینی) بود. این روش، همان روش شناخته شده حداقل مربعات[۳] است، که به زیربنای دانش آمار تبدیل شده است.

از دلایل شهرت یافتن این روش می‌توان به سهولت درک آن اشاره کرد. همچنین زمانی که این روش ابداع شد، هنوز کامپیوتر اختراع نشده بود و این واقعیت که تخمین‌زن حداقل مربعات می‌توانست مستقیماً با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و تنها با مقداری محاسبات جبری ماتریسی پیاده‌سازی شود، آن را به تنها روش عملی در زمینه تخمین حالت، تبدیل نمود. حتی امروزه بیشتر بسته‌های نرم‌افزاری آماری از همین روش، بدلیل سرعت محاسباتی خوب و قدمت آن استفاده می‌کنند. بعدها، گاوس توزیع نرمال (گاوسی) را معرفی نمود که می‌توان ثابت کرد، اگر خطای داده‌های اندازه‌گیری شده دارای چنان توزیعی باشد، در آن صورت پاسخ بدست آمده از

---

۱ Gauss
۲ Legendre
۳ Least Squares

تخمین‌زن حداقل مربعات، بهینه خواهد بود. از آن پس ترکیب مفروضات گاوس و روش حداقل مربعات، به مکانیسم استانداردی برای ابداع تکنیک‌های آماری دیگر تبدیل شد.

از میان معیارهای آماری مختلفی که تاکنون برای تخمین حالت مورد استفاده قرار گرفته‌اند، چهار معیار رواج بیشتری پیدا کرده‌اند که عبارتند از:

۱- *معیار حداقل مربعات وزن‌دار*[۱]:

در معیار حداقل مربعات، هدف تخمین پارامترها و یا حالت‌های سیستم به نحوی است که مجموع مربعات تفاضل‌های میان مقادیر حقیقی (مقادیر اندازه‌گیری شده) و مقادیر تخمینی (مقادیر معادل کمیت‌های اندازه‌گیری شده حاصل از نتایج تخمین)، مینیمم گردد. در معیار حداقل مربعات وزن‌دار نیز، هدف کلی همین است. با این تفاوت که با استفاده از این معیار، می‌توان به اندازه‌گیری‌هایی که بدلایلی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند، وزن بیشتری داد یا به بیان دیگر، در نوشتن مجموع مربعات تفاضل‌ها، جملات مربوط به آن‌ها را در عدد بزرگتری ضرب نمود. طبیعتاً، نتیجه تخمین بگونه‌ای رقم می‌خورد که مقادیر تخمینی معادل داده‌های اندازه‌گیری شده با وزن بیشتر، به مقادیر اندازه‌گیری شده، نزدیکتر باشند.

۲- *معیار حداکثر شباهت*[۲]:

در معیار حداکثر شباهت، هدف تعیین شبیه‌ترین حالت به حالت واقعی سیستم برمبنای اندازه‌گیری‌های انجام شده است. هنگام استفاده از این معیار، لازم است که خطای هر اندازه‌گیری دارای تابع چگالی احتمال[۳] با فرم شناخته شده، اما برحسب کمیت‌های ناشناخته (کمیت‌های مورد تخمین سیستم) باشد. سپس تابع چگالی احتمال الحاقی[۴] برای تمامی اندازه‌گیری‌های انجام شده برحسب پارامترهای مورد تخمین، نوشته می‌شود. این تابع تحت عنوان تابع شباهت شناخته می‌شود و زمانی به مقدار پیک خود می‌رسد که پارامترهای ناشناخته مذکور، نزدیکترین مقدار ممکن به مقدار واقعی خود را اختیار کنند. بنابراین، می‌توان یک مسأله بهینه‌سازی برای ماکسیمم نمودن تابع شباهت، بعنوان تابعی از کمیت‌های مورد تخمین، ترتیب داد که پاسخ این مسأله بهینه‌سازی، به تخمینی برای حالت‌های سیستم منجر می‌شود. نکته قابل توجه این که، اگرچه در روش حداقل مربعات، مشخص بودن توابع چگالی احتمال خطاهای اندازه‌گیری الزامی نیست، اما چنان‌چه توابع چگالی مذکور دارای

---

[۱] Weighted Least Squares
[۲] Maximum Likelihood
[۳] Probability Density Function
[۴] Joint Probability Density Function

توزیع نرمال (گاوسی) باشند، هر دو معیار حداقل مربعات وزن‌دار و حداکثر شباهت، نتیجه کاملاً یکسانی را برای تخمین بدست می‌دهند.

۳- *معیار حداقل واریانس*[۱]:

در این معیار، هدف به حداقل رساندن ماتریس واریانس تفاضل بردار حالت تخمین زده شده از بردار حالت واقعی است.

٤- *معیار مقدار مورد انتظار شرطی*[۲]:

در این معیار، هدف استفاده از مقدار مورد انتظار شرطی بردار حالت، متکی بر اندازه‌گیری‌های انجام شده، به عنوان تخمین‌زن بهینه، با بردار تخمین متعامد بر بردار داده‌های اندازه‌گیری شده است.

تخمین حالت برای نخستین بار در اواخر دهه ۱۹٦۰ میلادی در سیستم قدرت مورد استفاده قرارگرفت. در آن زمان در تخمین حالت سیستم قدرت، از ساختار اساسی زیر استفاده می‌شد [۱]:

۱- مدل سیستم قدرت، بصورت تک‌فاز درنظر گرفته می‌شد.

۲- مجموعه اندازه‌گیری‌های انجام شده در سیستم قدرت به اندازه‌گیری توان اکتیو، توان راکتیو و اندازه ولتاژ باس‌های سیستم، محدود می‌شد.

۳- اندازه‌گیری‌ها، بصورت غیر همزمان[۳] بودند.

تخمین حالت در سیستم قدرت با استفاده از ساختار اساسی فوق، دربردارنده مفروضات زیر است:

۱- شکل موج تمامی ولتاژها و جریان‌های سیستم، بصورت سینوسی خالص با فرکانس و اندازه ثابت هستند.

۲- سیستم تحت شرایط سه فاز متعادل عمل می‌کند.

۳- سیستم قدرت یک سیستم سه‌فاز متقارن است که تنها با استفاده از مدار معادل توالی مثبت شبکه قابل توصیف است.

مفروضات فوق باعث بوجود آمدن تفاوت‌هایی میان سیستم واقعی و مدل ریاضی مورد استفاده می‌گردد و نتایج عددی ضعیفی را در تخمین حالت سیستم، موجب می‌شود. اما امروزه با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری پیشرفته و امکان انجام اندازه‌گیری‌های سنکرون که با بکارگیری سیستم تعیین محل فراگیر[٤] (GPS) و با دقتی در حدود یک میکروثانیه فراهم می‌شود، می‌توان اندازه‌گیری سه‌فاز و بصورت فازوری از ولتاژها و جریان‌های

---

[۱] Minimum Variance
[۲] Conditional Expected Value
[۳] Non-Simultaneous
[٤] Global Positioning System

سیستم بدست آورد [۲]. با تحلیل اندازه‌گیری‌های مذکور توسط الگوریتم تخمین حالت هارمونیکی که از تعمیم روشهای تخمین حالت و با استفاده از مدل‌سازی پیشرفته سیستم قدرت بدست می‌آید، می‌توان حالت‌های سیستم قدرت را در فرکانس مؤلفه اصلی و همچنین در فرکانس‌های هارمونیکی با دقت بسیار خوبی تخمین زد.

مدل دقیق [۳]، مدل‌های تقریبی [٤]، تئوری و مباحث پایه [٥]، نمایش کاربردهای تخمین حالت در سیستم‌های قدرت [٦، ۷ و ۸]، آنالیز داده‌های نامناسب [۹] و آنالیز رؤیت‌شوندگی سیستم‌های قدرت [۱۰] از جمله مسایلی هستند که در طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ میلادی در مبحث تخمین حالت در سیستم‌های قدرت مطرح شده‌اند.

ایده تخمین حالت هارمونیکی در سیستم قدرت، برای نخستین بار توسط پروفسور هیت[۱] در سال ۱۹۸۹ میلادی مطرح گردید [۱۱]. پروفسور هیت برای دستیابی به اهداف موردنظر خود، از چهار نوع اندازه‌گیری شامل اندازه ولتاژ، اندازه جریان، توان اکتیو و توان راکتیو استفاده نمود. در همین راستا، پرفسور آریلاگا[۲] و دستیارانش تخمین حالت در سیستم قدرت با بکارگیری اندازه‌گیری‌های فازوری شامل فازورهای ولتاژ و جریان را مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. در سال‌های اخیر، خصوصاً از اواسط دهۀ ۹۰ میلادی تاکنون از روش‌ها و تکنیک‌های متعددی جهت بهبود سرعت و دقت تخمین هارمونیک‌ها در سیستم‌های قدرت استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از فیلتر کالمن در تخمین دینامیکی حالت هارمونیکی [۱۳ و ۱٤]، تجزیۀ مقدار ویژه [۱٥ و ۱٦]، مفاهیم تطبیقی [۱۷ و ۱۸]، شبکه‌های عصبی [۱۹، ۲۰ و ۲۱]، روش‌های محاسباتی هوشمند [۲۲] و روش‌های ترکیبی [۲۳ و ۲٤] اشاره نمود. همچنین در زمینۀ یافتن مکان‌های بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری، برای دستیابی به تخمین دقیق‌تر با صرف هزینه کمتر، تاکنون چند روش پیشنهاد شده است [۲۱ و ۲٥– ۲۷]. عموماً روش مکانیابی وابسته به روشی است که محاسبه‌گر تخمین در تخمین‌زن حالت هارمونیکی از آن استفاده می‌کند. بعنوان نمونه، در تخمین حالت هارمونیکی برمبنای شبکه‌های عصبی [۲۱]، که با نمونه‌برداری از جریان‌های هارمونیکی عبوری از خطوط انتقال انرژی الکتریکی، تخمینی از ولتاژهای هارمونیکی باس‌های شبکه ارائه می‌دهد، با استفاده از آنالیز حساسیت، تغییرات جریان‌های هارمونیکی عبوری از خطوط نسبت به تغییرات منابع تولید هارمونیک احتمالی متصل به باس‌های مشکوک شبکه قدرت تعیین می‌شود و نهایتاً خطوطی از شبکه قدرت برای نصب تجهیزات اندازه‌گیری انتخاب می‌شوند که با تغییر منابع احتمالی تولید هارمونیک در شبکه قدرت، بیشترین تغییر در جریان هارمونیکی عبوری از آن‌ها مشاهد گردد، چراکه در این حالت تمایز بهتری در

---

[۱] Heydt
[۲] Arrilaga

ورودی‌های شبکه عصبی حاصل می‌شود. یا در تخمین‌زن حالت هارمونیکی با معیار مینیمم واریانس [۲۶]، با درنظر گرفتن یک احتمال اولیه برای وجود منابع تولید هارمونیک در باس‌های مختلف شبکه قدرت، که این احتمال اولیه از آنالیز سطوح قدرت بارهای موجود در شبکه قدرت و همچنین نوع بارهای موجود، تعیین می‌گردد، درنهایت یک شاخص ریاضی حاصل می‌شود که مقدار آن تابعی از توپولوژی شبکه، مقادیر المان‌های شبکه و محل‌های درنظر گرفته شده برای نصب تجهیزات اندازه‌گیری است و ثابت می‌شود که با مینیمم‌سازی شاخص مذکور، محل‌های بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در شبکه قدرت تعیین می‌گردد. یا در تخمین‌زن حالت هارمونیکی در شبکه قدرت با معیار حداقل مربعات [۲۷] که در آن عمل تخمین به محاسبه معکوس یا معکوس مجازی[۱] یک ماتریس موسوم به ماتریس اندازه‌گیری شبکه قدرت و پیش‌ضرب آن در بردار اندازه‌گیری‌های انجام شده در شبکه قدرت منجر می‌شود، با بدست آوردن شاخصی به نام عدد وضعیت[۲] برای ماتریس اندازه‌گیری که مقدار آن متناسب با خطای محاسبه معکوس یا معکوس مجازی ماتریس اندازه‌گیری است، سعی می‌شود برای کاهش خطای تخمین به حداقل ممکن، مکان‌هایی در شبکه قدرت برای نصب تجهیزات اندازه‌گیری انتخاب شوند که کمترین عدد وضعیت را برای ماتریس اندازه‌گیری حاصل، درپی داشته باشند.

۱- ۲- روند ارائه مطالب در پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، پس از مقدمه در فصل دوم، پیرامون هارمونیک‌ها در شبکه‌های قدرت بحث می‌شود. در این فصل بطور اجمالی ماهیت هارمونیک‌ها، مفاهیم و تعاریف اولیه در مبحث هارمونیک‌ها و منابع تولید هارمونیک‌ها در شبکه‌های قدرت، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

فصل سوم، به مفاهیم کلی مطرح در پروسه تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت می‌پردازد. این فصل مطالبی شامل اهمیت و دلیل انجام تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت، اهمیت و لزوم مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت، ملزومات اساسی در پروسه تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت و پاسخ فرکانسی یک شبکه قدرت خطی را دربر می‌گیرد.

در فصل چهارم، اصول تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت با معیار حداقل مربعات وزن‌دار شرح داده شده است. در این خصوص مسایلی نظیر مدل ریاضی تخمین‌زن حداقل مربعات وزن‌دار، مدل مداری اجزای

---

[۱] Pseudo Inverse
[۲] Condition Number

شبکه‌های قدرت، مدل‌سازی هارمونیکی شبکه قدرت و نهایتاً فرمول‌بندی مسأله تخمین حالت هارمونیکی با معیار حداقل مربعات وزن‌دار مطرح می‌گردد.

در فصل پنجم که در واقع فصل اصلی پایان‌نامه است، در ابتدا با فاکتورهای مطرح در مسأله مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری در تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت، شامل دو فاکتور دقت و هزینه آشنا می‌شویم. پس از آن، ابتدا مسأله بهینه‌سازی نصب تجهیزات اندازه‌گیری صرفاً با درنظر گرفتن فاکتور دقت مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت الگوریتمی برای مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری با ترکیب کردن دو فاکتور مزبور ارائه می‌شود. در این خصوص یک روش شناخته شده بنام الگوریتم حذف ترتیبی که قبلاً برای نصب بهینه تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گرفته است، معرفی می‌شود و پس از آن روشی برای مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری برمبنای الگوریتم ژنتیک پیشنهاد می‌گردد.

در فصل ششم نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه استاندارد ۳۰- باس IEEE گردآوری شده است. در ابتدای این فصل، اصول پخش بار مؤلفه اصلی و پخش بار هارمونیکی بیان می‌شود و پس از آن، نتایج تخمین حالت هارمونیکی به روش حداقل مربعات، با مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری، برمبنای دو روش معرفی شده در فصل پنجم باهم مقایسه می‌شوند. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بهبود نتایج تخمین با استفاد از مکانیابی بهینه نصب تجهیزات اندازه‌گیری برمبنای روش پیشنهادی در این پایان‌نامه را نشان می‌دهد.

فصل هفتم که فصل پایانی پایان‌نامه است، شامل نتایج حاصل از بحث و همچنین پیشنهاداتی برای ادامه کار است.

در انتهای پایان‌نامه در بخش پیوست، اثبات روش حل تخمین با معیار حداقل مربعات وزن‌دار و مطالبی در خصوص پیاده‌سازی عملی تخمین‌زن حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت، شامل تشخیص و آشکارسازی اندازه‌گیری‌های نامناسب و آنالیز رؤیت‌شوندگی شبکه قدرت، همچنین تخمین حالت هارمونیکی با استفاده از روش تجزیه مقدار ویژه در حالتی که شبکه قدرت کاملاً رؤیت‌پذیر نیست، بطور اجمالی مطرح شده است که می‌تواند خواننده را در درک بهتر مسأله تخمین حالت هارمونیکی در شبکه‌های قدرت، یاری دهد.

فصل دوم

هارمونیک‌ها در شبکه‌های قدرت

۲- ۱- مقدمه

در یک سیستم قدرت ایده‌آل، انرژی الکتریکی در یک فرکانس ثابت و منفرد و در سطوح ولتاژ مشخص با دامنه ثابت تولید می‌شود. اما، در یک سیستم قدرت واقعی چنین وضعیتی مشاهده نخواهد شد، بطوری که مسأله تغییرات ولتاژ و فرکانس و تحت کنترل قرار دادن آن‌ها از موضوعات اساسی در مهندسی سیستم‌های قدرت محسوب می‌شود.

اعوجاج در سیستم قدرت پدیده جدیدی نیست. این مسأله از ابتدای پیدایش شبکه‌های انرژی الکتریکی، مهندسین برق را به خود مشغول کرده است [۲۸]. عامل اصلی در پیدایش و رشد اعوجاج در شبکه‌های قدرت، افزایش تعداد و سطح قدرت بهره‌برداری از بارهای غیرخطی، خصوصاً استفاده از وسایل الکترونیک قدرت در کنترل وسایل و سیستم‌های قدرت است. در شبکه‌های قدرت، انحراف سیگنال‌ها از فرم سینوسی خالص، معمولاً تحت عنوان آلودگی هارمونیکی معرفی شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.