

بِسْمِ اللَّهِ

الرَّحْمَنِ

الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - گرایش قدرت

ارزیابی پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت با
استفاده از داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازوری

نگارش

حمید پیک‌علی ابیانه

استاد راهنما

آقای دکتر یوسف علی‌نژاد برمی

آبان ۱۳۸۹

این جانب حمید پیک علی ابیانه بدین وسیله اظهار می دارم که محتوای علمی
این نوشتار با عنوان ارزیابی پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت با استفاده از
داده های واحد اندازه گیری فازور

که به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش قدرت به
دانشکده برق کامپیوتر - دانشگاه سمنان ارائه شده، دارای اصالت پژوهشی بوده
و حاصل فعالیت علمی این جانب است.

این جانب می دانم که اگر خلاف ادعای بالا در هر زمانی محرز شود، کلیه
حقوق مترتب بر این نوشتار از این جانب سلب شده و مراتب قانونی مرتبط با آن نیز
از طرف مراجع ذیربط قابل پیگیری است.

نام و نام خانوادگی - شماره دانشجویی

حمید پیک علی ابیانه - ۸۷۱۱۱۸۰۰۷

تاریخ و امضاء

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

فرشتگان زمینی که دلسوزانه مشکلات رسیدن به موفقیت را برایم آسان نموده اند و موفقیت هایم را پس از فضل خداوند مرمون زحمات، فداکاری ها و ابراز محبت های خالصانه آن های دانه ام. امید آن که خداوند توفیق عنایت فرماید تا بتوانم قدر شناس زحمات آن ها باشم و خوشنودی و رضای ایشان را جلب نمایم.

و تقدیم به خواهر و برادرم

که همواره با مهربانی و محبت خود مرا مورد لطف قرار داده اند.

«موفقیت» به دست آوردن چیزی است که دوست داری و «خوشبختی» دوست داشتن

چیزی است که به دست آورده‌ای

تقدیر و تشکر:

بر خود لازم می‌دانم از زحمات و الطاف بی‌دریغ جناب آقای دکتر یوسف علی‌نژاد برمی که در مراحل مختلف پایان‌نامه از راهنمایی‌های ایشان بهره برده‌ام، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم و همت ایشان را در جهت رفع موانع و پیش‌برد اهداف عالیه، بستایم. شاگردی ایشان برای من افتخار بزرگی بوده و از خداوند متعال آرزوی موفقیت و بهروزی برای ایشان دارم.

از آقایان مهندسین ابراهیم امینی و احمد احمدی که با راهنمایی‌ها و کمک در تأمین مراجع، یاری‌گر این‌جانب در طول انجام پروژه بوده‌اند، کمال تشکر دارم و از خداوند متعال آرزوی موفقیت و بهروزی برای ایشان دارم.

چکیده

امروزه به علت افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، ایجاد بازار برق و محدودیت‌های اقتصادی و محیطی جهت احداث خطوط انتقال جدید، شبکه‌های قدرت به حد پایداری بسیار نزدیک شده‌اند. لذا پایداری در مقابل اغتشاشات سیگنال کوچک یکی از مهمترین عوامل ایجاد استرس در شبکه‌های قدرت امروزی است. عملکرد سیستم قدرت در نزدیکی حد پایداری، مستلزم ارزیابی و کنترل به‌هنگام شبکه می‌باشد. تحلیل این نوع پایداری عموماً با استفاده از خطی‌سازی مدل‌های دینامیکی و به صورت نابه‌هنگام انجام می‌شود. خطاهای گوناگون مدل‌سازی و تغییرات مداوم شرایط کار سیستم باعث عدم قطعیت و دقت این تحلیل‌ها می‌گردد. با پیشرفت سیستم‌های مخابراتی امکان اندازه‌گیری هم‌زمان فازور کمیت‌های الکتریکی توسط *PMU* در سطح شبکه میسر شده و امکانات لازم برای ارزیابی و کنترل زمان واقعی سیستم‌های قدرت بدست آمده است.

در این پروژه روش پرونی برای تحلیل سیگنال کوچک سیستم قدرت ارائه شده است که تنها با استفاده از اندازه‌گیری‌های *PMU* و بدون داشتن اطلاعاتی در مورد ساختار شبکه شکل گرفته و برای تحلیل پایداری سیگنال کوچک سیستم به کار گرفته شده است. الگوریتم ارائه شده بر روی سیستم دو ناحیه‌ای و سیستم ۱۶ ماشینه پیاده‌سازی شده و عملکرد آن‌ها نشان داده شده است.

هم‌چنین جعبه‌ابزار پرونی مبتنی بر نرم‌افزار *MATLAB* طراحی شده است که توانایی انجام آنالیز را بالا می‌برد.

کلمات کلیدی: پایداری سیگنال کوچک، واحدهای اندازه‌گیری فازور، نوسانات الکترومکانیکی، آنالیز پرونی.

فهرست مطالب

۱. مقدمه‌ای بر واحدهای اندازه‌گیری فازوری ۲
- ۱-۱ تاریخچه ۲
- ۲-۱ واحد اندازه‌گیری فازور ۵
- ۱-۲-۱ سنکروفازور ۶
- ۲-۲-۱ برچسب زمانی ۶
- ۳-۲-۱ هم‌زمان‌سازی زمانی ۷
- ۳-۱ سیستم ردیاب ماهواره‌ای سراسری GPS ۷
- ۴-۱ روش‌های انتقال اطلاعات PMU ۸
- ۵-۱ کاربردهای PMU در سیستم‌های قدرت ۹
- ۱-۵-۱ تخمین حالت ۹
- ۲-۵-۱ محاسبه پارامترهای خط ۱۰
- ۳-۵-۱ نمایش حرارتی خطوط انتقال ۱۰
- ۴-۵-۱ مطالعات امنیت و پایداری شبکه ۱۱
- ۵-۵-۱ تشخیص خطا و پیدا کردن محل خطا ۱۲
- ۶-۵-۱ تصحیح و معتبرسازی مدل سیستم ۱۲
- ۷-۵-۱ سیستم اندازه‌گیری گسترده شبکه ۱۲
- ۶-۱ اهداف پروژه و کارهای انجام شده در این پروژه ۱۳
۲. پایداری سیگنال کوچک سیستم‌های قدرت ۱۶
- ۱-۲ پایداری و تعریف آن در سیستم قدرت ۱۷
- ۲-۲ انواع پدیده‌ها و انواع پایداری در یک سیستم قدرت ۱۸

- ۱۹-۲-۱ پایداری زاویه روتور..... ۱۹
- ۲۰-۲-۳ نوسانات سیستم قدرت..... ۲۰
- ۲۳-۲-۱ مدل کلاسیک ژنراتور..... ۲۳
- ۲۹-۲-۴ روش تحلیل پایداری سیگنال کوچک..... ۲۹
- ۲۹-۲-۱ نمایش فضای حالت سیستم‌های قدرت..... ۲۹
- ۳۱-۲-۲ مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس حالت..... ۳۱
- ۳۲-۲-۳ حساسیت مود..... ۳۲
- ۳۲-۲-۴ ضرایب مشارکت..... ۳۲
- ۳۴-۲-۵ کنترل پذیری مود..... ۳۴
- ۳۴-۲-۶ رؤیت پذیری مود..... ۳۴
- ۳۵-۲-۵ روش‌های خاص در تحلیل پایداری سیستم‌های بزرگ..... ۳۵
- ۳۶-۲-۱ روش *Davison*..... ۳۶
- ۳۶-۲-۲ روش‌های مبتنی بر شناسایی ژنراتورهای هم‌پا..... ۳۶
- ۳۷-۲-۶ کاربردهای PMU در تحلیل پایداری سیگنال کوچک..... ۳۷
- ۳۸-۲-۱ تعیین به هنگام مقادیر ویژه غالب سیستم..... ۳۸
- ۳۹-۲-۲ روش‌های مبتنی بر شناسایی سیستم‌ها..... ۳۹
- ۳۹-۲-۷ نتیجه‌گیری..... ۳۹
- ۴۲-۳-۱ تحلیل پرونی..... ۴۲
- ۴۳-۳-۱ تحلیل پرونی..... ۴۳
- ۴۷-۳-۲ تعیین مرتبه کاهش یافته سیستم..... ۴۷
- ۴۸-۳-۳ رابط گرافیکی کاربران..... ۴۸

- ۴-۳ تأثیر فرکانس نمونه برداری بر تخمین پارامترهای آنالیز پرونی ۵۲
- ۵-۳ مقایسه آنالیز پرونی و فوریه ۵۴
- ۶-۳ نتیجه گیری ۵۸
۴. نتایج پیاده سازی روش پرونی با PMU در ارزیابی پایداری سیگنال کوچک ۶۰
- ۱-۴ جایابی بهینه PMU برای مشاهده پذیری شبکه ۶۰
- ۱-۱-۴ مفهوم مشاهده پذیری ۶۰
- ۲-۱-۴ فرمولاسیون مسأله جایابی بهینه PMU ۶۳
- ۲-۴ نتایج جایابی بهینه PMU برای مشاهده پذیری شبکه ۶۵
- ۳-۴ پیاده سازی روش پرونی بر روی سیستم قدرت ۶۸
- ۱-۳-۴ پیاده سازی بر روی سیستم ۱۶ ماشینه ۶۸
- ۲-۳-۴ پیاده سازی بر روی سیستم دو ناحیه ای ۷۳
- ۳-۳-۴ محاسبه مقادیر ویژه سیستم دو ناحیه ای با استفاده از آنالیز پرونی ۷۳
- ۴-۳-۴ بررسی رؤیت پذیری با استفاده از آنالیز پرونی ۸۰
- ۴-۴ کنترل مود بین ناحیه ای ۸۳
- ۱-۴-۴ ساختار پایه پایدارساز ۸۳
- ۲-۴-۴ ورودی پایدارساز ۸۵
- ۳-۴-۴ طراحی پایدارساز ۸۷
- ۵-۴ نتیجه گیری ۸۸
۵. نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۱
- ۱-۵ نتیجه گیری ۹۱

۲-۵	پیشنهادات	۹۲
۶	پیوست‌ها	۹۵
۱-۶	بیان مفاهیم کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری	۹۵
۲-۶	تجزیه ماتریس با استفاده از مقادیر تکین (SVD)	۹۹
۳-۶	بررسی قیود مشاهده‌پذیری	۱۰۱
۴-۶	داده‌های سیستم مورد استفاده	۱۰۳
۷	منابع و مراجع	۱۰۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ : اولین نمونه واحد اندازه‌گیری فازور ساخته شده در لابراتور تحقیقاتی دانشگاه
ویرجینیا ۴
- شکل ۲-۱ : اجزای اصلی یک PMU امروزی ۵
- شکل ۳-۱ : نمایش سیستم ردیاب ماهواره‌ای ۷
- شکل ۴-۱ : PMU و PDC در طراحی WAMS ۱۳
- شکل ۱-۲ : انواع پایداری در سیستم قدرت ۱۸
- شکل ۲-۲ : ساختار شبکه دو ناحیه‌ای ۲۱
- شکل ۳-۲ : نمایش متغیرهای حالت ژنراتور در نرم‌افزار PST ۲۲
- شکل ۴-۲ : تغییرات سرعت ژنراتور- تغییر 0.01 PU در گشتاور ژنراتور اول و -0.01 PU در
گشتاور ژنراتور دوم ۲۴
- شکل ۵-۲ : تغییرات سرعت ژنراتور؛ تغییر 0.01 PU در گشتاور ژنراتور سوم و -0.01 PU در
گشتاور ژنراتور چهارم ۲۵
- شکل ۶-۲ : تغییرات ولتاژ باس؛ تغییر 0.01 PU در گشتاور ژنراتور اول و -0.01 PU در
گشتاور ژنراتور دوم ۲۵
- شکل ۷-۲ : تغییرات ولتاژ باس؛ تغییر 0.01 PU در گشتاور ژنراتور سوم و -0.01 PU در
گشتاور ژنراتور چهارم ۲۶
- شکل ۸-۲ : تغییرات سرعت ژنراتور؛ تغییر 0.01 PU در گشتاور ژنراتور اول و -0.01 PU در
گشتاور ژنراتور سوم ۲۷

- شکل ۲-۹ : تغییرات ولتاژ باس ؛ تغییر ۰/۰۱ PU در گشتاور ژنراتور اول و ۰/۰۱PU - در گشتاور ژنراتور سوم..... ۲۷
- شکل ۲-۱۰ : تغییرات سرعت ژنراتور؛ تغییر ۰/۰۱ PU - در گشتاور ژنراتور اول و ۰/۰۱PU در گشتاور ژنراتور سوم..... ۲۸
- شکل ۲-۱۱ : تغییرات ولتاژ باس ؛ تغییر ۰/۰۱ PU - در گشتاور ژنراتور اول و ۰/۰۱PU در گشتاور ژنراتور سوم..... ۲۸
- شکل ۲-۱۲ : ادغام ترمینال باس‌ها..... ۳۷
- شکل ۳-۱ : سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان..... ۴۳
- شکل ۳-۲ : چگونگی انجام طراحی محیط گرافیکی..... ۴۸
- شکل ۳-۳ : جعبه‌ابزار پرونی..... ۴۸
- شکل ۳-۴ : اطلاعات جعبه‌ابزار پرونی..... ۴۹
- شکل ۳-۵ : صفحه اصلی اجرای برنامه..... ۴۹
- شکل ۳-۶ : نمودار مقادیر ویژه در حوزه پیوسته..... ۵۰
- شکل ۳-۷ : نمودار مقادیر ویژه در حوزه گسسته..... ۵۱
- شکل ۳-۸ : نمودار تجزیه مقادیر منفرد..... ۵۱
- شکل ۳-۹ : نمایش مقادیر سیگنال تخمین‌زده شده..... ۵۲
- شکل ۳-۱۰ : نمایش سیگنال اصلی..... ۵۵
- شکل ۳-۱۱ : طیف فرکانسی سیگنال..... ۵۶
- شکل ۳-۱۲ : آنالیز پرونی سیگنال نمونه..... ۵۷
- شکل ۳-۱۳ : آنالیز فوریه سیگنال نمونه..... ۵۷

- شکل ۴-۱: قانون اول جایابی *PMU* ۶۲
- شکل ۴-۲: قانون سوم جایابی *PMU* ۶۲
- شکل ۴-۳: قانون چهارم جایابی *PMU* ۶۳
- شکل ۴-۴: ادغام شین تزریق صفر ۶۴
- شکل ۴-۵: دیاگرام تک خطی سیستم ۱۶ ماشینه ۶۸
- شکل ۴-۶: توان انتقالی بین باس ۶۴ و ۳۶ ۶۹
- شکل ۴-۷: تفاضل توان انتقالی ژنراتورهای ۱۴ و ۱۵ ۶۹
- شکل ۴-۸: توان انتقالی بین باس های ۶۵ و ۳۷ ۷۰
- شکل ۴-۹: برازش آنالیز پرونی شکل ۴-۶ ۷۱
- شکل ۴-۱۰: برازش آنالیز پرونی شکل ۴-۷ ۷۲
- شکل ۴-۱۱: برازش آنالیز پرونی شکل ۴-۸ ۷۲
- شکل ۴-۱۲: شبکه دو ناحیه ای با واحدهای اندازه گیری فازور ۷۳
- شکل ۴-۱۳: توان انتقالی بین باس ۳ و ۱۰۱ ۷۴
- شکل ۴-۱۴: برازش سیگنال با فرکانس ۵۸ Hz ۷۵
- شکل ۴-۱۵: برازش سیگنال با فرکانس ۷.۱۴ Hz ۷۶
- شکل ۴-۱۶: برازش سیگنال با فرکانس ۷.۶۹ Hz ۷۷
- شکل ۴-۱۷: توان انتقالی بین باس ۳ و ۱۰۱ ۷۸
- شکل ۴-۱۸: برازش سیگنال با فرکانس ۷.۱۴ Hz ۷۹
- شکل ۴-۱۹: برازش سیگنال با فرکانس ۷.۶۹ Hz ۸۰
- شکل ۴-۲۰: دیاگرام پایدارساز ۸۳

- شکل ۴-۲۱: ضریب مشارکت بین سرعت ژنراتورهای مختلف و مود بین ناحیه‌ای..... ۸۷
- شکل ۶-۱: تجزیه مقادیر منفرد..... ۱۰۰
- شکل ۶-۲: شبکه ۱۴ شینه *IEEE*..... ۱۰۱
- شکل ۶-۳: مدل تحریک کننده..... ۱۰۴
- شکل ۶-۴: مدل پایدارساز..... ۱۰۵
- شکل ۶-۵: مدل گاورنر..... ۱۰۵

فهرست جداول

- جدول ۳-۱: تأثیر فرکانس نمونه برداری در تشخیص پارامترهای سیگنال..... ۵۳
- جدول ۳-۳: پارامترهای سیگنال..... ۵۶
- جدول ۴-۱: نتایج جایابی بهینه *PMU* بر روی شبکه‌های مختلف با در نظر گرفتن شین تزریق صفر..... ۶۶
- جدول ۴-۲: نتایج جایابی بهینه *PMU* بر روی شبکه‌های مختلف بدون در نظر گرفتن شین تزریق صفر..... ۶۷
- جدول ۴-۳: مقادیر ویژه شبکه ۱۶ ماشینه..... ۷۰
- جدول ۴-۴: محاسبه مقادیر ویژه شبکه ۱۶ ماشینه با استفاده از آنالیز پرونی..... ۷۱
- جدول ۴-۵: مقادیر ویژه شبکه مورد بررسی..... ۷۴
- جدول ۴-۶: مقادیر ویژه با فرکانس نمونه برداری 5.8 Hz ۷۵
- جدول ۴-۷: مقادیر ویژه با فرکانس نمونه برداری 7.14 Hz ۷۶
- جدول ۴-۸: مقادیر ویژه با فرکانس نمونه برداری 7.69 Hz ۷۷
- جدول ۴-۹: مقادیر ویژه شبکه..... ۷۸

- جدول ۴-۱۰: مقادیر ویژه با فرکانس نمونه برداری ۷.۱۴ Hz ۷۹
- جدول ۴-۱۱: مقادیر ویژه با فرکانس نمونه برداری ۷.۶۹ Hz ۸۰
- جدول ۴-۱۲: بررسی مشاهده پذیری مود بین ناحیه‌ای ۸۱
- جدول ۴-۱۳: نحوه تغییر مود بین ناحیه‌ای با تغییر راکتانس خط وقتی که توان انتقالی صفر است ۸۲
- جدول ۴-۱۴: نحوه تغییر مود بین ناحیه‌ای با تغییر راکتانس خط وقتی که توان بین دو ناحیه منتقل می‌شود ۸۲
- جدول ۴-۱۵: نحوه تغییر مود بین ناحیه‌ای بعد از نصب پایدارساز ۸۸
- جدول ۶-۱: پارامترهای ژنراتور استفاده شده برای شبیه‌سازی سیستم دو ناحیه‌ای ۱۰۳
- جدول ۶-۲: پارامترهای خطوط دو ناحیه‌ای شبکه ۱۰۴
- جدول ۶-۳: پارامترهای سیستم تحریک استاتیک ۱۰۵
- جدول ۶-۴: پارامترهای پایدارساز با ورودی سرعت ۱۰۵
- جدول ۶-۵: پارامترهای گاورنر ۱۰۵

فصل اول

مقدمه

فصل اول

مقدمه‌ای بر واحدهای اندازه‌گیری فازوری

پیشرفت سریع سیستم‌های مخابراتی در جهان و ابداع روش اندازه‌گیری فازوری سنکرون به کمک PMU^۱ و با استفاده از سیگنال هم‌زمانی GPS تحول عظیمی در پایش و کنترل شبکه‌های گسترده و به هم پیوسته قدرت ایجاد کرده است. رشد این تکنولوژی هنوز هم با شتاب قابل ملاحظه‌ای ادامه دارد. به‌طوری که در آینده نزدیک سیستم سریع کنترل هماهنگ شبکه که قادر به محدودسازی ادامه اغتشاشات وارده و ممانعت از بروز ناپایداری‌هاست، بطور قطع جایگزین روش‌های معمول و کم‌اثر کنترل محلی و امکانات محدود سیستم‌های فعلی^۲ SCADA/EMS برای ایجاد سیستم‌های فراگیر کنترل زمان‌واقعی و همچنین کنترل‌های کندتری نظیر کنترل ثانویه ولتاژ در شبکه‌های قدرت خواهد شد. در این فصل ضمن بررسی تاریخچه و ساختار واحدهای اندازه‌گیری فازوری، کاربردهای مختلف آن در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت نیز به اختصار بیان شده است.

۱-۱ تاریخچه

یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت حفظ امنیت آن است. بهره‌بردار شبکه باید اطمینان حاصل کند که در هر لحظه متغیرهای شبکه در محدوده مجاز خود قرار داشته و در صورت وقوع پیشامدهای مهم نیز سیستم هم‌چنان عمل کرد عادی خود را حفظ می‌کند. بدون شک اولین قدم در راه ارزیابی امنیت سیستم، نمایش شرایط بهره‌برداری فعلی آن بوده، به نحوی که پس از بررسی

1. Phasor Measurement Unit

2. Supervisory Control And Data Acquisition / Energy Management System

آن، تصمیمات احتمالی لازم جهت حفظ شرایط عمل‌کرد مطلوب گرفته شود. برای مشخص کردن وضعیت فعلی سیستم از تخمین حالت استفاده می‌شود. هدف نهایی از اجرای تخمین حالت، نمایش متغیرهای شبکه به نحوی است که بهره‌بردار سیستم با استفاده از خروجی تخمین حالت، قادر به اجرای سایر اعمال نظارتی و کنترلی نظیر پخش بار بهینه و ارزیابی امنیت سیستم باشد. ورودی برنامه تخمین حالت اندازه‌گیری‌های انجام شده در نقاط مختلف شبکه بوده و خروجی آن متغیرهای حالت سیستم است. در گذشته به دلیل مشکلات فنی پیرامون هم‌زمان‌سازی اندازه‌گیری‌های انجام شده در نقاط مختلف شبکه، این اندازه‌گیری‌ها فاقد زاویه بود و شامل اندازه ولتاژ و توان تزریقی برخی باس‌ها و اندازه فلوی عبوری بعضی از خطوط می‌شدند.

اندازه‌گیری‌های فوق‌گرفته گرچه امکان حل مساله تخمین حالت را غالباً فراهم می‌سازند، اما بنا بر دلایلی از جمله دوره اندازه‌گیری طولانی و داشتن روابط غیرخطی با متغیرهای حالت سیستم، موجب کندی در زمان اجرای تخمین حالت شده و دقت آن را نیز بعضاً تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. گسترش تکنیک‌های سنکرون‌سازی بین نقاط مختلف، مشکلات فوق‌گرفته را برطرف کرده و منجر به پیدایش واحد اندازه‌گیری فازوری شد [۱].

ایده استفاده از کامپیوتر در حفاظت در ۱۹۶۰ مطرح شد ولی با توجه به امکانات موجود در آن زمان این ایده چه از نظر اقتصادی و چه از نظر فنی امکان‌پذیر نبود. در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ کامپیوترها سریع‌تر و ارزان‌تر شدند و برخی الگوریتم‌های حفاظتی برای کامپیوترهای آن زمان طراحی شد.

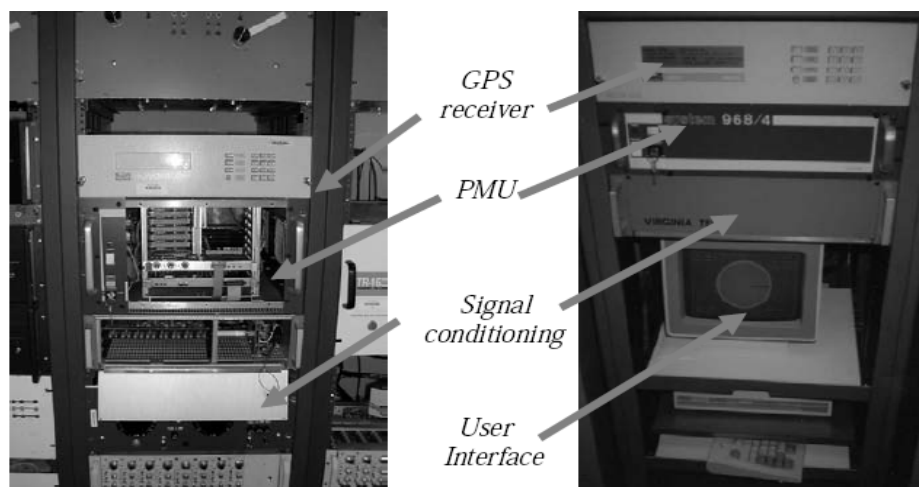
یکی از تلاش‌ها ابداع رله دیستانس مؤلفه متقارن (SCDR)^۱ برای حفاظت خطوط انتقال فشار قوی بود. در این نوع رله، مؤلفه‌های مثبت، منفی و صفر ولتاژ و جریان اندازه‌گیری می‌شد و برای

1. Symmetrical Component Distance Relay

تشخیص محل خطا فقط نیاز به تحلیل یک رابطه بود که با توجه به ضعف کامپیوترهای آن زمان، مزیت بزرگی محسوب می‌شد [۲].

یکی از نتایج این توسعه، ابداع الگوریتم سری فوریه گسترده مؤلفه‌های متقارن بود. استفاده از این الگوریتم نشان داد که اندازه‌گیری دقیق یک کمیت الکتریکی در فرکانس پایه و توالی مثبت و در صورت سنکرون بودن در کل سیستم قدرت، تا چه اندازه مفید است. در آن زمان امکان هم‌زمان‌سازی دستگاه‌های اندازه‌گیری در یک بازه جغرافیایی وسیع وجود نداشت و طبیعی بود که قدم بعدی هم‌زمان‌سازی نمونه‌برداری باشد.

با توجه به الگوریتم استفاده شده در SCDR و امکان هم‌زمان‌سازی اندازه‌گیری، نمونه اولیه تحقیقاتی از واحدهای اندازه‌گیر فازوری در دانشگاه ویرجینیاتک مورد طراحی قرار گرفت. شکل (۱-۱) نمونه ساخته شده در دانشگاه ویرجینیا را نشان می‌دهد [۳].



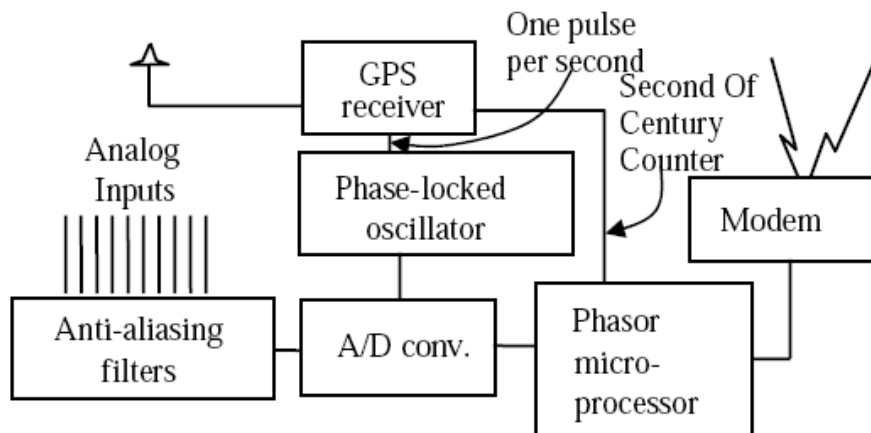
شکل ۱-۱: اولین نمونه واحد اندازه‌گیری فازور ساخته شده در لابراتور تحقیقاتی دانشگاه ویرجینیا [۳]

از سال ۱۹۹۰ انتقال تکنولوژی به صنعت صورت گرفت و شرکت‌های مختلفی اقدام به ساخت نمونه‌های با ویژگی‌های متفاوت PMU پرداختند. در سال ۱۹۹۵ اولین استاندارد واحدهای اندازه‌گیری فازوری ایجاد شد که با سه ویرایش، آخرین نسخه آن در سال ۲۰۰۵ منتشر شده است [۴]، [۵].

از آن‌جا که فناوری GPS^۱ در مراحل اولیه خود بود، سیستم‌های اولیه دریافت‌کننده GPS بسیار گران بودند، چرا که باید از مولد پالس‌های کریستالی استفاده می‌کردند تا زمان را به دقت نگه دارند. به همین دلیل در آغاز معرفی PMU برای استفاده در سیستم قدرت استقبال زیادی از آن نشده بود. امروزه با تکمیل سیستم ماهواره‌ای، یک تراشه دریافت‌کننده GPS بیش از چند صد دلار قیمت ندارد. با تکمیل سیستم‌های گیرنده و فرستنده GPS و رشد سیستم‌های مخابراتی بعد از سال ۲۰۰۰ استقبال خیلی خوبی از PMU شده است.

۲-۱ واحد اندازه‌گیری فازور

فناوری اندازه‌گیری سنکرون کمیات فازوری شبکه‌های قدرت، فناوری نسبتاً جدیدی می‌باشد و به همین دلیل گروه‌های تحقیقاتی زیادی در سطح دنیا درباره کاربردهای آن فعالیت می‌نمایند. تخمین و نمایش دقیق حالت سیستم قدرت در فواصل زمانی معین امکان‌پذیر بوده که بدین ترتیب می‌توان پدیده‌های دینامیکی سیستم را از یک محل مرکزی مشاهده کرده و عملیات کنترلی مناسب را اعمال نمود. سیستم اندازه‌گیری سنکرون فازوری، فناوری کاملاً جدیدی را برای تخمین حالت کل سیستم قدرت فراهم آورده است. شکل (۲-۱) ساختار پایه‌ای اولین PMU ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱: اجزای اصلی یک PMU امروزی [۱]