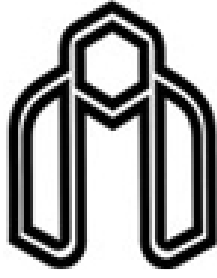


الحمد لله الذي
جعلنا من عباده
الذين لا ينالون
العلم الا بالعلم
والله اعلم
بما نزلنا
والله اعلم
بما نزلنا



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک
گروه قدرت

بررسی اثر پدیده نوسان توان بر عملکرد رله‌های دیستانس
در سیستم‌های قدرت

حمید قاسمی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

اساتید مشاور:

دکتر دستفان - دکتر احمدی فرد

بهمن ۱۳۸۸

دشماره: ۰۷۲۸.آ.ت.پ
تاریخ: ۱۳۸۸/۱۱/۱۷
ویرایش: - - - -



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد / آقای حمید قاسمی رشته برق گرایش: قدرت
تحت عنوان: بررسی اثر پدیده نوسان توان بر عملکرد رله های دیستانس در سیستم های قدرت
که در تاریخ ۱۳۸۸/۱۱/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: خوب) امتیاز (۱۷/۸۴) / دفاع مجدد / مردود

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۹)
۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)
۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)
۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

| امضاء | مرتبه علمی | نام و نام خانوادگی | عضو هیأت داوران |
|-------|------------|--------------------|---------------------------------|
| | استاد | مهدی باهرامی | ۱- استاد راهنما |
| | استاد | امیرحسین جعفری | ۲- استاد مشاور |
| | استاد | امیرحسین جعفری | ۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی |
| | استاد | امیرحسین جعفری | ۴- استاد ممتحن |
| | استاد | امیرحسین جعفری | ۵- استاد ممتحن |

تأیید رئیس دانشکده:

تقدیم بہ مادر مہربانم و ہمسر عزیزم

تشکر و قدردانی

بلبل از فیض گل آموخت سخن ورنه نبود
این همه قول و غزل تعبیه در منقارش
«حافظ»

اکنون که در سایه لطف الهی کار نگارش این پایان نامه به پایان رسیده است بر خود لازم می دانم از زحمات تمامی کسانی که مرا تا این مرحله یاری رسانیده اند سپاسگزاری نمایم.

از استاد عزیزم جناب آقای دکتر مهدی بانژاد به خاطر راهنمایی های ارزنده و زحمات بی دریغشان تشکر می نمایم. سپاسگزارم که مرا به عنوان شاگرد خود پذیرفته و تحت تعلیم و تربیت قرار دادند.

از اساتید گرامی جناب آقای دکتر احمدی فرد و دکتر دستفان که زحمت مشاوره پایان نامه اینجانب را تقبل کردند سپاسگزارم.

از اساتید گرامی جناب آقای دکتر مروی و دکتر دارابی که زحمت ارزیابی پایان نامه اینجانب را تقبل کردند سپاسگزارم.

و در نهایت از زحمات ارزشمند همه معلمانی که در مقاطع مختلف تحصیل، رنج آموختن به من را متحمل شده و مرا مدیون خود ساخته اند تشکر می نمایم.

توفیق روزافزون همه این عزیزان را از خداوند منان مسئلت دارم.

حمید قاسمی

بهمن ۸۸

تعهد نامه

اینجانب حسین قاسمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد / دکتری رشته مهندسی برق - قدرت
دانشکده مهندسی برق در دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه / رساله بررسی اثر سازه‌های فلزی بر
محل اتصال در سازه‌های فولادی تحت راهنمایی دکتر محمد علی باقری متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله 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 / رساله 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- «حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا یافته‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اسبل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی 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 است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات عادی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد .

چکیده

افزایش درخواست‌ها برای استفاده از انرژی برق و ایجاد بازارهای برق باعث تغییرات سریع در نحوه بهره‌برداری از شبکه قدرت شده‌اند. که این باعث بارگیری بیش از حد خطوط انتقال شده است. این امر سبب می‌شود که ژنراتورهای سنکرون شدیداً در معرض ناپایداری قرار گیرند. این ناپایداری‌ها عموماً زمانی رخ می‌دهند که شبکه شدیداً تحت بار بوده و تعدادی خروج پشت سر هم در بازه کوتاهی از زمان رخ داده است. این خروج‌ها باعث نوسان بین واحدها و سیستم‌های مجاور شده و به دلیل افت ولتاژ یا خروج از همگامی به ناپایداری انجامیده است.

یکی از دلایلی که پس از یک اغتشاش بزرگ در شبکه می‌تواند موجب خروج‌های متوالی شود و شبکه را به سمت ناپایداری پیش ببرد، عملکرد اشتباه رله‌های دیستانس به دلیل نوسانی شدن امپدانس دیده شده توسط رله در حین وقوع پدیده نوسان توان است. برای این منظور از عملکرد اشتباه رله دیستانس در هنگام نوسان توان باید جلوگیری شود.

در این پایان‌نامه پدیده نوسان توان و رفتار سیستم در هنگام وقوع این پدیده بررسی می‌شوند. سپس برخی روش‌های مرسوم در مقالات جهت تشخیص نوسان توان تشریح می‌شوند. همچنین از آنجا که در این پایان‌نامه از تبدیل موجک جهت تشخیص نوسان توان استفاده خواهد شد مختصری راجع به تبدیل موجک بیان می‌گردد. پس از آن الگوریتم پیشنهادی که از تبدیل موجک جهت آشکارسازی پدیده نوسان توان استفاده می‌کند تشریح می‌گردد. در این الگوریتم ابتدا از شکل موج ولتاژ تبدیل موجک گرفته می‌شود سپس انرژی طبقات اول تا چهارم آن محاسبه می‌گردد اگر این انرژی‌ها از مقدار ثابتی که با انجام شبیه‌سازی بر روی شبکه مورد مطالعه به دست می‌آید بیشتر بود نشان‌دهنده وقوع خطا در شبکه و اگر کمتر بود نشان‌دهنده وقوع پدیده نوسان توان در شبکه می‌باشد. در فصل آخر نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه بیان می‌شود.

کلیدواژه: نوسان توان، تبدیل موجک، رله دیستانس

فصل اول

مقدمه

- ۱-۱- مقدمه ۱
- ۲-۱- رله دیستانس و تحلیل اثر نوسان توان بر آن ۴
- ۳-۱- ساختار پایان نامه ۸

فصل دوم

معادلات و رفتار نوسان توان

- ۱-۲- مقدمه ۱۱
- ۲-۲- تعاریف ۱۱
- ۳-۲- دلایل وقوع نوسان توان ۱۲
- ۴-۲- اهمیت و خسارت‌های ناشی از نوسان توان ۱۳
- ۱-۴-۲- خسارت‌های ناشی از نوسان توان به ژنراتورها ۱۳
- ۲-۴-۲- خسارت‌های ناشی از نوسان توان به شبکه ۱۳
- ۵-۲- معادلات حاکم بر نوسان توان ۱۴
- ۶-۲- نحوه تغییر امپدانس در حین نوسان توان ۱۷

فصل سوم

روش‌های آشکارسازی نوسان توان و بررسی عملکرد آنها

- ۱-۳- مقدمه ۲۳
- ۲-۳- تشخیص از طریق مولفه‌های متقارن جریان ۲۴
- ۳-۳- تشخیص پدیده نوسان توان از طریق روش برهم‌نهی جریان ۲۴
- ۴-۳- روش محاسبه نرخ تغییر امپدانس ۲۵
- ۱-۴-۳- روش مشخصه‌های هم مرکز ۲۵
- ۲-۴-۳- روش کورکننده‌ها ۲۷
- ۵-۳- طرح اندازه‌گیری نرخ تغییر مقاومت ۳۱
- ۶-۳- تشخیص نوسان توان با استفاده از تغییرات جریان ۳۳
- ۷-۳- طرح ولتاژ مرکز نوسان ۳۴

۳۷ ۸-۳- جمع‌بندی روش‌های تشخیص نوسان توان

فصل چهارم

تبدیل موجک و کاربرد آن در سیستم‌های قدرت

| | |
|----|--|
| ۴۱ | ۱-۴- مقدمه |
| ۴۱ | ۲-۴- پردازش سیگنال |
| ۴۲ | ۳-۴- تحلیل فوریه زمان کوتاه |
| ۴۳ | ۴-۴- تحلیل موجک |
| ۴۷ | ۵-۴- تبدیل موجک گسسته |
| ۵۰ | ۶-۴- تجزیه چند سطحی |
| ۵۲ | ۷-۴- بازسازی سیگنال |
| ۵۵ | ۸-۴- تاریخچه موجک‌ها |
| ۵۶ | ۹-۴- مقدمه‌ای به خانواده‌های موجک‌ها |
| ۵۶ | ۱-۹-۴- موجک Haar |
| ۵۷ | ۲-۹-۴- موجک Daubechies |
| ۵۸ | ۳-۹-۴- موجک Biorthogonal |
| ۵۹ | ۴-۹-۴- موجک Coiflets |
| ۶۰ | ۵-۹-۴- موجک Symlet |
| ۶۰ | ۶-۹-۴- موجک Morlet |
| ۶۱ | ۷-۹-۴- موجک Mexican Hat |
| ۶۲ | ۸-۹-۴- موجک Meyer |
| ۶۲ | ۱۰-۴- کاربردهایی از تبدیل موجک در سیستم‌های قدرت |
| ۶۳ | ۱-۱۰-۴- تشخیص و مکان‌یابی اغتشاش سیستم‌های قدرت با کمک موجک‌ها |
| ۶۴ | ۲-۱۰-۴- فشرده‌سازی و ذخیره‌سازی اطلاعات سیستم‌های قدرت |
| ۶۵ | ۳-۱۰-۴- حفاظت دستگاه‌های قدرت |
| ۶۶ | ۴-۱۰-۴- تحلیل اغتشاش‌های شبکه قدرت |
| ۶۷ | ۵-۱۰-۴- تشخیص نوسان توان با استفاده از موجک |

فصل پنجم

تشخیص نوسان توان با استفاده از موجک دابیچز

۷۱ ۱-۵- تئوری الگوریتم تشخیص نوسان توان با استفاده از تبدیل موجک

| | | |
|----|-------|--|
| ۷۵ | ..... | ۲-۵- بررسی روش ارائه شده با استفاده از شبکه ۹ باس IEEE |
| ۷۵ | ..... | ۱-۲-۵- حالت اول |
| ۸۱ | ..... | ۲-۲-۵- حالت دوم |
| ۸۶ | ..... | ۳-۲-۵- حالت سوم |
| ۹۲ | ..... | ۴-۲-۵- حالت چهارم |
| ۹۶ | ..... | ۳-۵- جمع بندی |

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

| | | |
|-----|-------|-----------------|
| ۹۸ | ..... | ۱-۶- نتیجه گیری |
| ۹۹ | ..... | ۲-۶- پیشنهادات |
| ۱۰۲ | ..... | مراجع |
| ۱۰۵ | ..... | پیوست |

فهرست شکل‌ها

| صفحه | عنوان |
|----------------|---|
| فصل اول | |
| ۲ | شکل (۱-۱): طبقه‌بندی پایداری سیستم‌های قدرت |
| ۵ | شکل (۲-۱): مشخصه چهارگوش رله دیستانس |
| ۵ | شکل (۳-۱): مشخصه مهو رله دیستانس |
| ۶ | شکل (۴-۱): نواحی مکانی عملکرد رله دیستانس |
| ۷ | شکل (۵-۱): شبکه قدرت نمونه برای تحلیل اثر نوسان توان بر رله دیستانس |
| ۸ | شکل (۶-۱): مکان هندسی امیدانس دیده شده از دید رله دیستانس در نوسان پایدار و ناپایدار توان |
| فصل دوم | |
| ۱۵ | شکل (۱-۲): یک شبکه دو ماشینه |
| ۱۶ | شکل (۲-۲): منحنی انتقال توان |
| ۱۷ | شکل (۳-۲): ولتاژ و جریان و توان در حالت نوسان شبکه |
| ۱۷ | شکل (۴-۲): مشخصه‌های چهاروجهی و موهوی رله دیستانس |
| ۱۸ | شکل (۵-۲): سیستم دو ماشینه برای بررسی عملکرد رله‌های دیستانس در هنگام نوسانات زاویه‌ای |
| ۱۹ | شکل (۶-۲): نحوه تغییر امیدانس در هنگام نوسان توان |
| ۲۱ | شکل (۷-۲): نحوه عبور امیدانس نوسانی از ناحیه‌های رله دیستانس با فرض ولتاژهای غیر یکسان |
| فصل سوم | |
| ۲۶ | شکل (۱-۳): مشخصه‌های هم مرکز تشخیص نوسان توان |
| ۲۷ | شکل (۲-۳): لاجیک ارائه شده جهت تشخیص نوسان توان |
| ۲۷ | شکل (۳-۳): مشخصه کورکننده برای تشخیص نوسان توان |
| ۲۸ | شکل (۴-۳): مشخصه کورکننده‌ها با خطوط موازی امیدانس خط |
| ۲۸ | شکل (۵-۳): مشخصه کورکننده‌ها برای تنظیم پارامترهای آن |

- شکل (۳-۶): نمونه‌ای از نواحی تنظیم شده برای روش کورکننده ها ۲۹
- شکل (۳-۷): صفحه امیدانس برای یک نوسان توان ۳۰
- شکل (۳-۸): صفحه امیدانس برای یک نوسان توان (بزرگنمایی اطراف زون رله دیستانس) ۳۱
- شکل (۳-۹): نحوه کاهش مقاومت در نوسان با فراکانس ۰.۱ هرتز ۳۲
- شکل (۳-۱۰): نحوه کاهش مقاومت در صورت وقوع خطا ۳۲
- شکل (۳-۱۱): نحوه کاهش مقاومت در صورت وقوع خطا در زمان نوسان توان ۳۲
- شکل (۳-۱۲): المان تشخیص نوسان جریانی ۳۳
- شکل (۳-۱۳): اصول تشخیص نوسان جریانی ۳۳
- شکل (۳-۱۴): دیاگرام فازوری ولتاژ برای یک سیستم دو ماشینه ۳۵
- شکل (۳-۱۵): شکل $V \cos \phi$ تصویر V_s بر روی محور جریان ۳۶

فصل چهارم

- شکل (۴-۱): نمایش تبدیل فوریه ۴۱
- شکل (۴-۲): نمایش تبدیل فوریه زمان کوتاه ۴۲
- شکل (۴-۳): نمایش تبدیل موجک ۴۳
- شکل (۴-۴): اختلاف تبدیل موجک با تبدیل‌های فوریه، شانون و گابور ۴۴
- شکل (۴-۵): یک سیگنال سینوسی با اعوجاج کوچک ۴۴
- شکل (۴-۶): اختلاف تبدیل فوریه و تبدیل موجک در نشان دادن اغتشاش شکل ۴۵
- شکل (۴-۷): اختلاف موجک‌ها و موج سینوسی ۴۵
- شکل (۴-۸): مفهوم فیلتر شدن سیگنال توسط موجک‌ها ۴۸
- شکل (۴-۹): تبدیل موجک با نرخ نمونه‌برداری پایین ۴۸
- شکل (۴-۱۰): عملکرد تبدیل موجک گسسته یک مرحله‌ای به یک سیگنال سینوسی ۵۰
- شکل (۴-۱۱): درخت تجزیه موجک ۵۱
- شکل (۴-۱۲): نحوه عملکرد درخت تجزیه موجک ۵۱
- شکل (۴-۱۳): تبدیل موجک گسسته معکوس ۵۲
- شکل (۴-۱۴): عملکرد مفهوم نرخ نمونه‌برداری بالا در بازسازی سیگنال ۵۳

- ۵۴ شکل(۴-۱۵): فیلترهای مزدوج آینه‌ای
- ۵۴ شکل(۴-۱۶): بازسازی سیگنال با ضرایب تقریبی و جزئی
- ۵۴ شکل(۴-۱۷): بازسازی ضرایب تقریبی و جزئی
- ۵۵ شکل(۴-۱۸): روش‌های گوناگون بازیابی سیگنال با استفاده از مؤلفه‌های جزئی و تقریبی
- ۵۶ شکل(۴-۱۹): موجک Haar
- ۵۸ شکل(۴-۲۰): خانواده موجک‌های Daubechies
- ۵۹ شکل(۴-۲۱): خانواده موجک‌های Biorthogonal
- ۶۰ شکل(۴-۲۲): خانواده موجک‌های Coiflets
- ۶۰ شکل(۴-۲۳): خانواده موجک‌های Symlet
- ۶۱ شکل(۴-۲۴): موجک Morlet
- ۶۲ شکل(۴-۲۵): موجک Mexican Hat
- ۶۲ شکل(۴-۲۶): موجک Meyer
- ۶۸ شکل(۴-۲۷): شبکه مورد بررسی
- ۶۹ شکل(۴-۲۸): نحوه ترکیب سیگنال PSI با واحد 3-ph رله دیستانس

فصل پنجم

- ۷۳ شکل(۵-۱): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی
- ۷۵ شکل(۵-۲): شبکه سه ماشین (۹ باس IEEE)
- ۷۶ شکل(۵-۳): جریان خط L4-6 در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت اول شبیه‌سازی
- ۷۶ شکل(۵-۴): ولتاژ باس ۶ در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت اول شبیه‌سازی
- ۷۷ شکل(۵-۵): دامنه جریان و ولتاژ اندازه گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی
- ۷۷ شکل(۵-۶): اندازه‌ی امپدانس اندازه گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی
- ۷۸ شکل(۵-۷): منحنی نوسان زاویه ژنراتورها
- ۷۹ شکل(۵-۸): انرژی طبقه ۱ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت اول شبیه سازی
- ۷۹ شکل(۵-۹): انرژی طبقه ۲ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی
- ۸۰ شکل(۵-۱۰): انرژی طبقه ۳ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی

- شکل (۵-۱۱): انرژی طبقه ۴ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی ۸۰
- شکل (۵-۱۲): سیگنال PSB برای حالت اول شبیه‌سازی ۸۱
- شکل (۵-۱۳): جریان خط L4-6 در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت دوم شبیه‌سازی ۸۱
- شکل (۵-۱۴): ولتاژ باس ۶ در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت دوم شبیه‌سازی ۸۲
- شکل (۵-۱۵): دامنه جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی ۸۲
- شکل (۵-۱۶): اندازه‌ی امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی ۸۳
- شکل (۵-۱۷): منحنی نوسان زاویه ژنراتورها ۸۳
- شکل (۵-۱۸): انرژی طبقه ۱ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی ۸۴
- شکل (۵-۱۹): انرژی طبقه ۲ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی ۸۵
- شکل (۵-۲۰): انرژی طبقه ۳ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی ۸۵
- شکل (۵-۲۱): انرژی طبقه ۴ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی ۸۶
- شکل (۵-۲۲): سیگنال PSB برای حالت دوم شبیه‌سازی ۸۶
- شکل (۵-۲۳): جریان خط L4-6 در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت سوم شبیه‌سازی ۸۷
- شکل (۵-۲۴): ولتاژ باس ۶ در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت سوم شبیه‌سازی ۸۷
- شکل (۵-۲۵): دامنه جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی ۸۸
- شکل (۵-۲۶): اندازه‌ی امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی ۸۸
- شکل (۵-۲۷): منحنی نوسان زاویه ژنراتورها ۸۹
- شکل (۵-۲۸): انرژی طبقه ۱ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی ۹۰
- شکل (۵-۲۹): انرژی طبقه ۲ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی ۹۰
- شکل (۵-۳۰): انرژی طبقه ۳ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی ۹۱
- شکل (۵-۳۱): انرژی طبقه ۴ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی ۹۱
- شکل (۵-۳۲): سیگنال PSB برای حالت سوم شبیه‌سازی ۹۲
- شکل (۵-۳۳): دامنه جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی ۹۲
- سازی
- شکل (۵-۳۴): اندازه‌ی امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی ۹۳

- شکل (۳۵-۵): منحنی نوسان زاویه ژنراتورها
- ۹۳
- شکل (۳۶-۵): انرژی طبقه ۱ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی
- ۹۴
- شکل (۳۷-۵): انرژی طبقه ۲ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی
- ۹۴
- شکل (۳۸-۵): انرژی طبقه ۳ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی
- ۹۵
- شکل (۳۹-۵): انرژی طبقه ۴ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی
- ۹۵
- شکل (۴۰-۵): سیگنال PSB برای حالت چهارم شبیه‌سازی
- ۹۶

پیوست

- شکل (۱-۷): شبکه سه ماشین (۹ باس IEEE)
- ۱۰۶

فهرست جداول

| صفحه | عنوان |
|------|--|
| ۶۷ | جدول (۱-۴): طبقات Wavelet و فرکانس های نظیر هر طبقه |
| ۷۴ | جدول (۱-۵): طبقات Wavelet برای فرکانس نمونه برداری ۴۳ کیلوهرتز |
| ۱۰۷ | جدول (۱-۷): مشخصات ژنراتورها در شبکه نمونه دوم |
| ۱۰۷ | جدول (۲-۷): مشخصات ترانسفورماتورها در شبکه نمونه دوم |
| ۱۰۸ | جدول (۳-۷): مشخصات بارها در شبکه نمونه دوم |
| ۱۰۸ | جدول (۴-۷): مشخصات خطوط انتقال در شبکه نمونه دوم |

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

تجدید ساختار در شبکه‌های قدرت و ایجاد بازارهای برق^۱ باعث تغییرات سریع در نحوه بهره‌برداری از شبکه قدرت شده‌اند. امروزه مقادیر بسیار بالای توان از خطوط انتقالی می‌گذرند که واقعاً برای انتقال این توان طراحی نشده‌اند. واحدهای تولیدی خصوصی در مکان‌هایی ساخته می‌شوند که لزوماً مکان‌های بهینه از نظر پایداری و نیازهای شبکه نیستند و شبکه‌های برق به نحوی تغییر داده می‌شوند که امکان استفاده از تمام ظرفیت شبکه میسر گردد. نتیجه این تغییرات این است که واحدهای تولیدی شدیداً در معرض ناپایداری قرار می‌گیرند [۱].

شبکه‌های قدرت در همه جای دنیا خاموشی‌های گسترده^۲ زیادی را در دهه‌های اخیر تجربه کرده‌اند. در تمام این خاموشی‌های گسترده از دست رفتن تولید و بی‌برق شدن مشتری‌های شبکه عده زیادی را تحت تأثیر قرار داده و خسارت‌های زیادی را باعث شده است. این ناپایداری‌ها عموماً زمان‌هایی رخ داده‌اند که شبکه شدیداً تحت بار بوده است و تعدادی خروج پشت سر هم در بازه کوتاهی از زمان رخ داده است. این خروج‌ها باعث نوسان بین واحدها و سیستم‌های مجاور شده و به دلیل افت ولتاژ یا خروج از همگامی به ناپایداری انجامیده است [۱].

با این حال مبحث ناپایداری سیستم‌های قدرت مبحث جدیدی نیست و از دیرباز و از زمانی که اولین شبکه‌های قدرت مورد بهره‌برداری قرار گرفتند مورد توجه بوده و تحقیقات و مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. طراحی، بهره‌برداری و حفاظت یک سیستم قدرت بطور مستقیم یا غیر مستقیم متأثر از این موضوع است که سیستم‌های قدرت در هنگام بروز اغتشاشات ممکن است دچار ناپایداری شوند. معمولاً حد بارگذاری سیستم قدرت، تنظیم زمان عملکرد سیستم‌های حفاظت اصلی و پشتیبان و نیز تنظیمات رله‌های خروج از سنکرونیزم با توجه به مسایل پایداری تعیین می‌شود.

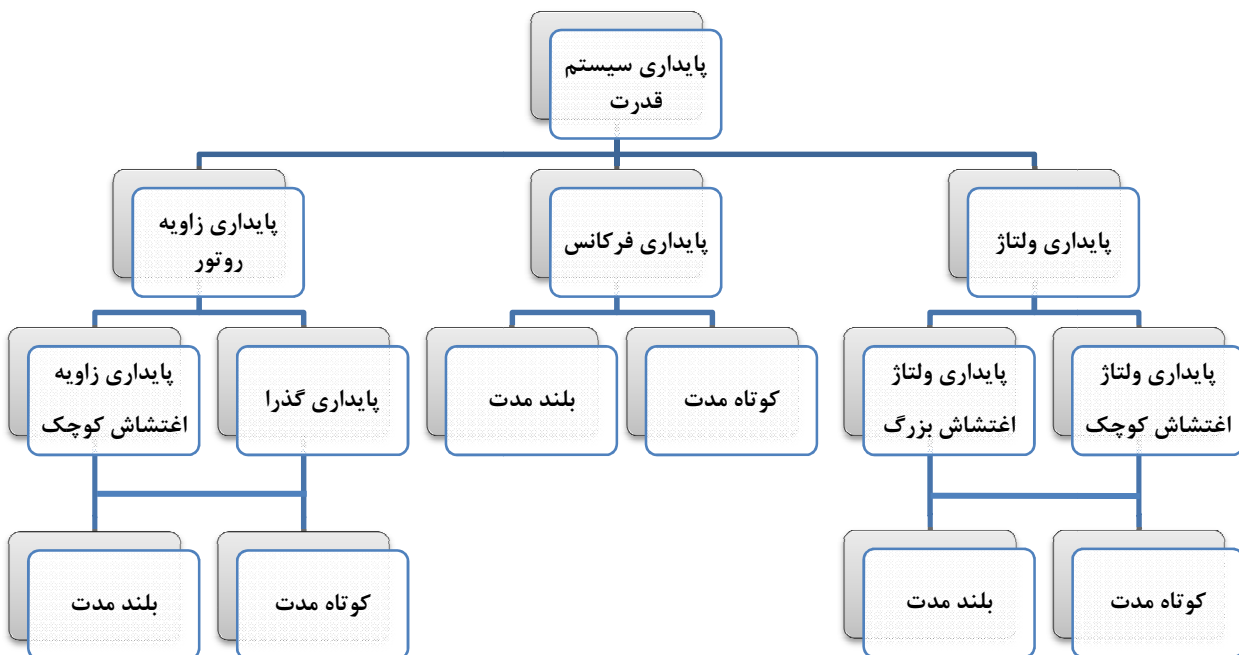
^۱ Power Markets

^۲ Black Out

همان‌طور که بیان شد آن چه که امروزه اهمیت مباحث ناپایداری را افزایش داده است تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت و فشارهای اقتصادی ناشی از آن، و بهره برداری سیستم‌های قدرت مدرن نزدیک‌تر به حد پایداریشان است [۲].

بر اساس گزارش گروه کاری مشترک IEEE و CIGRE ارائه شده است پایداری سیستم قدرت را به سه گروه بزرگ پایداری ولتاژی، پایداری فرکانسی و پایداری زاویه‌ای، مطابق شکل (۱-۱)، طبقه بندی می‌کنند [۳].

پایداری ولتاژ مربوط به توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار تمامی باس‌های خود در محدوده مجاز پس از وقوع یک اغتشاش نسبت به شرایط اولیه عملکرد آن می‌باشد. پایداری فرکانسی به توانایی سیستم قدرت در حفظ فرکانس ماندگار خود به دنبال یک اغتشاش شدید در شبکه و در نتیجه عدم تعادل بین تولید و مصرف مربوط می‌شود و پایداری زاویه‌ای به توانایی ماشین‌های سنکرون سیستم یک شبکه قدرت به هم پیوسته در حفظ همگامی خود، پس از مواجه شدن با یک اغتشاش می‌باشد [۳].



شکل (۱-۱): طبقه بندی پایداری سیستم‌های قدرت [۳]

نوسان توان^۱ که در طبقه‌بندی قبل پایداری زاویه روتور را به خطر می‌اندازد امری شایع در شبکه‌های قدرت است. نوسان توان در یک شبکه ممکن است با ورود یا خروج یک خط انتقال، ورود یا خروج یک واحد تولیدی، ورود یا خروج بار، وقوع اتصال کوتاه و کلاً هر تغییر عمده ای در وضعیت جاری شبکه به وجود آید.

نوسان توان از آن جهت که می‌تواند منجر به ناپایداری سیستم قدرت شود، امری خطیر است و باید مورد توجه قرار گیرد. از طرفی هر نوسان توانی منجر به ناپایداری شبکه نمی‌شود. لذا صرف تشخیص نوسان توان و جدا کردن قسمت نوسان‌کننده از شبکه کافی نیست، زیرا ممکن است موجب جدا کردن بی دلیل بخش‌هایی از شبکه گردد (در مواردی که نوسان به ناپایداری منجر نمی‌شود). با توجه به موارد ذکر شده، علاوه بر تشخیص نوسان توان، نوع آن هم پایدار یا ناپایدار باید در حداقل زمان ممکن تشخیص داده شود تا عملکرد لازم در هر مورد در زمان مناسب صورت گیرد.

در برخورد با مسئله نوسان توان باید به این صورت عمل کرد: ابتدا نوسان توان تشخیص داده شود و سپس پایدار بودن یا نبودن آن مشخص گردد. در صورت پایداری باید از روش‌های محدود کردن عملکرد رله‌های دیستانس برای جلوگیری از عملکرد اشتباه استفاده شود و در صورت ناپایداری دو ناحیه نوسان‌کننده شبکه باید از هم جدا شوند و اصطلاحاً دو جزیره تشکیل شود. در این حالت جدا شدن دو شبکه از نقطه بهینه به صورتی که تعادل تولید و مصرف در جزیره‌ها تا حد ممکن برقرار باشد بسیار مهم است.

پس در برخورد با نوسان توان دو مسئله مهم وجود دارد که از آن‌ها با نام‌های نوسان توان و خروج از همگامی^۲ یاد می‌شود. وظیفه واحد تشخیص نوسان توان^۳ که در رله‌های مدرن وجود دارد جلوگیری از عملکرد ناخواسته رله دیستانس در حین نوسان توان است. مهمترین هدف از نصب واحد تشخیص نوسان توان در رله‌ها تمایز قرار دادن بین نوسان توان و خطا، جلوگیری از عملکرد واحد

¹ Power Swing

² Out of Step

³ Power Swing Detection

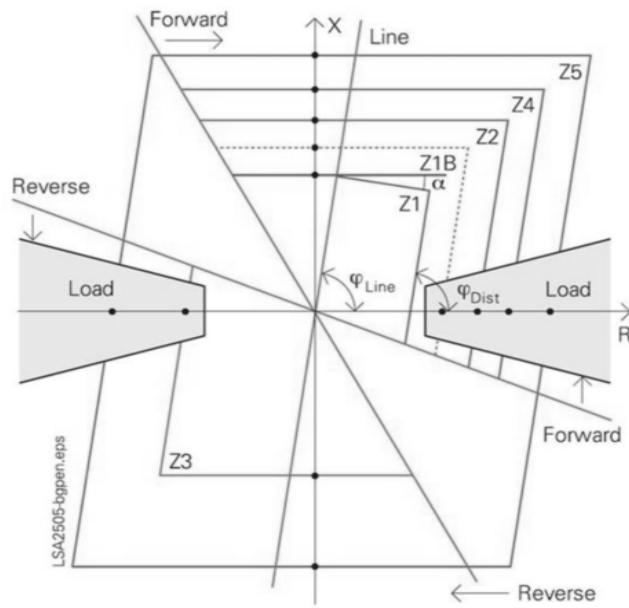
دیستانس در حین نوسان، و همچنین تشخیص وقوع خطای احتمالی در حین نوسان توان است. هدف از نصب واحد قطع خروج از همگامی^۱ نیز تمایز نهادن بین نوسان توان پایدار و ناپایدار است. این واحد باید در صورت ناپایدار بودن نوسان، در زمان مناسبی با توجه به زاویه و ولتاژ ژنراتور جدا شدن شبکه از مکان‌های مشخص شده را آغاز کند تا پایداری شبکه حفظ شود و شبکه بتواند به کار خود ادامه دهد [۱].

با پیشرفت الگوریتم‌های تشخیص نوسان توان و روش‌های مقابله با آن، می‌توان حاشیه‌های احتیاط در نظر گرفته شده در طراحی‌ها و عملکردها را کاهش داد و به این ترتیب از تجهیزات و سرمایه‌گذاری‌ها بهتر و بیشتر استفاده کرد. مثلاً بدون نصب خط جدید و با افزایش توان انتقالی از خط موجود به دلیل کارایی سیستم‌های تشخیص نوسان توان و مقابله با آن ظرفیت خط را افزایش داد و یا توان بیشتری از یک نیروگاه استحصال کرد.

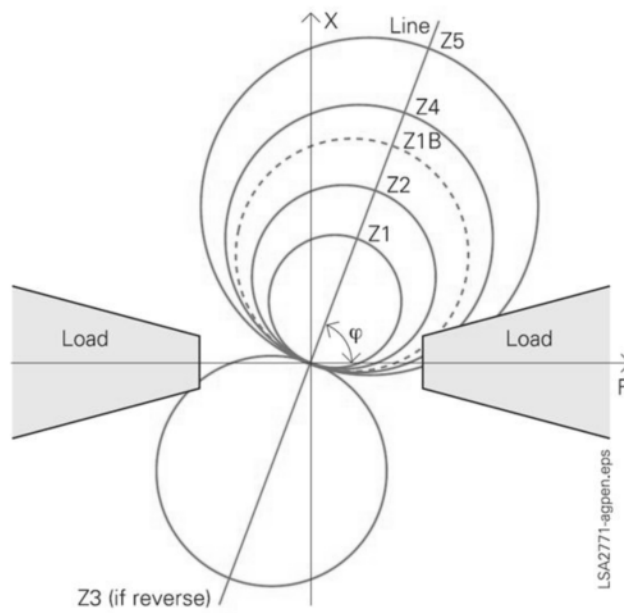
۱-۲- رله دیستانس و تحلیل اثر نوسان توان بر آن

اساس عملکرد در رله‌های دیستانس بر اساس اندازه‌گیری فاصله الکتریکی رله تا محل خطا و با توجه به امپدانس خطوط و جریان جاری در آنها صورت می‌گیرد. در نتیجه هر رله دیستانس امپدانس را تحت عنوان امپدانس تنظیمی دارا می‌باشد تا به عنوان مرجع امپدانس از آن بهره‌گیری. امپدانس یاد شده عددی مختلط می‌باشد که ناحیه عملکرد رله را در صفحه RX ، به صورت دایره‌ای به مرکز نصف آن امپدانس، یا نواحی تعریف شده دیگری که با توجه به نوع رله تعیین می‌شوند نمایش می‌دهد. در شکل‌های (۱-۲) و (۱-۳) دو نمونه از مشخصه‌های امپدانس رله نشان داده شده است.

^۱ Out of Step Tripping



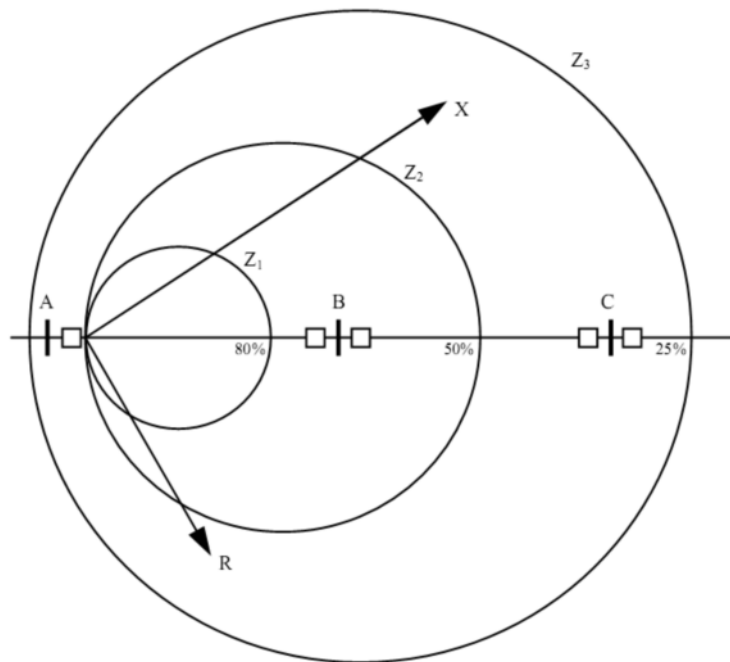
شکل (۱-۲): مشخصه چهار گوش رله دیستانس [۴]



شکل (۱-۳): مشخصه مهو رله دیستانس [۴]

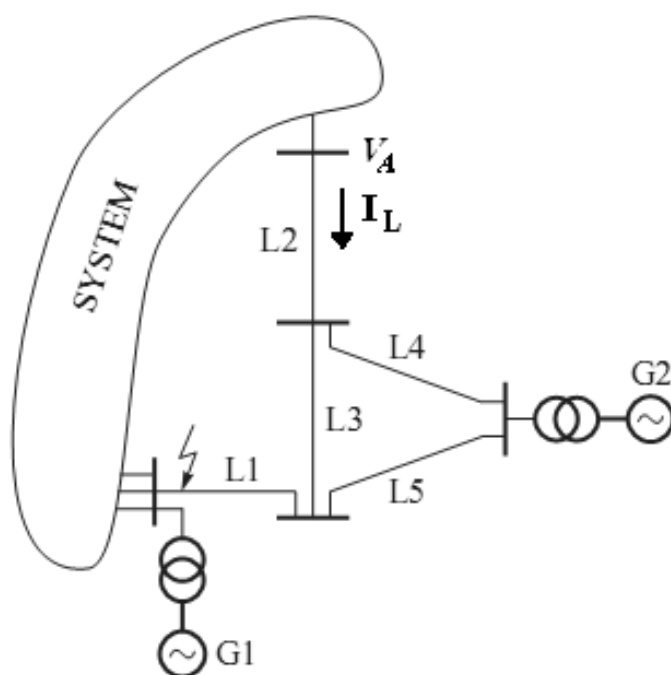
رله‌های دیستانس برای عملکرد خود از نواحی مختلفی بهره می‌گیرند. به عبارت دیگر این نوع رله‌ها خطاهای واقع در سیستم را دسته‌بندی کرده و رفتار زمانی متفاوتی را به ازای هر یک از آنان از خود بروز می‌دهند در ناحیه یک معمولاً امپدانس معادل ۸۰٪ خط اول (خط اصلی) تنظیم می‌شود و زمان عملکرد آن خیلی سریع یعنی حدود ۰/۰۱ ثانیه است و به عنوان حفاظت اصلی خط به کار می‌رود [۵].

امپدانس تنظیم ناحیه دوم رله معمولاً برابر کل خط اصلی به اضافه حدود ۵۰٪ امپدانس خط بعدی است و زمان عملکرد آن حدود ۰/۴ ثانیه است. ناحیه سوم رله دیستانس دارای امپدانس تنظیمی برابر کل خط اول به اضافه کل خط دوم به علاوه حدود ۲۵٪ خط سوم است. زمان عملکرد این ناحیه حدود ۰/۸ ثانیه است. شکل (۱-۴) نواحی تنظیم شده رله را نشان می‌دهد [۵].



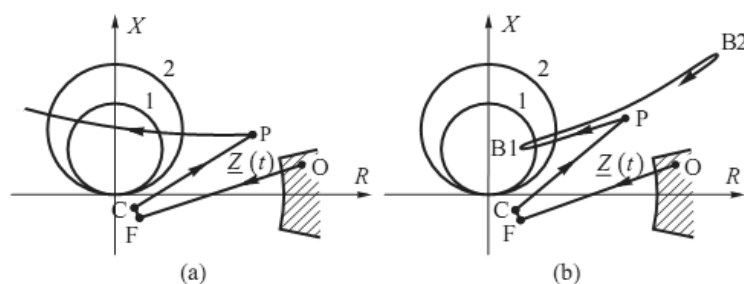
شکل (۱-۴): نواحی مکانی عملکرد رله دیستانس

سیستم قدرت نشان داده شده در شکل (۱-۵) را در نظر بگیرید [۶]. رله دیستانس قرار گرفته در شینه A وظیفه حفاظت از خط L2 را دارد. در شرایط بهره‌برداری عادی ولتاژ شینه A نزدیک مقدار نامی خود می‌باشد و جریان عبوری از خط نسبت به جریان اتصال کوتاه کوچک می‌باشد. در نتیجه مقدار امپدانس دیده شده از دید رله دیستانس قرار گرفته در شینه A بزرگ می‌باشد و در نقطه دوری از زون‌های حفاظتی رله دیستانس قرار دارد. حال فرض کنید خطایی در خط L1 ایجاد می‌شود. با وقوع اتصال کوتاه، افت بزرگی در ولتاژهای سیستم ایجاد می‌شود و در جریان‌ها افزایش ناگهانی به وجود می‌آید. در نتیجه امپدانس دیده شده در شینه A کاهش می‌یابد. بعد از رفع خطا امپدانس مجدداً افزایش می‌یابد.



شکل (۱-۵): شبکه قدرت نمونه برای تحلیل اثر نوسان توان بر رله دیستانس [۶]

شکل (۱-۶) مکان هندسی امپدانس دیده شده را برای حالتی که نوسان توان پایدار و ناپایدار در شبکه رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. در هر دو حالت امپدانس از نقطه O که در ناحیه بار قرار دارد شروع می‌شود. هنگامی که خطایی رخ می‌دهد، امپدانس از نقطه O به نقطه F پرش می‌کند. در حین خطا امپدانس از نقطه F به نقطه C منتقل می‌شود. با توجه به اینکه خطا روی خط تحت حفاظت رله قرار نگرفته است نقاط F و C خارج از محدوده حفاظتی رله می‌باشند. با رفع خطا امپدانس از نقطه C به نقطه P پرش می‌کند. با توجه به انرژی که سیستم در حین خطا گرفته، زاویه توان بعد از خطا نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه امپدانس دیده شده کاهش می‌یابد. در نوسان توان پایدار امپدانس تا نقطه $B1$ کاهش می‌یابد و سپس بر می‌گردد و به نقطه $B2$ می‌رود. در نوسان توان ناپایدار منحنی امپدانس بر نمی‌گردد و به صورت دایره حرکت می‌کند. سرعت حرکت امپدانس بسته به سرعت تغییر زاویه توان می‌باشد. با توجه به اینکه در حین نوسان توان زاویه بار دارای سرعت کمی می‌باشد، امپدانس هم با سرعت کم حرکت می‌کند. در نتیجه ممکن است رله دیستانس مدت زمان کافی جهت صدور فرمان قطع را پیدا کند.



شکل (۱-۶): مکان هندسی امیدانسی دیده شده از دید رله دیستانس در نوسان توان پایدار (a) و ناپایدار (b) [۶]

۱-۳- ساختار پایان نامه

در این پایان نامه ابتدا در فصل دوم به بررسی نوسان توان پرداخته شده است. دلیل وقوع این پدیده بررسی شده و رفتار سیستم در نوسان توان نشان داده شده است. همچنین نوسان توان پایدار و ناپایدار از نظر معادلات و شکل موج ها با هم مقایسه شده اند.

در فصل سوم ابتدا روش سنتی تشخیص نوسان توان که هنوز در غالب رله ها برای تشخیص نوسان توان به کار گرفته می شود بیان شده است. سپس تعداد دیگری از الگوریتم های تشخیص نوسان توان که در مراجع مختلف ذکر شده اند عنوان شده است و راجع به آنها به طور خلاصه توضیح داده شده است. در این فصل سعی شده است تا روش های متنوع و متفاوتی برای تشخیص نوسان توان ذکر شوند. این فصل با جمع بندی و مقایسه این روش ها با هم پایان می یابد.

در فصل چهارم تبدیل موجک^۱ و کاربردهایی از آن در سیستم های قدرت مورد بررسی قرار می گیرد این فصل با تشخیص پدیده نوسان توان با استفاده از تبدیل موجک به پایان می رسد.

در فصل پنجم الگوریتم پیشنهادی تشخیص پدیده نوسان توان به کمک تبدیل موجک شرح داده خواهد شد و این روش با استفاده از شبکه ۹ باسه IEEE مورد مطالعه قرار می گیرد و عملکرد آن در حالت های مختلف نوسان توان و خطا مورد ارزیابی قرار می گیرد.

فصل ششم به جمع بندی مطالب ارائه شده در این گزارش و نتیجه گیری نهایی اختصاص داده

¹ Wavelet Transform

شده است.

فصل دوم

معادلات و رفتار نوسان توان

۲-۱- مقدمه

در این فصل به دلایل وقوع نوسان توان، اهمیت نوسان توان و خسارت‌های ناشی از آن، معادلات حاکم بر نوسان توان، نوسان توان پایدار و ناپایدار، شکل موج‌های مرتبط با نوسان توان و ... می‌پردازیم. همچنین راجع به دلیل عملکرد اشتباه رله‌های دیستانس در صورت وقوع نوسان توان که مسئله بسیار مهمی است صحبت خواهیم کرد. لازم به ذکر است که انجام مطالعات برای شناخت هر پدیده‌ای، یکی از مهمترین و اصلی‌ترین مراحل، قبل از مرحله مقابله با عوارض سوء آن می‌باشد. پس از آن، می‌توان با انجام مطالعات بیشتر عوارض سوء یاد شده را، تحت کنترل درآورد و با آن مقابله کرد.

۲-۲- تعاریف

در این قسمت به تعریف چند اصطلاح پرکاربرد در مبحث نوسان توان می‌پردازیم [۱].

- نوسان توان: نوسان در توان منتقل شونده از سه فاز که هنگامی اتفاق می‌افتد که زاویه روتور ژنراتور نسبت به بقیه ژنراتورها افزایش یا کاهش می‌یابد. این اتفاق می‌تواند به دنبال تغییرات دامنه بار یا جهت آن، کلیدزنی خط، خروج واحدهای تولیدی، خطاها و ... اتفاق افتد.
- لغزش قطب^۱: شرایطی که در آن زاویه ولتاژ ترمینال یک یا دسته‌ای از ژنراتورها نسبت به بقیه شبکه تا ۱۸۰ درجه عقب می‌افتد.
- نوسان توان پایدار^۲: نوسان توانی که منجر به لغزش قطب نشود و پس از نوسان، ژنراتور به نقطه کار پایدار و قابل قبول دیگری برسد.
- نوسان توان ناپایدار^۳: نوسان توانی که منجر به لغزش قطب شود و نیاز به انجام اقدامات اصلاحی^۴ داشته باشد.

¹ Pole Slip

² Stable Power Swing

³ Unstable Power Swing

⁴ Corrective Actions

- خروج از همگامی: همان نوسان توان ناپایدار است.
- مرکز الکتریکی سیستم^۱: نقطه یا نقاطی از شبکه که در حین نوسان توان ناپایدار ولتاژ آن‌ها صفر می‌شود.

۲-۳- دلایل وقوع نوسان توان

نوسان توان می‌تواند به دلیل اعمال یک اغتشاش خارجی به سیستم، خطا بر روی سیستم تحریک یک ژنراتور، افزایش توان محرک ورودی ژنراتور^۲، و یا هر تغییر عمده دیگری در شبکه بوجود آید.

پس مهمترین عوامل ایجاد نوسان توان را می‌توان به شکل زیر نام برد:

- انواع خطاهای گذرا
 - تغییرات ناگهانی و شدید بار
 - کلید زنی خطوط
 - ورود یا خروج واحدهای تولیدی
 - از دست رفتن سیستم تحریک^۳ ژنراتور
- از آن‌جا که واحدهای موجود در شبکه، یعنی واحدهای ژنراتوری، بسیار بزرگ و حجیم هستند، از این رو اینرسی بسیار بالایی دارند و جا به جا شدن نقطه کار آن‌ها همراه با نوسان خواهد بود. به این دلیل به طور کلی هر تغییر عمده‌ای که در شبکه ایجاد شود و لازمه آن تغییر نقطه کار ژنراتورهای شبکه، به صورت دائم یا موقت باشد، منجر به ایجاد نوسان در شبکه خواهد شد.

از دیدگاه یک ژنراتور شبکه، نوسان توان هنگامی اتفاق می‌افتد که توان مکانیکی ورودی به توربین ژنراتور برابر با توان الکتریکی خروجی از ترمینال آن نباشد. در این هنگام ژنراتور یا سرعت می‌گیرد و یا سرعت خود را از دست می‌دهد و اگر این حالت برای مدت زمان طولانی (بیش از زمان

¹ Electrical System Center

² Prime Mover

³ Loss of Excitation

بحرانی) به طول بیانجامد، ژنراتور نمی‌تواند به حالت همگام با شبکه^۱ بازگردد و در این زمان خروج از همگامی رخ خواهد داد [۷].

۲-۴- اهمیت و خسارت‌های ناشی از نوسان توان

نوسان توان از آن جهت که می‌تواند به شبکه خسارت‌های جبران ناپذیر زیادی بزند، بسیار مورد توجه است و اگر در صورت بروز نوسان توان اقدامات حفاظتی لازم برای مقابله با آن صورت نگیرد، شبکه به سمت ناپایداری پیش خواهد رفت. خسارت‌های ناشی از نوسان توان را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد که در ادامه شرح داده شده است.

۲-۴-۱- خسارت‌های ناشی از نوسان توان به ژنراتورها

نوسان توان می‌تواند از طرق مختلف خسارت‌های زیادی به ژنراتورهای شبکه وارد کند. اگر ژنراتور به یک شبکه قوی متصل باشد، در صورت بروز نوسان توان، جریان‌های نوسانی در حد جریان‌های خطا افزایش پیدا می‌کنند و این امر هم از نظر مکانیکی و هم از نظر افزایش دمای هادی‌ها می‌تواند باعث آسیب دیدن ژنراتور شود.

همچنین نوسان توان باعث بروز نوساناتی^۲ روی گشتاور محور ماشین می‌شود و این نوسانات می‌تواند منجر به رزونانس^۳ محور ژنراتور گردد. دامنه نوسانات روی محور در صورت ادامه نوسان توان افزایش می‌یابد. لذا در صورت وقوع عدم همگامی، ژنراتور باید در کوتاهترین زمان ممکن از شبکه قدرت جدا گردد [۷].

۲-۴-۲- خسارت‌های ناشی از نوسان توان به شبکه

در هنگام بروز نوسان توان متغیرهای شبکه شامل ولتاژ و جریان و توان حالت عادی خود را

¹ Synchronization

² Pulsations

³ Resonance

از دست می‌دهند و تخریب می‌شوند. این ولتاژها و جریان‌های غیر عادی می‌توانند باعث عملکرد اشتباه رله‌های شبکه (خصوصاً رله‌های دیستانس) شوند و عملکرد اشتباه ادوات حفاظتی شبکه می‌تواند سیستم را تا مرز ناپایداری پیش ببرد.

فرض کنید خطایی روی یکی از خطوط شبکه اتفاق می‌افتد و با عملکرد رله‌های خط خطا دار این خط از شبکه جدا می‌گردد. این امر منجر به نوسانی شدن شبکه می‌شود. اگر نوسان شبکه باعث عملکرد اشتباه یک رله دیستانس دیگر شود، خط دیگری نیز از شبکه جدا خواهد شد و این خروج‌های پشت سر هم^۱ می‌تواند منجر به ناپایداری کل یا بخش بزرگی از سیستم قدرت شود.

پس نتیجه می‌گیریم که مهمترین خسارت ناشی از نوسان توان در صورت عملکرد ناصحیح رله، ناپایداری شبکه قدرت خواهد بود. خسارت‌های ناشی از خاموشی‌های گسترده در شبکه قدرت، از آن جا که دارای جنبه‌های امنیتی نیز هست، غیر قابل تخمین است [۷].

۲-۵- معادلات حاکم بر نوسان توان

هنگامی که توان مکانیکی ورودی به ژنراتور از توان الکتریکی خروجی بیشتر یا کمتر شود، طبق رابطه (۱-۲) زاویه روتور ژنراتور افزایش یا کاهش می‌یابد.

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e = P_m - \frac{E_S E_R}{X} \sin(\delta) \quad (1-2)$$

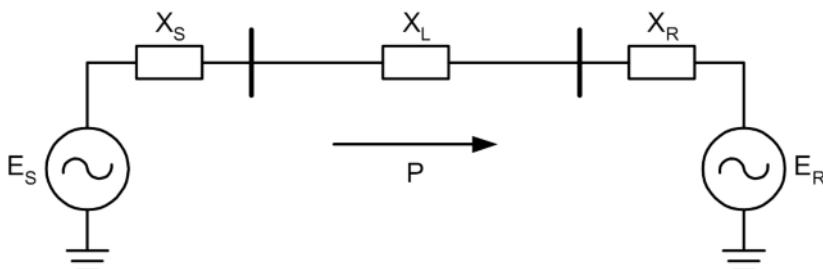
در این رابطه H ضریب اینرسی ماشین است. P_m و P_e به ترتیب توان‌های مکانیکی و الکتریکی، و E_S و E_R به ترتیب ولتاژ سمت فرستنده و گیرنده هستند. X امپدانس بین دو ولتاژ و δ زاویه روتور ماشین است.

طبق این رابطه اگر توان مکانیکی از توان الکتریکی بیشتر شود، روتور ژنراتور شتاب می‌گیرد و زاویه آن نسبت به بقیه ژنراتورها افزایش می‌یابد. اما اگر توان الکتریکی از توان مکانیکی بیشتر شود، این تفاوت توان ورودی و خروجی از انرژی جنبشی روتور تامین می‌شود و لذا سرعت روتور کاهش

¹ Cascading Outages

می‌یابد و در نتیجه زاویه آن کم می‌شود.

فرض کنید یک شبکه مانند شبکه شکل (۱-۲) داشته باشیم.



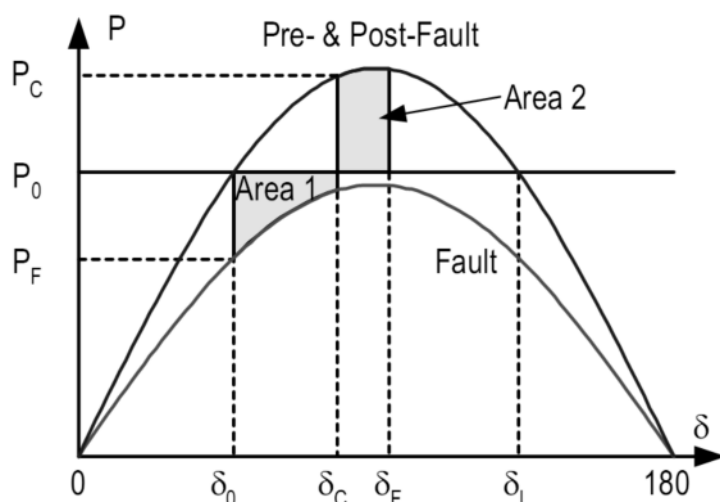
شکل (۱-۲): یک شبکه دو ماشینه

معادله توان انتقالی بین این دو منبع مانند رابطه (۲-۲) خواهد بود.

$$P(\delta) = \frac{|E_S| \cdot |E_R|}{X} \sin(\delta) \quad (2-2)$$

پس منحنی توان - زاویه^۱ طبق منحنی بالایی شکل (۲-۲) و نقطه کار شبکه نقطه P_0 و δ_0 خواهد بود. در این هنگام با وقوع خطا، توان الکتریکی خروجی کاهش می‌یابد و لذا منحنی توان-زاویه منحنی پایین خواهد بود. در این زمان زاویه واحد فرستنده توان روی منحنی پایین افزایش می‌یابد. در زمانی که خطا برطرف می‌شود، زاویه واحد برابر δ_c است. با رفع خطا توان به منحنی قبل بر می‌گردد و روی آن افزایش می‌یابد. این افزایش تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که مساحت دو ناحیه ۱ و ۲ در شکل (۲-۲) برابر شود. در این زمان ژنراتور کل انرژی اضافی تحویل گرفته شده را پس داده است و زاویه شروع به کاهش خواهد کرد [۸].

^۱ Power-Delta Curve



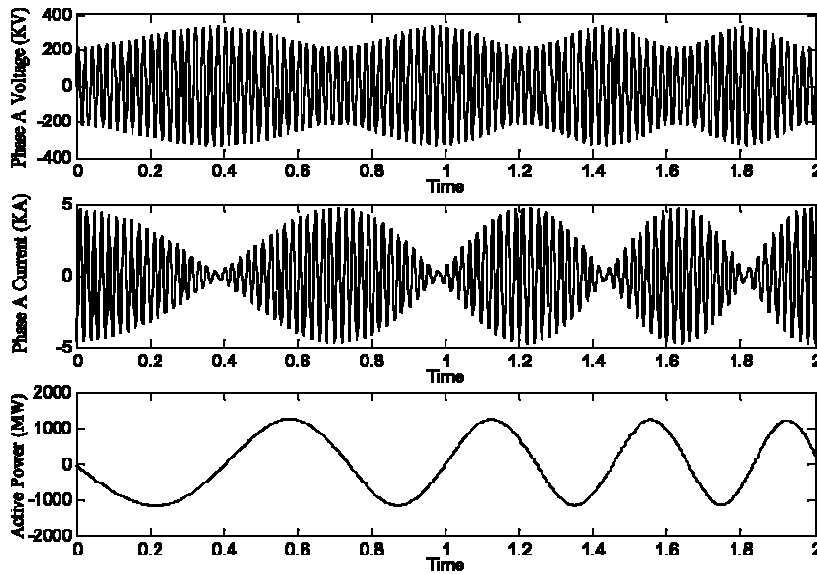
شکل (۲-۲): منحنی انتقال توان [۷]

با استفاده از منحنی شکل (۲-۲)، پایداری یا ناپایداری نوسان توان به این صورت بررسی می‌گردد: اگر پیش از آن که توان روی منحنی بالایی به P_0 برسد مساحت این دو ناحیه برابر شد، افزایش زاویه متوقف می‌شود و δ کاهش می‌یابد و پس از چند نوسان سیستم در نقطه کار جدیدش پایدار خواهد شد. اما اگر δ تا نقطه δ_L افزایش پیدا کرد و دو ناحیه با هم برابر نشدند، افزایش زاویه دیگر متوقف نخواهد شد و زاویه روتور همچنان افزایش پیدا خواهد کرد. در این حالت خروج از همگامی رخ داده است و این ژنراتور باید هرچه سریع‌تر از شبکه جدا شود.

با توجه به این توضیحات مشخص می‌گردد که هر چه خطا دیرتر برطرف شود، به دلیل افزایش سطح شتاب دهنده A_1 و کاهش سطح شتاب گیرنده A_2 ، احتمال ناپایداری سیستم افزایش می‌یابد. به این ترتیب می‌توان برای این شبکه یک زمان حیاتی رفع خطا^۱ به دست آورد که اگر زمان رفع خطا از آن بیشتر شود، ژنراتور دیگر نمی‌تواند حالت همگامی با شبکه را باز یابد [۸].

شکل موج‌های ولتاژ و جریان و توان در هنگام نوسان شبکه در شکل (۲-۳) آمده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ولتاژ و جریان یک پوش سینوسی با فرکانس پایین (فرکانس نوسان) دارند. همچنین توان با فرکانس نوسان در حال نوسان است.

^۱ Critical Fault Clearing Time

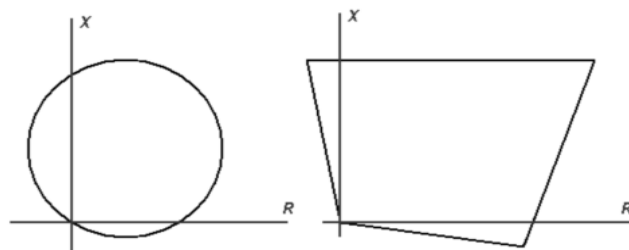


شکل (۲-۳): ولتاژ و جریان و توان در حالت نوسان شبکه

۲-۶- نحوه تغییر امپدانس در هنگام نوسان توان

همان طور که می‌دانیم نحوه عملکرد رله دیستانس به این صورت است که با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان توسط PT و CT امپدانس دیده شده توسط رله را محاسبه می‌کند. اگر خطایی در خط پیش روی رله رخ نداده باشد، امپدانس دیده شده باید از امپدانس خط بیشتر باشد. اما در صورت بروز خطا این امپدانس کمتر از کل امپدانس خط خواهد شد.

برای این منظور در رله دیستانس ناحیه‌های حفاظتی مختلفی برای عملکرد با تاخیرهای متفاوت تعریف می‌شوند. این ناحیه‌ها همان‌طور که در شکل (۲-۴) دیده می‌شود، معمولاً به دو شکل موهو^۱ یا چهاروجهی^۲ هستند.



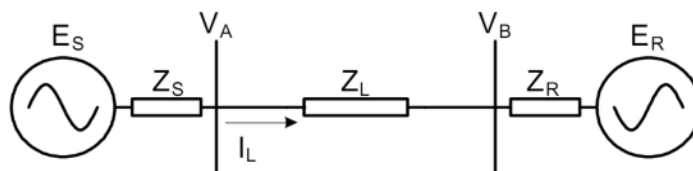
شکل (۲-۴): مشخصه‌های چهاروجهی و موهوی رله دیستانس

^۱ Mho Characteristic

^۲ Quadrilateral Characteristic

همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد نوسان توان، شکل موج‌های ولتاژ و جریان را نوسانی می‌کند و از این جهت می‌تواند باعث عملکرد اشتباه رله دیستانس در تشخیص خطا روی خط انتقال شود.

سیستم دو ماشینه‌ی نشان داده شده در شکل (۵-۲) شکل (۱-۱): طبقه بندی پایداری سیستم‌های قدرت [۳] را می‌توان برای بررسی عملکرد رله‌های دیستانس در هنگام نوسانات زاویه‌ای مورد استفاده قرار داد. با تعیین امپدانس دیده شده توسط رله برای زاویه‌های انتقال توان مختلف می‌توان اثر نوسانات زاویه‌ای را در عملکرد رله مطالعه نمود [۱].



شکل (۵-۲): سیستم دو ماشینه برای بررسی عملکرد رله‌های دیستانس در هنگام نوسانات زاویه‌ای [۱]

در شکل (۵-۲) مقادیر E_S و E_R ولتاژهای داخلی ژنراتورها و Z_S و Z_R امپدانس‌های منابع معادل هستند. E_R به عنوان مرجع فازور در نظر گرفته می‌شود و δ بیانگر زاویه‌ای است که E_S از E_R پیش فاز است. همچنین ضریب k بیانگر نسبت اندازه ولتاژ فرستنده (E_S) به اندازه ولتاژ گیرنده (E_R) است. لذا جریان عبوری از خط در محل رله از رابطه (۳-۲) به دست می‌آید [۱].

$$I_L = \frac{E_S - E_R}{Z_S + Z_L + Z_R} \quad (۳-۲)$$

امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله را می‌توان به صورت رابطه (۴-۲) نوشت.

$$Z = \frac{V_A}{I_L} = \frac{E_S - I_L Z_S}{I_L} = \frac{E_S}{I_L} - Z_S = \frac{E_S (Z_S + Z_L + Z_R)}{E_S - E_R} - Z_S \quad (۴-۲)$$

همچنین:

$$\frac{E_S}{E_S - E_R} = \frac{k(\cos \delta + j \sin \delta)}{k(\cos \delta + j \sin \delta) - 1} = \frac{k[(k - \cos \delta) - j \sin \delta]}{(k - \cos \delta)^2 + (\sin \delta)^2} \quad (5-2)$$

در حالت خاصی که نسبت k برابر یک می باشد رابطه (5-2) به صورت رابطه (6-2) در می آید.

$$\frac{E_S}{E_S - E_R} = \frac{1}{2} \left(1 - j \cot \frac{\delta}{2}\right) \quad (6-2)$$

و در نهایت امپدانس اندازه گیری شده توسط رله به صورت رابطه (7-2) خواهد بود.

$$Z = \frac{V_A}{I_L} = \frac{(Z_S + Z_L + Z_R)}{2} \left(1 - j \cot \frac{\delta}{2}\right) - Z_S \quad (7-2)$$

همچنان که ذکر شد δ بیانگر زاویه بین دو منبع می باشد. تفسیر هندسی معادله (5-2) را در

شکل (6-2) می توان دید. در صورتی که اندازه ولتاژ دو منبع یکسان باشد، مسیر حرکت امپدانس دیده

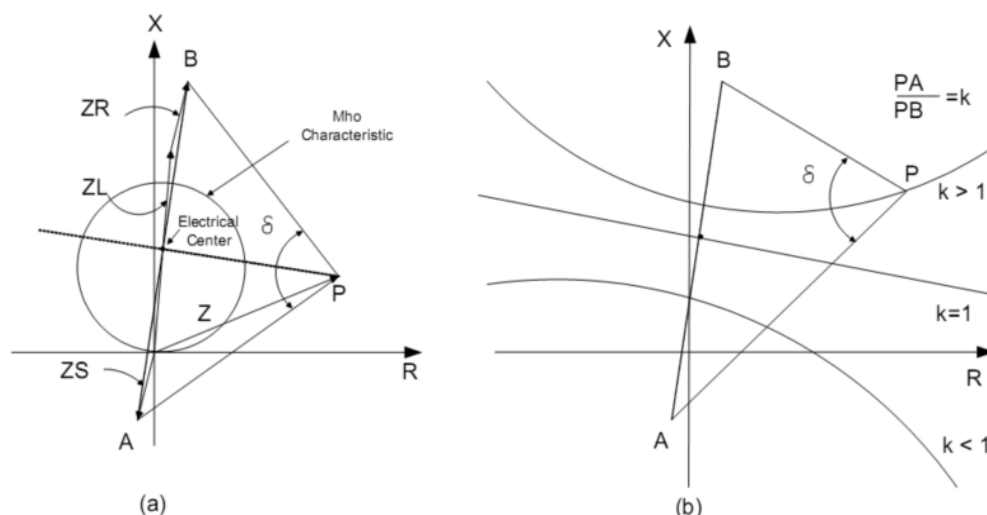
شده توسط رله یک خط راست خواهد بود. در این حالت امپدانس دیده شده توسط رله، روی خطی

که خط امپدانس بین دو منبع A و B را در نقطه وسط آن به دو نیم تقسیم می کند، عبور می کند. به

این نقطه مرکز الکتریکی نوسان گفته می شود. در شکل (2-6-2) زاویه بین دو پاره خطی که نقطه P را

به نقطه های A و B متصل می کند برابر زاویه δ می باشد. وقتی که زاویه δ به 180° درجه می رسد،

امپدانس دقیقاً در مرکز الکتریکی نوسان قرار می گیرد [1].



شکل (2-6): نحوه تغییر امپدانس در هنگام نوسان توان [1]

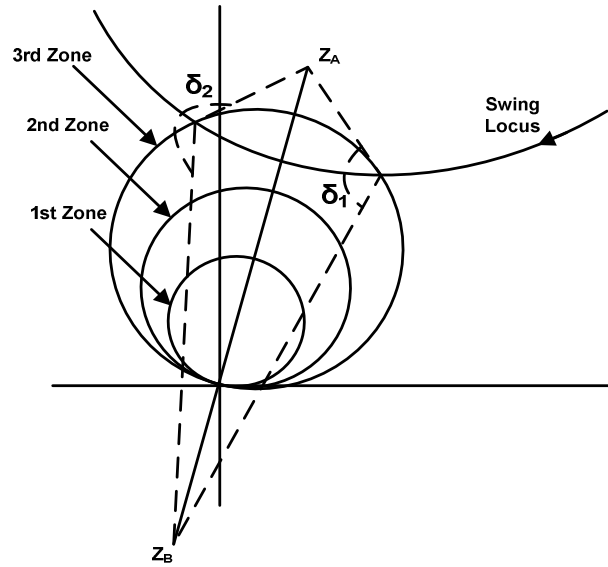
ملاحظه می‌شود که اگر مرکز الکتریکی شبکه در هنگام نوسان روی مشخصه امپدانس خط انتقال قرار بگیرد، مکان هندسی امپدانس، مشخصه عملکرد رله را حتماً قطع می‌کند. اگر نسبت اندازه ولتاژ منابع یک نباشد، مسیر مکان هندسی امپدانس به صورت دایره خواهد بود که در شکل (۲-۶-۲) نشان داده شده است. مرکز دایره و شعاع آن تابعی از مقدار k می‌باشد و مرکز آنها در امتداد خط امپدانس Z_{AB} می‌باشد. برای حالت $|E_A| > |E_B|$ مرکز دایره بالای مرکز الکتریکی سیستم خواهد بود و در صورتی که $|E_A| < |E_B|$ باشد، در پایین است [۱].

همان‌طور که در شکل (۲-۷) دیده می‌شود، امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس در هنگام نوسان توان وارد نواحی عملکرد رله دیستانس خواهد شد و از آن جا که این نوسانات بسیار کند هستند، به اندازه کافی در آن ناحیه خواهد ماند و آن را تحریک خواهد کرد. پس لازم است که در هنگام وقوع نوسان توان و تشخیص آن از عملکرد رله دیستانس جلوگیری شود تا به اشتباه خط بدون خطا را از شبکه جدا نکند و وضعیت شبکه را بحرانی‌تر ننماید.

بر این اساس رله‌های دیستانس مجهز به واحدی با عنوان PSB^1 هستند. وظیفه این واحد تشخیص نوسان توان و محدود کردن نواحی یک، دو، و یا سه رله دیستانس در هنگام نوسان، برای جلوگیری از عملکرد اشتباه، است.

انتخاب ناحیه‌هایی از رله که باید در هنگام نوسان توان غیر فعال و محدود شوند، نیاز به مطالعات زیادی روی سیستم قدرت دارد و خود مبحثی مجزا و گسترده است.

¹ Power Swing Blocking



شکل (۲-۷): نحوه عبور امپدانس نوسانی از ناحیه های رله دیستانس با فرض ولتاژهای غیر یکسان [۱]

در فصل بعد روش‌های سنتی و مرسوم تشخیص نوسان توان معرفی می‌شود. همچنین تعداد دیگری از روش‌های تشخیص نوسان توان که در مراجع مختلف معرفی شده‌اند، معرفی و نحوه عملکرد آنها بررسی خواهد شد.

فصل سوم

روش های آشکارسازی نوسان توان

و بررسی عملکرد آنها

۳-۱- مقدمه

در بخش قبل با لزوم محدود شدن عملکرد رله دیستانس در هنگام بروز نوسان توان آشنا شدیم. در این بخش به بررسی چند روش آشکارسازی نوسان توان می‌پردازیم. اگر پدیده نوسان توان بموقع کنترل شود، می‌توان از فروپاشی احتمالی سیستم جلوگیری کرد. اما اگر دستگاه‌های کنترلی در این لحظه سیگنال را صحیح دریافت و یا ارسال نکنند، سیستم دچار فروپاشی خواهد شد. در چنین شرایطی حفاظت خاص نوسان توان برای مجزا سازی^۱ شبکه، آخرین حربه برای مقابله با این شرایط خاص است، تا پایداری شبکه حفظ شود. یکی از راه‌های مهم جلوگیری از عواقب نامناسب پدیده نوسان توان تنظیم مناسب و صحیح رله‌های حفاظتی است؛ این در حالیست که اساساً عواقب ناهنجار چنین پدیده‌ای هم از عملکرد نامناسب رله‌های حفاظتی ناشی می‌شود.

بر این اساس و نیز بر مبنای نحوه تغییرات کمیت‌های الکتریکی در این مواقع، معیارهایی برای آشکارسازی این پدیده پیشنهاد شده است. روش شناخت پدیده نوسان توان بر مبنای تحلیل شکل موج جریان اندازه‌گیری شده، همچنین روشی مبتنی بر بررسی تغییرات امپدانس دیده شده از دید رله، از جمله این روش‌ها هستند.

پارامترهای یک روش مناسب تشخیص نوسان توان سرعت، قابلیت اطمینان در تشخیص نوسان توان، عدم تشخیص اشتباه، و غیر فعال کردن PSB در هنگام بروز خطا در طول نوسان است. یکی از مشکلاتی که بهنگام بروز چنین پدیده‌ای رخ می‌دهد، عارض شدن خطا و یا اتصال کوتاه همزمان با آن است. در چنین حالتی مشکل اساسی بلوکه شدن رله‌ها به سبب رخداد نوسان توان درست قبل از بروز اتصال کوتاه در سیستم است، که باعث تداوم مشکل‌آفرین خطا در سیستم می‌گردد که این امر می‌تواند منجر به آسیب دیدن تجهیزات و حتی ناپایدار شدن شبکه شود.

^۱ Decoupling

۳-۲- تشخیص از طریق مؤلفه های متقارن جریان

استفاده از مؤلفه‌های متقارن جریان حین وقوع خطا در سیستم، بصورت گسترده‌ای در حفاظت پیشرفته دیستانس مورد استفاده قرار گرفته است. زمانی که پدیده نوسان توان رخ می‌دهد، کمیت‌های الکتریکی نیز به آرامی تغییر می‌کنند، زیرا زاویه δ نمی‌تواند سریعاً تغییر یابد. اما زمانی که خطای اتصال کوتاه رخ می‌دهد، نرخ تغییرات کمیت‌های الکتریکی زیاد خواهد بود. روش فوق می‌تواند پس از تحلیل شکل موج و تبدیل به کمیت خاصی که بر مبنای استفاده از مؤلفه‌های متقارن محاسبه شده‌اند، و مقایسه مقدار بدست آمده از مؤلفه‌های جریان فاز حین خطا با یک مقدار از پیش تعیین شده می‌تواند به نحو موثری در تشخیص پدیده نوسان توان به ما کمک کند. تنها زمانی که دوره زمانی پدیده نوسان توان کوتاه باشد، ممکن است دچار اشتباه شود [۹].

۳-۳- تشخیص پدیده نوسان توان از طریق روش برهم‌نهی جریان^۱

همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، در هنگام نوسان توان، جریان دارای تغییرات پیوسته‌ای می‌باشد. در این روش رله تفاضل نمونه‌های هر لحظه را از نمونه‌های متناظر دو سیکل قبل محاسبه می‌کند. از آنجائی که در حالت عادی شکل موج جریان‌ها سینوسی هستند، نمونه‌های مربوط به فاصله دو سیکل با هم برابر بوده و تفاضل آنها صفر می‌باشد. به این تفاضل، برهم‌نهی جریان گفته می‌شود. در هنگام خطا یا نوسان توان، به دلیل نامتقارن شدن جریانها این مقدار، دیگر برابر صفر نیست. در حالت خطا پس از گذشت یک پریود گذرا، شکل موج جریان خطا بصورت یک موج سینوسی خواهد بود. در نتیجه مقدار سنجیده شده، پس از سپری شدن پریود گذرا (دو سیکل) برابر صفر خواهد شد. در حالت نوسان توان، مقدار تفاضل جریان در کل دوره نوسان بصورت پیوسته وجود داشته و برابر صفر نخواهد شد. این حالت و چنین تغییراتی، توسط رله نوسان توان تشخیص داده می‌شود و در نتیجه سیگنال مربوطه صادر خواهد شد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد، که با استفاده از روش

¹ Superimposed

فوق، علی‌رغم اینکه می‌توان نوسان‌هایی با فرکانس تغییرات مختلف را مورد تحلیل قرار داد، اما در حالتی که حین وقوع نوسان توان خطایی در سیستم رخ دهد، تشخیص آن توسط این روش مشکل خواهد بود [۱۰].

۳-۴- روش محاسبه نرخ تغییرات امپدانس^۱

هنگامی که شبکه در حالت عادی کار خود قرار دارد، امپدانس دیده شده از محل رله امپدانس بار است که از ناحیه عملکردی رله بسیار دور است. با وقوع یک خطا این امپدانس سریعاً تغییر می‌کند و تبدیل به امپدانس خطا می‌شود. در نوسان توان نیز امپدانس در صفحه امپدانس شروع به تغییر می‌کند اما این تغییرات کند است و به فرکانس نوسان بستگی دارد. با توجه به تفاوت نرخ تغییرات امپدانس در حین نوسان توان و وقوع خطا، این شاخص می‌تواند برای تشخیص وقوع نوسان به کار گرفته شود. برای این منظور روش‌های متفاوتی وجود دارد که در صفحات بعد به بررسی تعدادی از این روش‌ها می‌پردازیم [۱۱].

۳-۴-۱- روش مشخصه‌های هم مرکز

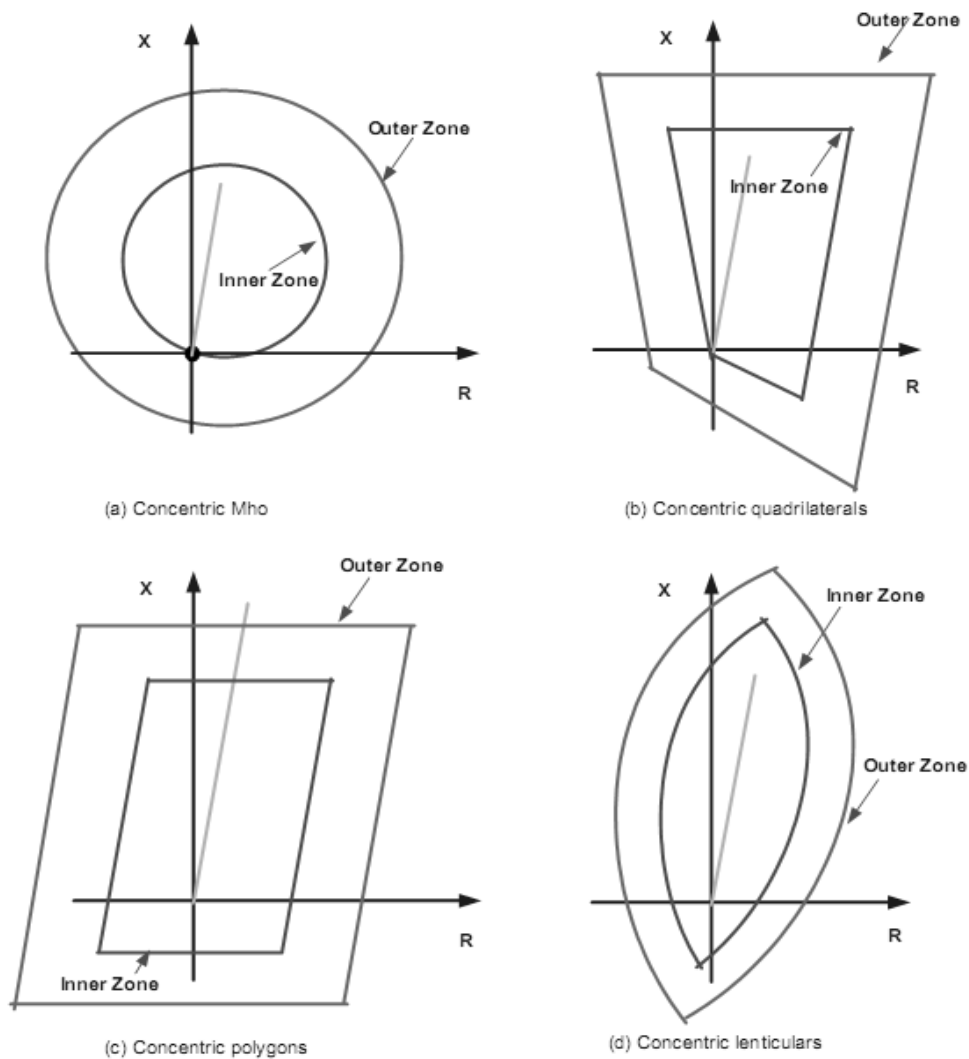
این روش ساده‌ترین و متداول‌ترین روش برای تشخیص نوسان توان است. در این روش به این صورت عمل می‌شود که برای تشخیص نوسان، دو ناحیه درونی و بیرونی در صفحه امپدانس تعریف می‌شوند. این دو ناحیه باید در برگرنده ناحیه‌هایی از رله دیستانس باشند که مسدود کردن آن‌ها در هنگام نوسان توان مطلوب است.

هنگامی که امپدانس نوسانی وارد ناحیه بین دو مشخصه در صفحه امپدانس شد، زمان سنجی شروع به شمارش می‌کند و تا وقتی امپدانس در این ناحیه قرار دارد به اندازه‌گیری زمان ادامه می‌دهد. اگر امپدانس بیش از زمان تنظیم شده در این ناحیه باقی بماند، نوسان توان گزارش می‌شود و به دنبال آن عملکرد رله دیستانس محدود خواهد شد [۱۱].

^۱ Rate of Changes of Impedance

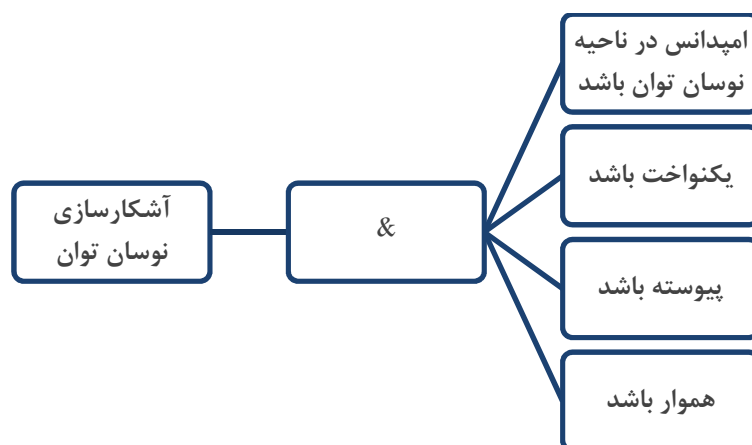
در شبکه برق ایران معمولاً ناحیه بزرگتر حدود ۱/۴ برابر ناحیه کوچکتر انتخاب می‌شود. برای این تنظیم مقدار زمان از پیش تعیین شده بین ۴۰ تا ۶۰ میلی ثانیه و زمان بلاک حدود یک تا دو ثانیه است [۲].

انواع اشکال ممکن برای این مشخصه‌های هم مرکز در شکل (۱-۳) قابل مشاهده هستند [۱]. مزیت این روش این است که شرط نوسان توان قبل از ورود امپدانس به داخل ناحیه‌های اصلی رله دیستانس چک می‌شود. البته این مزیت در صورتی حاصل می‌شود که ناحیه‌های تشخیص نوسان در برگیرنده ناحیه‌های رله دیستانس باشند [۲].



شکل (۱-۳): انواع مشخصه‌های هم مرکز تشخیص نوسان توان [۱]

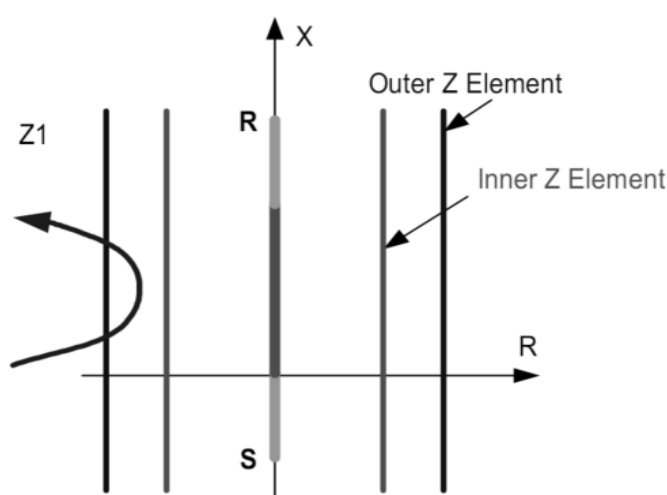
در مرجع [۱۱] نیز روشی مشابه روش فوق‌الذکر جهت تشخیص نوسان توان بیان شده است و منطقی مطابق شکل (۲-۳) برای تشخیص نوسان توان بر اساس نرخ تغییر امیدانس ارائه شده است.



شکل (۲-۳): لاجیک ارائه شده جهت تشخیص نوسان توان [۱۱]

۳-۴-۲- روش کورکننده ها^۱

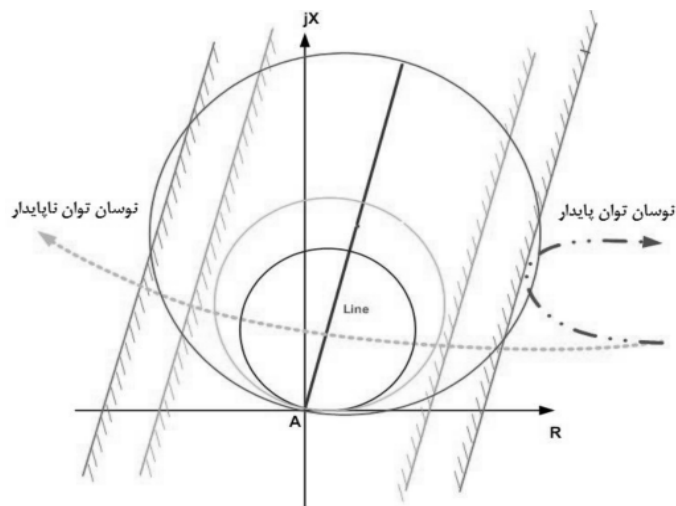
این روش نیز مانند روش قبل است، با این تفاوت که در آن به جای استفاده از مشخصه‌های هم مرکز از خطوط عمودی و یا زاویه‌دار به عنوان نواحی تشخیص نوسان توان استفاده می‌شود. نمونه-ای از این نوع مشخصه‌ها در شکل (۲-۳) قابل مشاهده است [۸].



شکل (۳-۳): مشخصه کورکننده برای تشخیص نوسان توان [۸]

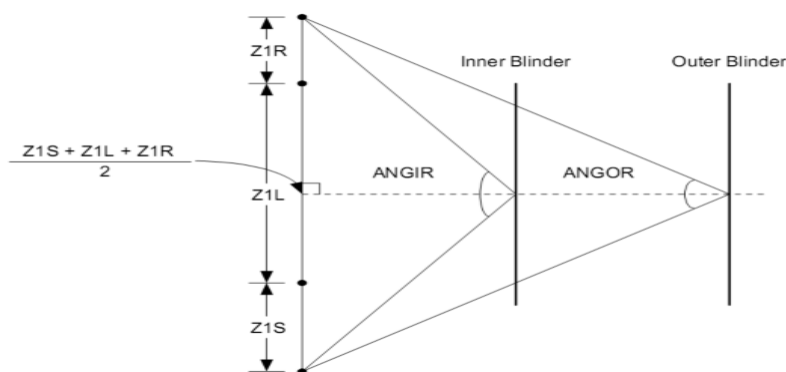
^۱ Blinders

البته بهتر است که کورکننده‌ها موازی امپدانس سیستم، یعنی امپدانس خط انتقال باشند. چون همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، مکان هندسی حرکت امپدانس نوسان توان معمولا به امپدانس خط عمود است. شکل مشخصه کورکننده‌ها برای حالت موازی با امپدانس خط در شکل (۳-۳) آمده است.



شکل (۳-۴): مشخصه کورکننده با خطوط موازی امپدانس خط [۱]

برای تنظیم مکان این کورکننده‌ها و زمان حساسیت طبق شکل (۳-۴) از این روش استفاده می‌کنیم: کورکننده داخلی به نحوی انتخاب می‌شود که دربرگیرنده خارجی‌ترین ناحیه رله دیستانس باشد که مسدود شدن آن در هنگام وقوع نوسان توان مطلوب است. کورکننده خارجی نیز طوری انتخاب می‌شود که وارد ناحیه حداکثر بار رله نشود. لازم به ذکر است که برای انتخاب این دو باید حاشیه مناسب در نظر گرفته شود [۸].



شکل (۳-۵): مشخصه کورکننده‌ها برای تنظیم پارامترهای آن [۸]

سپس حداکثر زمان برای تشخیص نوسان توان به صورت رابطه (۱-۳) به دست می آید که در

آن PSBD تنظیم زمانی PSB بر حسب تعداد سیکل است [۸].

$$PSBD = \frac{(ANGIR - ANGOR) \times Fnom}{360 \times SlipF} \quad (1-3)$$

در این رابطه ANGIR زاویه مقاومت کورکننده داخلی، ANGOR زاویه مقاومت کورکننده خارجی، Fnom فرکانس نامی شبکه، و SlipF فرکانس نوسان توان است. ANGIR و ANGOR از رابطه (۲-۳) قابل محاسبه هستند.

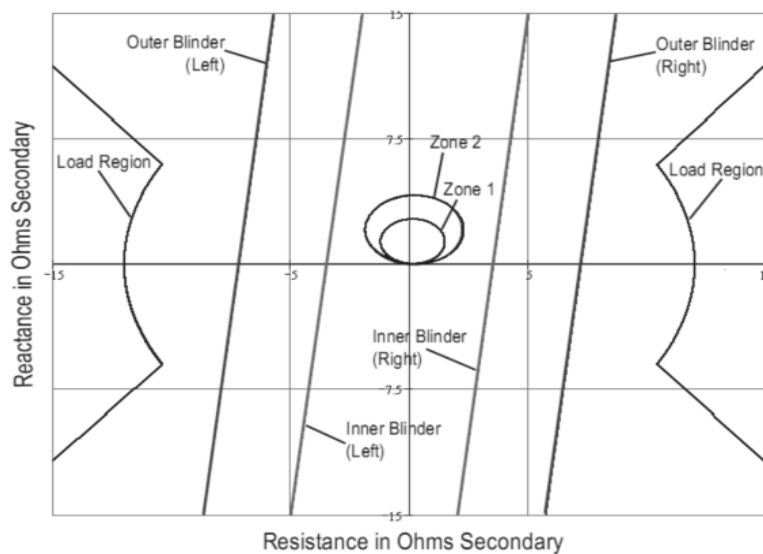
$$ANGIR = 2 \times \arctg\left(\frac{|Z_T|}{2 \times INBR}\right) \quad (2-3)$$

$$ANGOR = 2 \times \arctg\left(\frac{|Z_T|}{2 \times OTBR}\right)$$

در این رابطه Z_T کل امپدانس سیستم بین دو ژنراتور، INBR مقاومت کورکننده داخلی به اهم، و OTBR مقاومت کورکننده خارجی به اهم است.

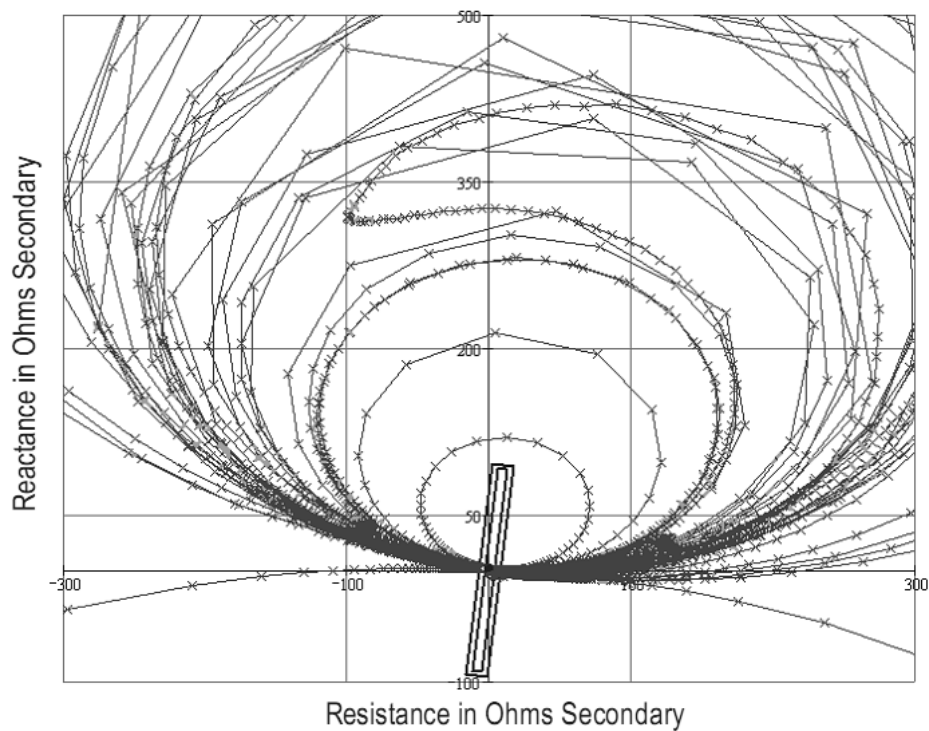
نمونه‌ای از نواحی تنظیم شده برای این روش تشخیص نوسان توان را می‌توانید در شکل (۳-۳)-

(۵) مشاهده کنید [۸].

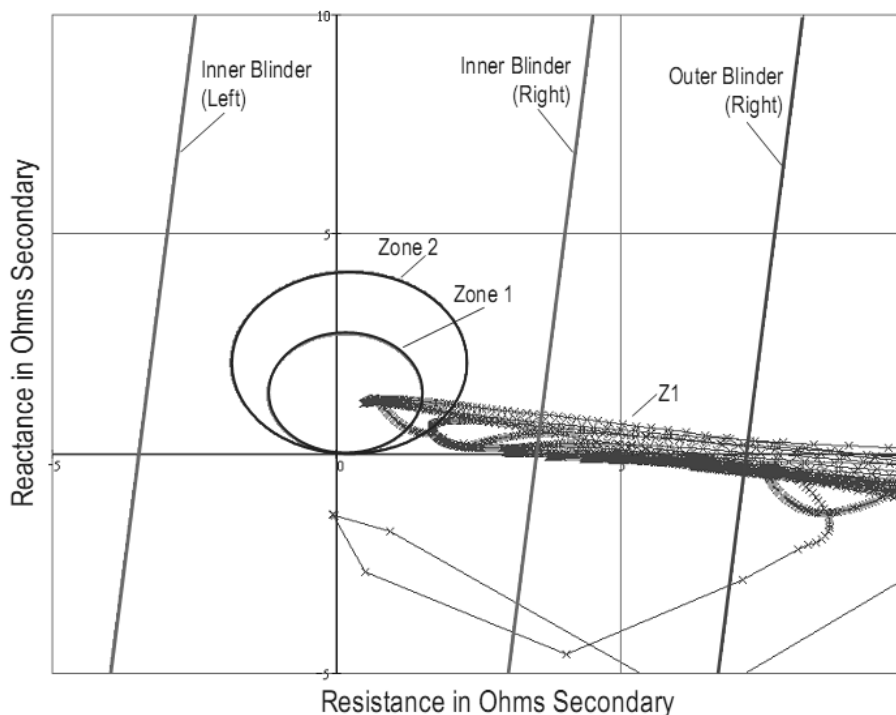


شکل (۳-۶): نمونه ای از نواحی تنظیم شده برای روش کورکننده ها [۸]

شکل شماره (۳-۶) نحوه حرکت امپدانس را در حالت نوسانی برای یک شبکه مثال نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۳-۷) که بزرگ شده شکل (۳-۶) است دیده می‌شود، امپدانس نوسان وارد ناحیه های رله دیستانس شده است و در صورتی که واحد مسدود کننده رله دیستانس عمل نمی‌کرد، این نوسان منجر به عملکرد اشتباه رله دیستانس می‌شد [۸].



شکل (۳-۷): صفحه امپدانس برای یک نوسان توان [۸]

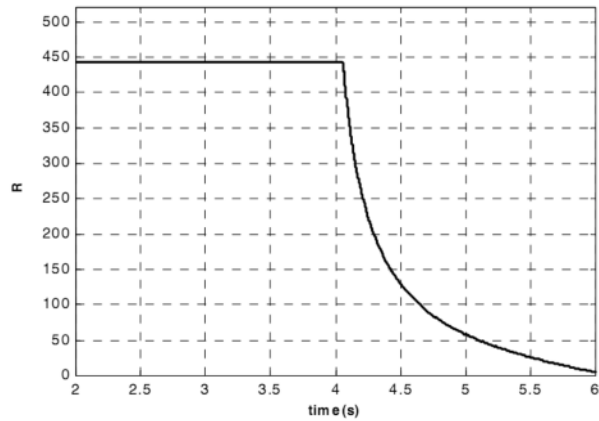


شکل (۳-۸): صفحه امپدانس برای یک نوسان توان (بزرگنمایی اطراف زون رله دیستانس) [۸]

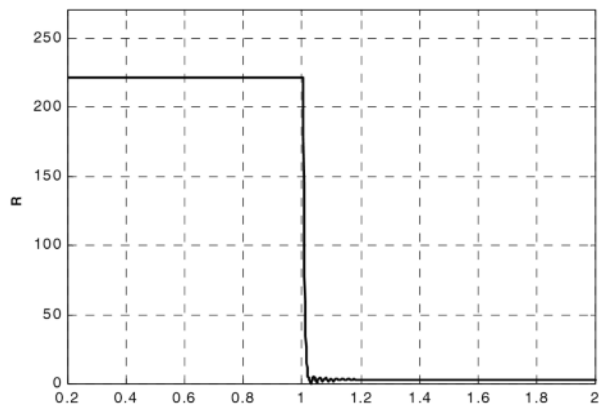
۳-۵- طرح اندازه گیری نرخ تغییر مقاومت

هنگامی که نوسان توان اتفاق می‌افتد، بخش مقاومتی امپدانس دیده شده به صورت کند و پیوسته کاهش می‌یابد. اما در صورت وقوع خطا تغییر امپدانس سریع و تنها در لحظه وقوع خطا خواهد بود. از این واقعیت برای تشخیص نوسان توان استفاده می‌شود [۱۰].

نحوه کاهش مقاومت دیده شده برای یک نوسان با فرکانس ۰/۱ هرتز که در زمان $t=4s$ اتفاق افتاده است در شکل (۳-۸)، و برای یک خطا که در زمان $t=1s$ اتفاق افتاده در شکل (۳-۹) آمده است.



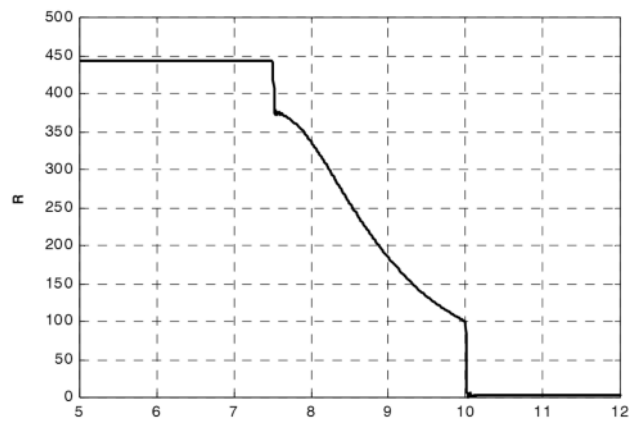
شکل (۳-۹): نحوه کاهش مقاومت در نوسان با فرکانس ۰.۱ هرتز [۱۰]



شکل (۳-۱۰): نحوه کاهش مقاومت در صورت وقوع خطا [۱۰]

شکل (۳-۱۰) نیز حالتی را نشان می‌دهد که در حین نوسان توان، یک خطا اتفاق افتاده است.

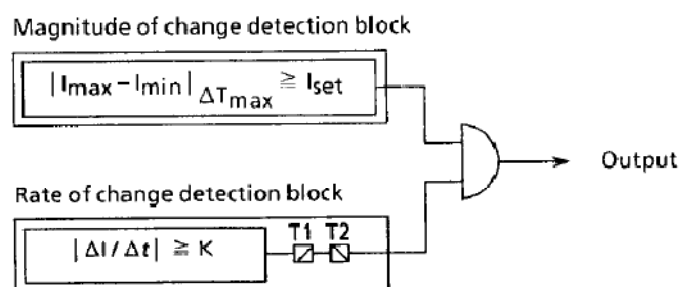
همان‌طور که مشاهده می‌شود با وقوع خطا تغییر امپدانس از حالت کند و پیوسته به پله ای تغییر می‌کند [۱۰].



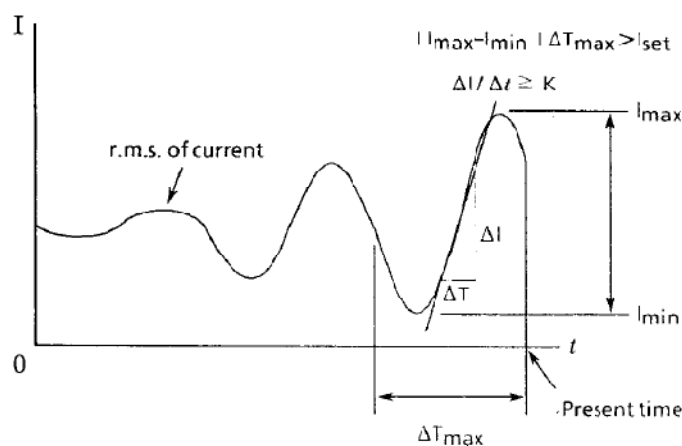
شکل (۳-۱۱): نحوه کاهش مقاومت در صورت وقوع خطا در زمان نوسان توان [۱۰]

۳-۶- تشخیص نوسان توان با استفاده از تغییرات جریان

در این روش که در مرجع [۱۲] ارائه شده در ساخت رله شرکت توشیبا به کار رفته است و در شبکه برق ژاپن به کار گرفته شده است. در این روش برای تشخیص نوسان توان از جریان خط انتقال استفاده گردیده است. لازم به ذکر است که این الگوریتم در کنار یک الگوریتم تشخیص پایداری یا عدم پایداری نوسان توان به کار گرفته شده و از این واحد برای تشخیص آغاز نوسان و شروع به کار واحد تشخیص پایداری یا عدم پایداری استفاده می‌شود. منطق مورد استفاده در این واحد تشخیص نوسان توان در شکل (۳-۱۱) ارائه شده است. واحد تشخیص نوسان توان شامل یک بلوک تشخیص نرخ تغییر برای تعیین وجود نوسان و یک بلوک تشخیص تغییر اندازه برای تشخیص اندازه نوسان جریان می‌باشد. خروجی‌های این دو بلوک با یکدیگر AND شده اند و سیگنال خروجی واحد تشخیص نوسان را تشکیل می‌دهند.



شکل (۳-۱۲): المان تشخیص نوسان جریانی [۱۲]



شکل (۳-۱۳): اصول تشخیص نوسان جریانی [۱۲]

نحوه عملکرد این واحد تشخیص نوسان توسط شکل (۳-۱۲) تشریح می شود. در شکل‌های (۳-۱۱) و (۳-۱۲) مقدار I_{SET} حساسیت تشخیص اندازه نوسان می‌باشد، ΔT_{MAX} زمان از پیش تنظیم شده‌ای است که باید از حداکثر دوره تناوب نوسانات شبکه بیشتر باشد. مقادیر I_{MAX} و I_{MIN} حداکثر و حداقل مقادیر موثر جریان در بازه زمانی ΔT_{MAX} می‌باشد. پارامتر ΔI در $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ اختلاف مقدار جریان‌های موثر در بازه زمانی کوتاه ΔT می‌باشد. مقادیر T_1 و T_2 تاخیر زمانی برای عملکرد و بازنشانی^۱ واحد هستند. بلوک تشخیص نرخ تغییر اندازه، هنگامی که اندازه نوسان جریان در طی دوره زمانی نوسان ΔT_{MAX} بیشتر از تنظیم حساسیت I_{SET} شود عمل می‌کند و خروجی آن یک می‌شود. مقادیر تنظیمی برای ΔT_{MAX} و I_{SET} با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری شبکه به دست می‌آیند. مقدار I_{SET} برای $\Delta T_{MAX} = 3\text{sec}$ تنظیم می‌شود. عنصر دیگر هنگامی که شیب $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ از مقدار ثابت K بیشتر شود و این شرایط برای زمان T_1 ادامه داشته باشد عمل می‌کند. لذا همان تشخیص نوسان هنگامی که هر دو عنصر عمل نمایند و خروجی آنها یک باشد، یعنی زمانی که شیب $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ از مقدار ثابت K بیشتر شود و جریان نوسان در طی زمان یک موج سینوسی که از ΔT_{MAX} کمتر است، از I_{SET} بیشتر شود، عمل خواهد کرد. برای جلوگیری از در نظر گرفتن نوسانات خیلی طولانی مدت، مقدار زمان T_2 برای بازنشانی این عنصر استفاده شده است [۱۲].

۳-۷- طرح ولتاژ مرکز نوسان

ولتاژ مرکز نوسان (SCV)^۲، به صورت ولتاژ در نقطه‌ای از یک سیستم دو ماشین معادل که ولتاژ در آن نقطه، در صورتی که اختلاف زاویه بین دو ناحیه ۱۸۰ درجه شود، صفر می‌شود، تعریف می‌شود. وقتی که یک سیستم دو ماشین پایدار خود را از دست می‌دهد و به شرایط خروج از همگامی می‌رسد، اختلاف زاویه بین دو منبع به صورت تابعی از زمان تغییر می‌کند. شکل (۳-۱۳)

^۱ Reset

^۲ Swing Center Voltage

دیاگرام فازوری یک سیستم دو ماشینیه را نشان می‌دهد که در آن SCV به صورت یک فازور از مبدا به نقطه O' نشان داده شده است [۱].

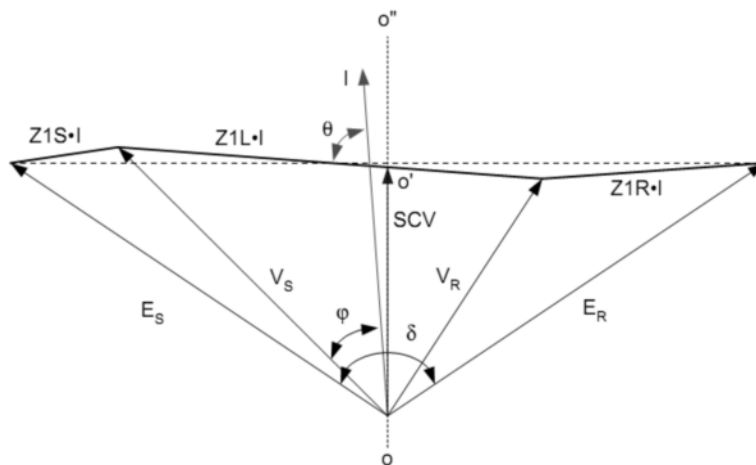
مقدار SCV به صورت لحظه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$SCV(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \frac{\delta(t)}{2}) \cdot \cos(\frac{\delta(t)}{2}) \quad (3-3)$$

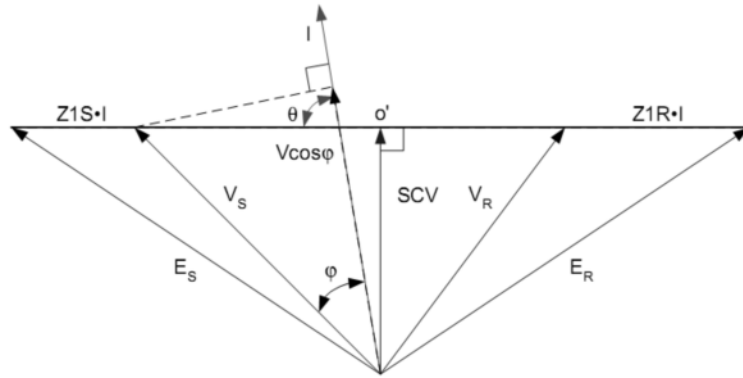
در صورتی که این مقدار در دسترس نباشد و با توجه به این که زاویه امپدانس در سیستم های قدرت نزدیک ۹۰ درجه است، می‌توان SCV را به طور تخمینی از مقادیر محلی به صورت زیر به دست آورد:

$$SCV \approx |V_s| \cos\varphi \quad (4-3)$$

که در آن $|V_s|$ اندازه ولتاژ محلی اندازه‌گیری شده و φ اختلاف زاویه بین V_s و جریان عبوری را، به صورتی که در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده است، نشان می‌دهد. در شکل (۳-۱۴) می‌توان دید که $V \cos\varphi$ تصویر V_s بر روی محور جریان می‌باشد.



شکل (۳-۱۴): دیاگرام فازوری ولتاژ برای یک سیستم دو ماشینیه [۱]



شکل(۳-۱۵): شکل $V \cos \phi$ تصویر V_S بر روی محور جریان [۱]

نکته دیگر این است که در این روش برای تشخیص نوسان توان از نرخ تغییرات اندازه ولتاژ مرکز نوسان استفاده می شود و نه اندازه ولتاژ مرکز نوسان. به این دلیل تفاوت کوچکی بین اندازه ولتاژ واقعی مرکز نوسان و مقدار تقریبی آن به دست آمده از پارامترهای محلی تاثیر گذار نمی باشد. با توجه به آن چه گفته شد می توان رابطه بین ولتاژ تقریبی مرکز نوسان و زاویه بین ولتاژ دو ماشین (δ) را به صورت زیر بیان کرد:

$$SCV_1 = E_1 \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (۳-۵):$$

در رابطه بالا E_1 اندازه مؤلفه مثبت E_S می باشد که فرض شده است با E_R نیز برابر است. اندازه SCV_1 هنگامی که زاویه بین دو منبع صفر می باشد، حداکثر بوده و وقتی که اختلاف زاویه بین دو منبع ۱۸۰ درجه است، این مقدار حداقل (صفر) می باشد. از این خاصیت و با ملاحظه نرخ تغییر ولتاژ مرکز نوسان می توان برای تشخیص نوسان توان استفاده کرد. مشتق زمانی SCV_1 به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d(SCV_1)}{dt} = -\frac{E_1}{2} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \frac{d\delta}{dt} \quad (۳-۶):$$

در رابطه بالا $d\delta/dt$ بیانگر فرکانس لغزش ماشین ها نسبت به یکدیگر است. همان طور که دیده می شود رابطه بالا مستقل از امپدانس سیستم است. مشتق ولتاژ مرکز الکتریکی نوسان زمانی حداکثر مقدار را به خود می گیرد که زاویه بین دو منبع به ۱۸۰ درجه برسد.

برای این روش می توان مزایای زیر را برشمرد:

- مرکز الکتریکی نوسان مستقل از امپدانس سیستم است.
- مقدار SCV مستقل از مقدار امپدانس سیستم، بین مقادیر ۰ و ۱ پریونیت است. این مزیت را دیگر پارامترهای سیستم مانند امپدانس، ولتاژ، جریان، توان اکتیو و راکتیو ندارند و مقادیر حداکثر و حداقل آن ها به تعدادی از پارامترهای شبکه وابسته است.
- اندازه ولتاژ مرکز نوسان مستقیماً با زاویه بین ولتاژ در دو سمت خط انتقال متناسب است و با داشتن SVC می توان زاویه δ را محاسبه کرد و برای مثال اگر اندازه SVC نصف مقدار نامی آن باشد، با فرض همگن بودن امپدانس سیستم و یکسان بودن اندازه ولتاژ دو منبع، به این معنی است که زاویه بین منابع ۱۲۰ درجه شده است [۱].

۳-۸- جمع بندی روش های تشخیص نوسان توان

در این بخش از گزارش تعدادی از روش های تشخیص نوسان توان را مشاهده کردیم و با منطق عملکرد و بعضاً توانایی ها و ضعف های آن ها آشنا شدیم.

مشاهده کردیم که این روش ها عمدتاً بر پایه نرخ تغییر یک پارامتر بنا نهاده شده اند. این پارامترها می توانند امپدانس، مقاومت، توان، مرکز نوسان و ... باشند [۱].

در این روش ها برای تشخیص نوسان توان نیاز به تنظیم پارامترهایی داریم که نیاز به محاسبه دارند و محاسبه آن ها کار مشکلی است. خصوصاً اگر تابع پارامترهای شبکه مانند امپدانس منبع یا خط باشند، نیاز به مطالعات زیادی برای به دست آوردن تنظیم مناسب دارند. هرچه پارامتری که برای تشخیص نوسان توان استفاده می شود بستگی کمتری به پارامترهای شبکه داشته باشد، تنظیم آن ساده تر خواهد بود [۱].

اگر شکل شماره (۳-۱۳) را در نظر بگیریم و فرض کنیم ولتاژ دو منبع با هم برابر و مساوی E_1

است و X_T کل امپدانس بین منابع است، می توانیم نحوه تغییرات پارامترهای مختلف الکتریکی شبکه را در حین نوسان توان بررسی کنیم [۱].

$$P = E_1 I \cos \varphi = \frac{E_1^2}{X_T} \sin \delta \quad (7-3)$$

$$I = 2 \frac{E_1}{X_T} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (8-3)$$

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{X_T}{2} \cot\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (9-3)$$

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{X_T}{2} \left(\frac{1}{1-\cos \delta}\right) \frac{d\delta}{dt} \quad (10-3)$$

$$V \cos \varphi = \frac{P}{I} = E_1 \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (11-3)$$

همان طور که دیده می شود اکثر این پارامترها به امپدانس شبکه، که پارامتری متغیر با زمان است، بستگی دارند لذا به دست آوردن تنظیمات مناسب برای رله جهت تشخیص نوسان توان با استفاده از روش های گفته شده در این فصل کاری دشوار است و نیاز به مطالعات زیادی دارد. [۱].

در فصل بعد تئوری تبدیل موجک شرح داده خواهد شد و تعدادی از توابع موجک مادر^۱ معروف معرفی خواهند شد و در انتها کاربردهایی از تبدیل موجک در سیستم های قدرت تشریح می گردد.

¹ Mother Wavelet

فصل چهارم

تبدیل موجک

و کاربرد آن در سیستم های قدرت

۴-۱- مقدمه

همه جا در اطراف ما سیگنالهایی وجود دارند که باید تحلیل شوند. لرزشهای زلزله، صحبت انسانها، نوسان موتورها، تصاویر پزشکی، داده‌های مالی، موزیک و بسیاری از انواع دیگر از سیگنالهایی هستند که باید به شکل مناسبی کدگذاری شوند، فشرده شوند، نویزهایشان تصفیه شوند، بازسازی شوند، بیان شوند، ساده شوند، متمایز شوند و یا محل یابی شوند. تحلیل موجک^۱ یک ابزار جدید و تکنیک مناسب برای این کارها می‌باشد.

۴-۲- پردازش سیگنال

تحلیل و پردازش سیگنال هم اکنون به طور چشم‌گیری در علوم مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و شاید یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های تحلیل سیگنال تبدیل فوریه باشد. تبدیل فوریه یک سیگنال را به شکل موج‌های سینوسی تشکیل‌دهنده‌اش در فرکانس‌های مختلف تجزیه می‌کند. نوعی دیگر نگرش به تبدیل فوریه این است که تبدیل فوریه را یک تکنیک ریاضی برای انتقال دید یا نگاه به سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس در نظر گرفت [۱۳].



شکل (۴-۱): نمایش تبدیل فوریه [۱۳]

برای بسیاری از سیگنال‌ها، تحلیل فوریه بی‌نهایت مؤثر است بدلیل اینکه محتوی فرکانسی این سیگنال‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. پس چرا گاهی نیاز است که از تکنیک‌های دیگری مانند تبدیل موجک استفاده کرد؟

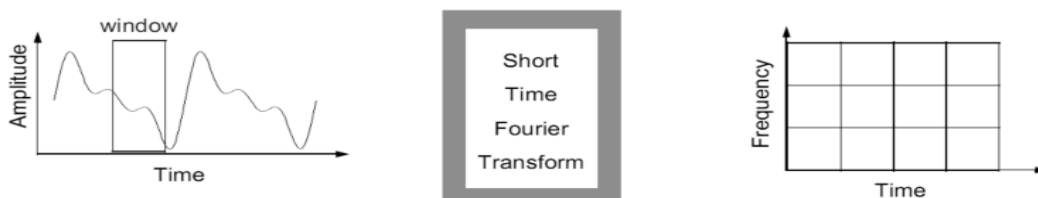
^۱ Wavelet analysis

تحلیل فوریه دارای یک کاستی جدی می‌باشد. در انتقال یک سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس، اطلاعات حوزه زمان سیگنال از دست می‌رود. هنگام نگاه کردن به تبدیل فوریه یک سیگنال غیرممکن است که بتوان گفت درچه زمانی حوادث در سیگنال اتفاق افتاده است. این مسئله در یک سیگنال ایستا^۱ مهم نیست (سیگنال ایستا به سیگنالی گفته می‌شود که خواص آماری آن در طی زمان تغییر نکند)، اما بسیاری از سیگنال‌های مهم و موردتوجه شامل تعداد نامتناهی از سیگنال‌های غیرایستا یا گذرا می‌باشد مانند پیشامدها، تغییرات ناگهانی، ابتدا و انتهای زمان رخ دادن حوادث و این مشخصه‌ها اغلب مهمترین قسمت سیگنال می‌باشند. اما متأسفانه تحلیل فوریه برای تشخیص آنها مناسب نیست [۱۳].

۳-۴- تحلیل فوریه زمان-کوتاه (STFT)

به منظور پیشنهادی برای جبران کمبود ذکر شده در تبدیل فوریه، دنیس گابور^۳ (۱۹۴۶) تبدیل فوریه را برای یک مقطع زمانی کوچک برای سیگنال انجام داد. این تکنیک را پنجره‌بندی^۴ سیگنال گویند. تعمیم گابور، تبدیل فوریه زمان-کوتاه (STFT) نامیده شد. STFT سیگنال را به یک تابع دوبعدی از زمان و فرکانس می‌نگارد.

STFT یک مقایسه مرتب از نمای زمان-فرکانس سیگنال را نمایش می‌دهد و اطلاعاتی در مورد هر دو آنها ارائه می‌دهد. اطلاعات بدست آمده از سیگنال به این روش دارای دقت محدودی می‌باشد و اندازه پنجره انتخاب شده در STFT تعیین‌کننده دقت آن می‌باشد.



شکل (۳-۴): نمایش تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) [۱۳]

¹ Stationary signal

² Short Term Fourier Transform

³ Dennis Gabor

⁴ Windowing

کاستی STFT در این است که هنگامی که یک پنجره زمانی انتخاب شد، در تمام فرکانس‌ها ثابت می‌ماند. در صورتیکه بسیاری از سیگنال‌ها نیاز به تقریب‌های قابل انعطاف‌تری دارند. گاهی تغییر سایز پنجره زمانی بسیار کوچک برای بدست آوردن تخصیص زمان-فرکانس دقیق‌تر لازم می‌باشد که در روش STFT این امر غیرممکن می‌باشد [۱۳].

۴-۴- تحلیل موجک

تحلیل موجک قادر به نمایش سیگنال به وسیله یک تکنیک پنجره‌بندی نواحی با سایزهای مختلف می‌باشد. تحلیل موجک امکان استفاده از پنجره‌های زمانی بزرگ را در هنگام نیاز به اطلاعات دقیق در فرکانس‌های پایین و پنجره‌های زمانی کوچکتر هنگامی که نیاز به اطلاعات فرکانس بالاست را مقدور می‌سازد.



شکل (۴-۳): نمایش تبدیل موجک [۱۳]

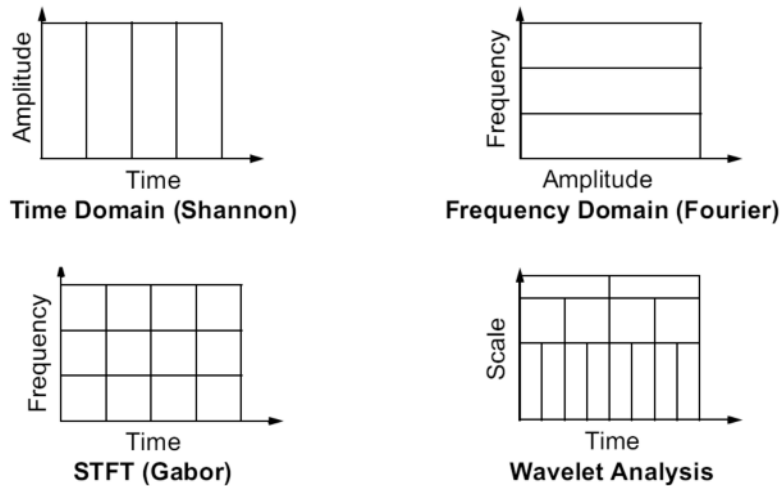
از دیدگاه بانک فیلتر، این تصور بدان معناست که با افزایش فرکانس میانی فیلترها، دقت زمانی نیز افزایش می‌یابد. چرا که مدت وقوع و یا پریود پدیده‌های فرکانس بالاتر، کمتر است. شکل (۴-۴) اختلاف تبدیل موجک را با روشهایی برپایه زمان، بر پایه فرکانس و STFT نشان می‌دهد [۱۳].

باید توجه داشت که تحلیل موجک از نواحی زمان - فرکانس استفاده نمی‌کند. بلکه از نواحی زمان-مقیاس^۱ استفاده می‌کند. در مورد مفهوم مقیاس در بخش‌های بعدی صحبت می‌شود.

یکی از پیشرفت‌های اصلی که توسط موجک‌ها صورت می‌گیرد قابلیت تحلیل محلی^۲ سیگنال می‌باشد که برای تحلیل یک ناحیه کوچک از سیگنال وسیعی صورت می‌گیرد [۱۳].

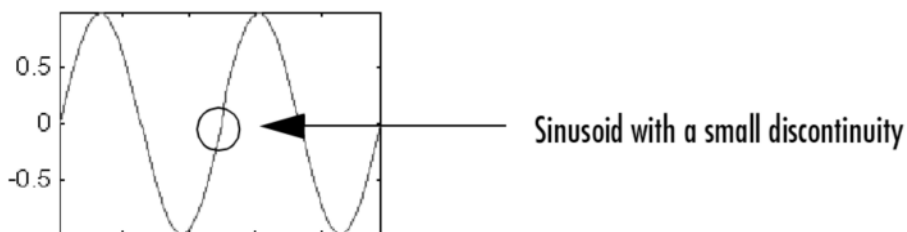
^۱ Scale

^۲ Local Analysis



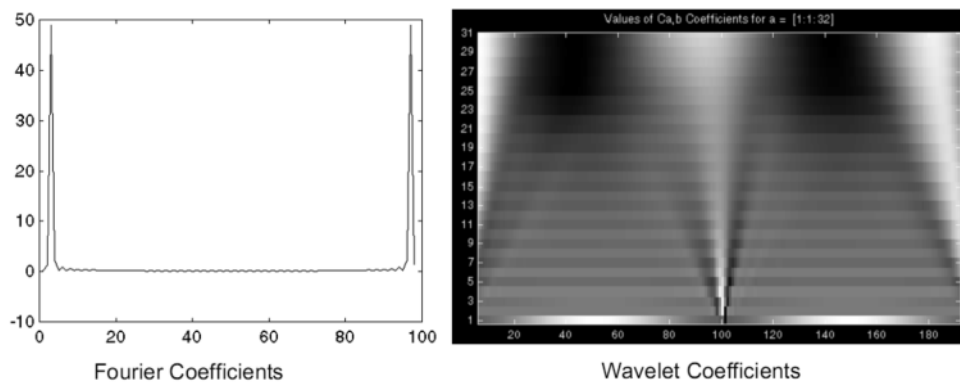
شکل (۴-۴): اختلاف تبدیل موجک با تبدیل‌های فوریه، شانون و گابور [۱۳]

یک سیگنال سینوسی با یک اعوجاج کوچک بسیار ریز که با چشم قابل تشخیص نباشد را در نظر بگیرید. این سیگنالها به سادگی در دنیای واقعی قابل تولید می‌باشند شکل (۴-۵). با رسم ضرایب فوریه این سیگنال در شکل (۴-۶) یک طیف فرکانسی یکنواخت با دو پیک نشان داده شده است. این شکل هیچ اتفاقی را در مورد نقطه اغتشاش نشان نمی‌دهد. رسم ضرایب موجک بطور واضح نشان می‌دهد که محل دقیق نقطه انفصال بر حسب زمان در چه نقطه‌ای بوده است شکل (۴-۶).



شکل (۴-۵): یک سیگنال سینوسی با اعوجاج کوچک [۱۳]

تحلیل موجک قابلیت آشکارسازی مفاهیم مختلف داده‌ها را دارد که تکنیک‌های دیگر تحلیل سیگنال آنها را از دست می‌دهند. مفاهیمی از قبیل تمایل، نقاط شکست، نشانه، نقاط انفصال و منشاء آنها و ... را می‌توان با تحلیل موجک آشکارسازی نمود و این موضوع بدلیل نگاه متفاوت این روش به داده‌ها نسبت به روشهای قبلی می‌باشد. تحلیل موجک همچنین قادر به فشرده سازی و نویززدایی سیگنال بدون اینکه افت محسوسی در کیفیت سیگنال ایجاد کند می‌باشد.



شکل (۴-۶): اختلاف تبدیل فوریه و تبدیل موجک در نشان دادن اغتشاش شکل [۱۳]

یک موجک یک شکل موج با مدت زمانی محدود می‌باشد که دارای مقدار مؤثر صفر است. در مقایسه موجک‌ها با موج‌های سینوسی که اساس کار تحلیل فوریه است مشاهده می‌شود که سینوس‌ها دارای مدت زمانی محدود نمی‌باشند و از منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت گسترده شده‌اند و سینوس‌ها همواره قابل پیش‌بینی هستند درحالی‌که موجک‌ها بی‌قاعده و نامتقارن هستند. در ضمن انرژی شکل موج سینوسی نامحدود است ولی موجک انرژی متمرکز و محدود و حول یک نقطه دارند که این موضوع در شکل (۴-۷) نشان داده شده است.



شکل (۴-۷): اختلاف موجک‌ها و موج سینوسی [۱۳]

تحلیل فوریه شامل تجزیه سیگنال به امواج سینوسی در فرکانس‌های مختلف می‌باشد. مشابه با آن تحلیل موجک، شامل شکستن یک سیگنال به سیگنال‌های انتقال داده شده و تغییر مقیاس داده شده سیگنال موجک اصلی^۱ (موجک مادر) است. با نگاه به شکل (۴-۷) مشاهده می‌شود که سیگنال‌هایی با تغییرات نیز با موجک‌ها بهتر تحلیل می‌شوند تا با یک موج سینوسی هموار و لذا می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات محلی نیز با موجک‌ها بهتر تحلیل می‌شود.

^۱ Original Wavelet

تا بحال بحث روی داده‌های تک‌بعدی بود اکثر سیگنال‌های معمولی نیز از این نوع می‌باشند. اما تحلیل موجک را بر روی داده‌های دو بعدی مانند تصاویر نیز می‌توان بکار برد بطور کلی تحلیل موجک روی داده‌هایی با ابعاد بزرگتر هم بکار می‌رود. جعبه ابزار موجک‌ها در MATLAB تنها قابلیت روشهای تحلیل تک‌بعدی و دوبعدی را دارد.

یک سیگنال با تابع $f(t)$ را می‌توان بصورت یک ترکیب خطی مانند معادله (۱-۴) بیان می‌گردد.

$$f(t) = \sum_l a_l \psi_l(t) \quad (1-4)$$

l یک عدد صحیح در یک مجموعه نامحدود و یا محدود می‌باشد. a_l حقیقی و ψ_l مجموعه‌ای از توابع حقیقی از زمان است که مجموعه بسط^۱ خوانده می‌شود. اگر بسط (۱-۴) یکتا باشد مجموعه $\{\psi_l\}$ برای کلاسی از توابع که با آنها بیان می‌شود پایه خوانده می‌شود. اگر پایه‌ها متعامد^۲ باشند در این صورت:

$$\langle \psi_k(t), \psi_l(t) \rangle = \int \psi_k(t) \cdot \psi_l(t) dt = 0 \quad k \neq l \quad (2-4)$$

ضرایب با ضرب داخلی به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$a_k = \langle f(t), \psi_k(t) \rangle = \int f(t) \cdot \psi_k(t) dt \quad (3-4)$$

جایگذاری (۳-۴) در (۱-۴) و استفاده از (۲-۴) به یک ضریب a_k منجر می‌شود. اگر مجموعه پایه‌ها متعامد نباشند آنگاه یک مجموعه توابع پایه دوگان $\{\widehat{\psi}_l(t)\}$ وجود دارد که با کمک رابطه (۴-۳) همراه با پایه‌های دوگان ضرایب مطلوب بدست می‌آیند.

برای یک سری فوریه، توابع پایه متعامد $\Psi_k(t)$ (به صورت $\sin(k\omega_0 t)$ و $\cos(k\omega_0 t)$) با فرکانس‌های $k\omega_0$ هستند. بسط موجک با دو پارامتر برای یک سیستم بصورت زیر است:

$$f(t) = \sum_k \sum_j a_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (4-4)$$

¹ Expansion set
² Orthogonal

k و j اندیس‌های صحیح هستند و $\Psi_{j,k}(t)$ توابع بسط موجک بوده که اغلب تشکیل پایه‌های متعامد را می‌دهند. $a_{j,k}$ مجموعه ضرایب تبدیل موجک گسسته (DWT)^۱ تابع $f(t)$ نامیده می‌شود [۱۴].

۴-۵- تبدیل موجک گسسته

محاسبه ضرایب در همه مقیاس‌های ممکن، کاری بیهوده می‌باشد و تعداد زیادی داده بی‌فایده تولید می‌کند. باید به خاطر داشت که اگر مقیاس‌ها و مکان‌ها براساس توان‌های دو (همان مقیاس‌ها و مکان‌های دایادیک^۲) انتخاب شوند، تحلیل انجام شده مؤثرتر و دقیق‌تر خواهد بود، این عمل بخصوص در تحلیل موجک گسسته (DWT) صورت می‌گیرد. یک راه مؤثر برای بکاربردن این طرح استفاده از فیلترهایی می‌باشد که در سال ۱۹۸۸ توسط مالات^۳ توسعه یافت. این الگوریتم فیلتر کردن عملاً یک تبدیل موجک سریع می‌باشد. یک جعبه که هنگامی که سیگنالی از آن می‌گذرد، ضرایب موجک آن بدست می‌آید.

برای بسیاری از سیگنال‌ها محتوای فرکانس پایین سیگنال، مهم‌ترین قسمت آن است و قسمتی است که مشخصه اصلی سیگنال را به خوبی نشان می‌دهد و محتوای فرکانس بالای آن از اهمیت ناچیزی برخوردار است. صدای انسان مثالی خوب برای این سیگنال است. اگر مؤلفه‌های فرکانس بالای آن استخراج شود صدا مختلف می‌شود اما هنوز مفهوم خواهد بود و جمله گفته شده را می‌توان فهمید. اما اگر چنانچه مقداری کافی از مؤلفه‌های فرکانس پایین از آن خارج گردد دیگر صدا مفهوم نخواهد بود. به همین دلیل است که در موجک‌ها از مقادیر تقریبی^۴ و مقادیر جزئی^۵ صحبت به میان می‌آید [۱۳]. مقادیر تقریبی مؤلفه‌های مقیاس بالا و فرکانس پایین سیگنال می‌باشند در حالیکه مقادیر جزئی مؤلفه‌های مقیاس پایین و فرکانس بالای سیگنال هستند. مراحل فیلتر کردن مانند شکل (۴-۸) می‌باشد.

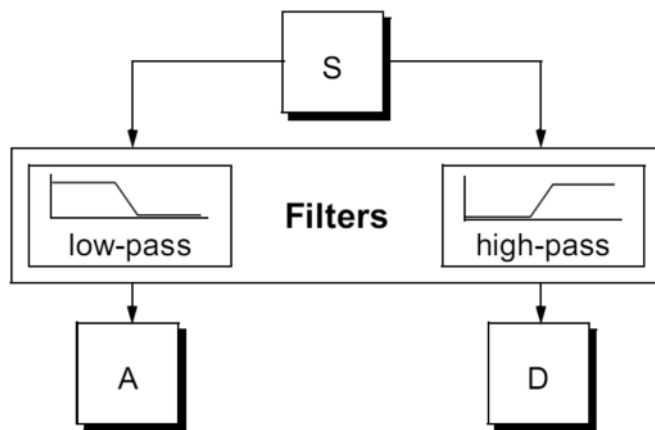
^۱ Discrete Wavelet Transform

^۲ Dyadic

^۳ Mallat

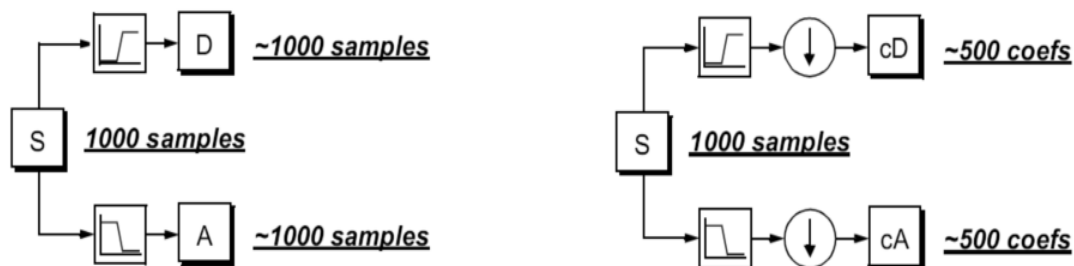
^۴ Approximations

^۵ Details



شکل (۴-۸): مفهوم فیلتر شدن سیگنال توسط موجک‌ها [۱۳]

سیگنال اصلی S از دو فیلتر مکمل می‌گذرد و دو سیگنال از فیلترها خارج می‌شود. متأسفانه اگر این مراحل بر روی یک سیگنال حقیقی دیجیتال انجام شود با دوبرابر تعداد داده‌ای که با آن آغاز کردیم مواجه خواهیم شد. فرض کنید سیگنال اصلی S شامل ۱۰۰۰ نمونه داده باشد. آنگاه مقادیر تقریبی و جزئی هر کدام شامل ۱۰۰۰ نمونه خواهد بود و مقدار کلی نمونه‌ها ۲۰۰۰ عدد خواهد شد. برای تصحیح این مسئله مفهوم نمونه‌برداری با نرخ پایین^۱ معرفی می‌شود شکل (۴-۹) این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۹): تبدیل موجک با نرخ نمونه‌برداری پایین [۱۳]

مراحل نشان داده شده در سمت راست شکل (۴-۹) که شامل نمونه‌برداری با نرخ پایین است ضرایب DWT را تولید می‌کند. با این کار تعداد نمونه‌ها بعد از استخراج ضرایب با تعداد نمونه‌های سیگنال اصلی مساوی خواهند بود.

^۱ Down sampling

هدف از تبدیل موجک گسسته ایجاد یک مجموعه توابع بسط است که هر سیگنال در $L^2(\mathbb{R})$ (فضای توابعی که به صورت مربعی انتگرال پذیر هستند) را بتوان با سری زمانی زیرنمایش داد.

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (5-4)$$

با توجه به اینکه تمام سیستم‌های موجک تنها از یک تابع مقیاس یا موجک با مقیاس‌بندی ساده و انتقال داده شده تولید می‌شوند. ساختن پارامتر دوبعدی از تابع $\psi(t)$ به صورت زیر انجام می‌گیرد (گاهی اوقات $\psi(t)$ موجک مولد یا موجک مادر نامیده می‌شود).

$$\psi_{j,k} = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (6-4)$$

که در این روابط \mathbb{Z} مجموعه اعداد صحیح و $2^{j/2}$ بیانگر یک جمله ثابت مستقل از مقیاس j نمی‌باشد. شیفت زمانی توسط پارامتر انتقال k و تمرکز متفاوت در حوزه زمان و فرکانس توسط پارامتر مقیاس j باعث می‌شود که موجک عملکردی مؤثرتر از حالت عادی داشته باشد.

می‌توان $f(t)$ را به شکل زیر با توجه به رابطه (6-4) نوشت:

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (7-4)$$

مجموعه دوبعدی ضرایب $a_{j,k}$ تبدیل موجک گسسته (DWT) $f(t)$ نامیده می‌شود. نحوه محاسبه $a_{j,k}$ ها به شکل زیر می‌باشد:

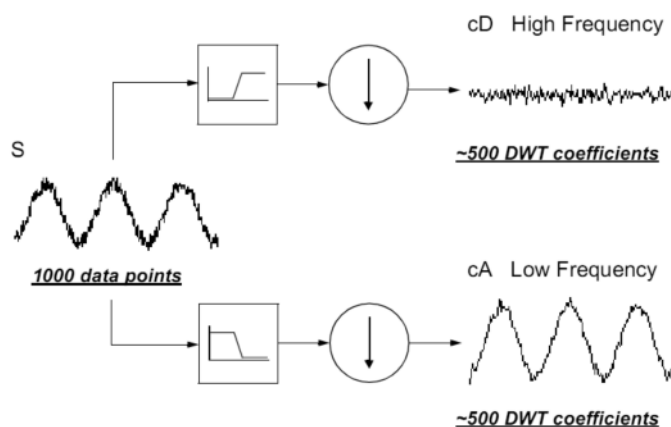
$$a_{j,k} = \langle \psi_{j,k}(t), f(t) \rangle \quad (8-4)$$

در صورتیکه $\psi_{j,k}$ از پایه‌های متعامد تشکیل شده باشند، ضرب داخلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\langle x(t), y(t) \rangle = \int x^*(t) \cdot y(t) dt \quad (9-4)$$

هدف اول بسط‌ها، داشتن ضرایب $a_{j,k}$ است که اطلاعات واضح‌تر از خود سیگنال بدست می‌دهند. هدف دوم صفر شدن و یا کوچک شدن ضرایب دیگر است. تبدیل موجک گسسته را بهتر بود سری موجک می‌نامیدند چرا که یک تابع از یک متغیر پیوسته را به یک توالی از ضرایب مانند آنچه در سری فوریه انجام می‌شود می‌نگارد و در واقع یک تبدیل نیست. این بسط دارای دو اندیس است، اندیس

انتقال زمانی k و اندیس مقیاس j در سری فوریه تنها دو مقدار ممکن برای k وجود دارد 0 و $\frac{\pi}{2}$ که ترم‌های سینوسی را می‌دهند. مقادیر j و k هارمونیک‌های فرکانسی را بدست می‌دهند [۱۳ و ۱۴ و ۱۵]. برای فهم بهتر عملکرد DWT، تبدیل موجک گسسته یک مرحله‌ای به یک سیگنال سینوسی خالص که نویز فرکانس بالا به آن اضافه شده است اعمال می‌گردد. دیاگرام شماتیک آن با سیگنال‌های واقعی در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۰): عملکرد تبدیل موجک گسسته یک مرحله‌ای به یک سیگنال سینوسی [۱۳]

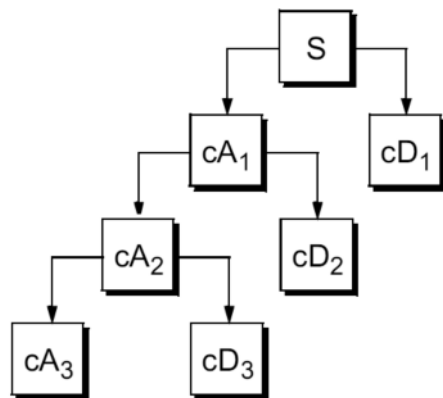
توجه شود که cD در شکل (۴-۱۰) اساساً شامل نویزهای فرکانس بالا می‌باشد در حالیکه ضرایب تقریبی cA دارای نویز کمی می‌باشند و تقریباً معرف سیگنال اصلی هستند. مشاهده می‌شود که تعداد ضرایب جزئی و تقریبی از نصف تعداد نمونه‌های سیگنال اصلی کمی بیشتر است. دلیل این مسئله مراحل فیلتر کردن است. بطوریکه در حین گذر سیگنال از فیلتر این مسئله ایجاد می‌شود. پیچیدگی موجود در مراحل فیلتر کردن سیگنال را لکه‌دار^۱ می‌کند و در نتیجه نمونه‌های اضافی را در نتایج خروجی ایجاد می‌کند [۱۴].

۴-۶- تجزیه چندسطحی

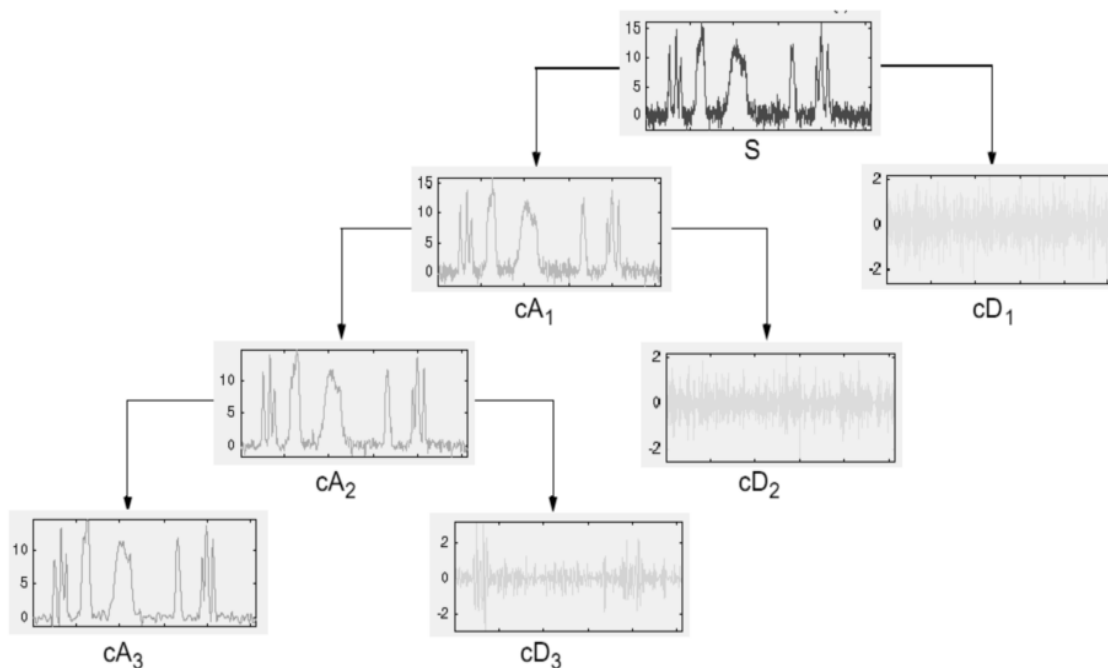
مراحل تجزیه چندسطحی با تجزیه مؤلفه‌های تقریبی تکرار می‌شود و به این ترتیب یک سیگنال به مؤلفه‌های جزئی‌تر بسیاری شکسته می‌شوند. شکل (۴-۱۱) را درخت تجزیه موجک نامند. در

^۱ Smears

شکل (۴-۱۲) یک نمونه از اطلاعات با ارزشی را که درخت تجزیه موجک می‌تواند بدهد، نشان داده شده است [۱۵] و [۱۶].



شکل (۴-۱۱): درخت تجزیه موجک [۱۳]

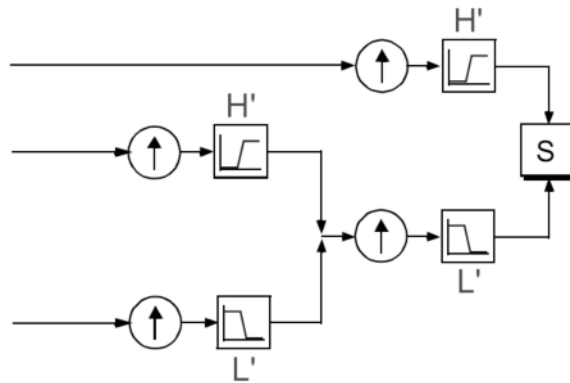


شکل (۴-۱۲): نحوه عملکرد درخت تجزیه موجک [۱۳]

از آنجا که مراحل تحلیل در این تجزیه چندسطحی تکراری می‌باشد، از لحاظ تئوری این مراحل را می‌توان تا بی‌نهایت ادامه داد. اما در واقع تجزیه تا هنگامی که مؤلفه‌های جزئی جداگانه شامل یک اطلاعات باشند، ادامه پیدا می‌کند. در عمل تعداد مناسب سطوح را بر اساس طبیعت سیگنال و یا بر اساس انتخاب ملاک مناسبی مانند آنتروپی انتخاب می‌کنند.

۴-۷- بازسازی سیگنال

پس از آموختن این مسئله که چگونه تبدیل موجک گسسته را می‌توان برای آنالیز و یا تجزیه سیگنال بکار برد، ترکیب یا بازسازی سیگنال عبارت از آن است که چگونه مؤلفه‌ها را می‌توان به سیگنال اولیه تبدیل کرد بدون آنکه اطلاعات از دست برود. عملیات ریاضی که موجب بازسازی سیگنال می‌شود را تبدیل موجک گسسته معکوس^۲ (IDWT) می‌نامند (شکل ۴-۱۳).



شکل (۴-۱۳): تبدیل موجک گسسته معکوس [۱۳]

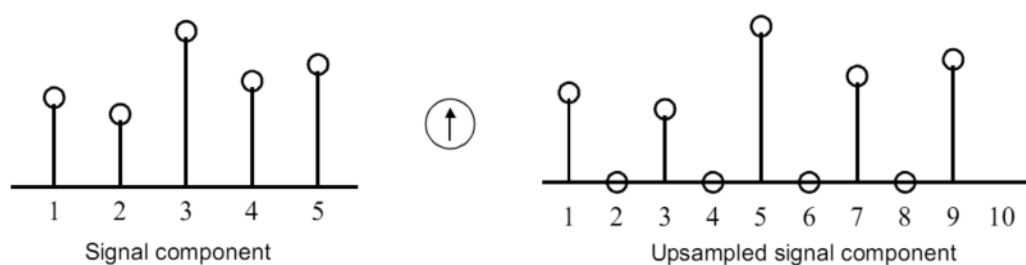
از آنجا که تجزیه موجک شامل فیلتر کردن و نمونه‌برداری با نرخ پایین است، بازسازی سیگنال بوسیله موجک نیز باید شامل نمونه‌برداری با نرخ بالا^۳ و فیلتر کردن باشد. نمونه‌برداری با نرخ بالا مرحله‌ای است که تعداد مؤلفه‌های سیگنال با قرار دادن صفرهایی در بین نمونه‌ها افزایش می‌یابد. فیلتر کردن در مرحله بازسازی سیگنال جای بحث دارد. به این دلیل که انتخاب فیلتر یک مرحله بحرانی در بازسازی دقیق سیگنال اصلی می‌باشد، باید به یاد داشت که نمونه‌برداری با سرعت پایین سیگنال در طی فاز تجزیه یک اعوجاجی به نام همپوشانی یا برهم‌افتادگی^۴ را ایجاد می‌کند.

¹ Wavelet Reconstruction

² Inverse Discrete Wavelet Transform

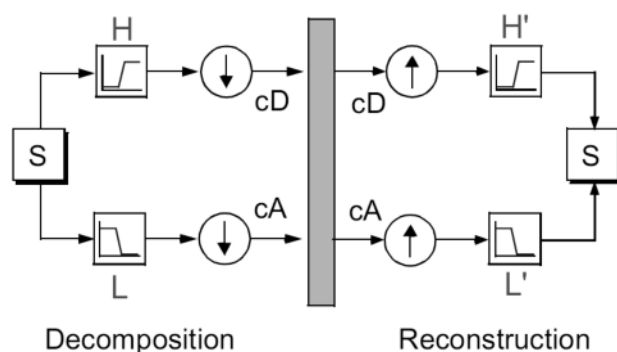
³ Up sampling

⁴ Aliasing



شکل (۴-۱۴): عملکرد مفهوم نرخ نمونه‌برداری بالا در بازسازی سیگنال [۱۳]

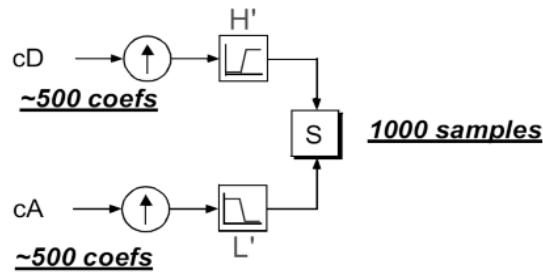
مشخص شده است که رفع این موضوع با انتخاب دقیق فیلترها در مراحل بازسازی و تجزیه کاملاً مرتبط است و با انتخاب فیلتر مناسب اثر آن از بین می‌رود. فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر تجزیه موجک (H, L) و فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر بازسازی موجک (L, H) باهم یک سیستم با نام فیلترهای مزدوج آینه‌ای^۱ (QMF) را تشکیل می‌دهند که در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است [۱۷].



شکل (۴-۱۵): فیلترهای مزدوج آینه‌ای [۱۱]

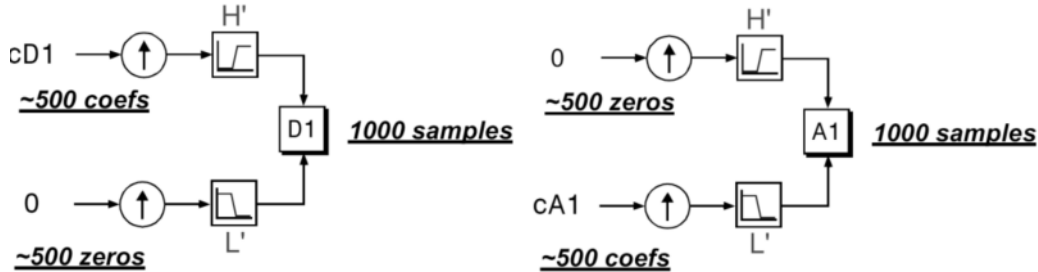
مشخص است که می‌توان سیگنال اصلی همان‌طور که در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است را با ضرایب تقریبی و جزئی بازسازی کرد.

^۱ Quadrature Mirror Filter



شکل (۴-۱۶): بازسازی سیگنال با ضرایب تقریبی و جزئی [۱۳]

در ضمن در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است که می‌توان ضرایب تقریبی و جزئی سیگنال را با بردارهای ضرایب خودشان بازسازی کرد. شکل (۴-۱۷) نشان می‌دهد که چگونه با استفاده از ضرایب برداری cA_1 می‌توان مولفه تقریبی سطح اول سیگنال را بازسازی کرد. در بازسازی cA_1 همان مراحل بازسازی سیگنال اصلی طی می‌شود با این تفاوت که به جای ضرایب بردار جزئی cD_1 یک بردار با ضرایب صفر قرار داده می‌شود. در نتیجه با این کار می‌توان مقدار تقریبی A_1 را که دارای همان اندازه S است و مؤلفه تقریبی حقیقی S می‌باشد را بازسازی کرد.



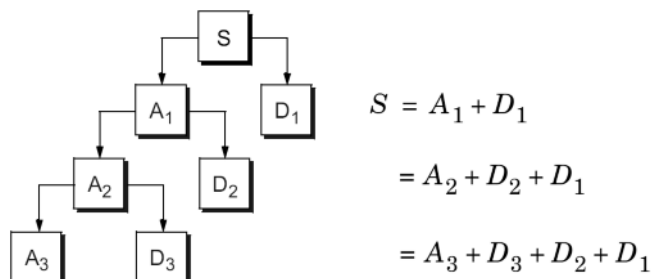
شکل (۴-۱۷): بازسازی ضرایب تقریبی و جزئی [۱۳]

به همین ترتیب می‌توان طبق شکل (۴-۱۷) مؤلفه جزئی سطح اول سیگنال را بازسازی نمود. مجموع مؤلفه‌های تقریبی و جزئی بازسازی شده سیگنال اصلی را تشکیل می‌دهند. در حقیقت:

$$A_1 + D_1 = S \quad (۴-۱۰)$$

باید توجه داشت که بردار ضرایب cA_1 و cD_1 به دلیل اینکه در اثر نمونه‌برداری با نرخ پایین بدست می‌آیند دارای اعوجاج و همپوشانی می‌باشند و دارای نصف طول بردار سیگنال اصلی هستند. از ترکیب مستقیم آنها نباید برای ایجاد سیگنال اصلی استفاده کرد، ضروری است که ابتدا مؤلفه‌های تقریبی و جزئی را بازسازی کرد و سپس از ترکیب آنها سیگنال اصلی را بدست آورد.

با تعمیم این روش به مؤلفه‌های تحلیل موجک چند سطحی می‌توان فهمید که روابط مشابهی برای همه مؤلفه‌های بازسازی شده تشکیل‌دهنده برقرار است. شکل (۴-۱۸) این مسئله را نشان می‌دهد [۱۳].



شکل (۴-۱۸): روش های گوناگون بازیابی سیگنال با استفاده از مؤلفه‌های جزئی و تقریبی [۱۳]

۴-۸- تاریخچه موجک‌ها

از نقطه‌نظر تاریخی تحلیل موجک روش جدیدی می‌باشد. می‌توان فکر کرد که شالوده ریاضی آن به زمان ژوزف فوریه^۱ در قرن نوزدهم برمی‌گردد. فوریه پایه مفهوم موجک‌ها را با تئوری‌اش در مورد تحلیل فرکانسی گذاشت و ثابت کرد این نوع مطالعه بر روی سیگنال بسیار مفید و مؤثر می‌باشد. توجه محققین به تدریج از تحلیل براساس فرکانس به تحلیل براساس مقیاس متمایل شد. این فکر از زمانی آغاز شد که مشخص گردید که اندازه متوسط تقریبی نوسان‌ها در مقیاس‌های مختلف کمتر به نویز حساس می‌باشد.

اولین بار کلمه موجک را آلفرد هآر^۲ در پایان‌نامه‌اش ثبت کرد. مفهوم موجک‌ها با تئوری کنونی‌اش اولین بار توسط جین مورلت^۳ و تیمی که در مرکز فیزیک تئوری مارسیل^۴ زیر نظر آلکس گروسمن^۵ در فرانسه کار می‌کردند ارائه شد.

روشهای تحلیل موجک اساساً توسط وای میر^۶ و همقطاران‌اش توسعه پیدا کرد. الگوریتم اصلی

¹ Joseph Fourier

² Alfred Haar

³ Jean Morlet

⁴ Marseille Theoretical Physics Center

⁵ Alex Grossman

⁶ Y. Meyer

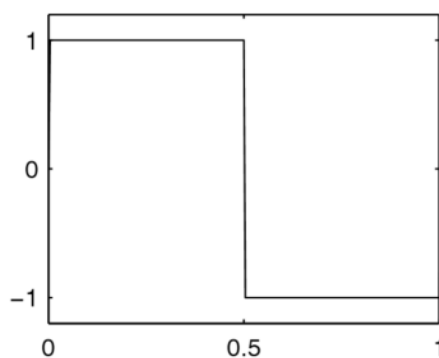
موجک‌ها به کار استفان مالت^۱ در سال ۱۹۸۸ برمی‌گردد. از آن سال به بعد بود که آوازه تئوری موجک‌ها در تمامی دنیا پیچید و تحقیقات بر روی آن بین‌المللی شد. در ایالات متحده هم علاقه چشمگیری به تحقیقات بر روی موجک‌ها ایجاد شد و دانشمندانی مانند اینگرید دابچیز^۲ و رونالد کوایفمن^۳ و ویکتور هایزر^۴ روی این موضوع کار کردند، این تحقیقات تا به امروز هم ادامه دارد و پیشرفت‌های چشمگیری در یافتن خواص موجک‌ها و کاربردهای آن حتی در مسائل زندگی روزمره حاصل شده است [۱۳].

۹-۴- مقدمه‌ای به خانواده‌های موجک‌ها

بدلیل قابلیت انعطافی که در انتخاب یک موجک وجود دارد توابع بسیاری به عنوان موجک مادر انتخاب شده‌اند. در این بخش تعدادی از آنها که بیشتر از سایرین بکار برده می‌شوند معرفی می‌گردد:

۴-۹-۱- موجک Haar

هر بحثی در مورد موجک‌ها با Haar آغاز می‌شود و ساده‌ترین و اولین موجک می‌باشد. موجک Haar ناپیوسته است و مشابه یک تابع پله می‌باشد که در شکل (۴-۱۹) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۹): موجک Haar [۱۳]

موجک Haar به شکل زیر تعریف می‌شود:

¹ Stephan Mallet
² Ingrid Daubechies
³ Ronald Coifman
⁴ Victor Wicker Hauser

$$n(t) = \begin{cases} 1 & ; 0 \leq t \leq 1/2 \\ -1 & ; 1/2 \leq t \leq 1 \\ 0 & ; \text{other wise} \end{cases} \quad (11-4)$$

برای سیگنالهای یک بعدی گسسته، این موجک عمل دیفرانسیل گیری را انجام می دهد [۱۴].

۴-۹-۲- موجک Daubechies

اینگرید دابچیز یکی از درخشنده ترین پژوهشگران در دنیای تحقیقات موجکها می باشد. اختراع او بطور فشرده موجکهای متعامد با دامنه محدود^۱ نامیده می شود و بنابراین او با این کار تبدیل موجک گسسته را عملی کرده است. اسامی موجکهای خانواده Daubechies به شکل dbN نوشته می شود که N مرتبه و db لقب موجک می باشد. با توجه به این که موجک db1 مشابه موجک Haar می باشد، بقیه موجکهای این خانواده در شکل (۴-۲۱) نشان داده شده است. دابچیز دسته ای از توابع مقیاس و موجکها را ارائه داد که از حل این دو معادله بدست می آیند.

$$g(t) = \sqrt{2} \sum_{n=0}^{2N-1} C[n]g[2t-n] \quad (12-4)$$

$$h(t) = \sqrt{2} \sum_{n=0}^{2N-1} d[n]g[2t-n] \quad (13-4)$$

در روابط فوق $g(t)$ تابع مقیاس و $h(t)$ تابع موجک می باشد و نیز رابطه (۱۴) برقرار است.

$$d[n] = (-1)^n c[2N-n+1] \quad , \quad n = 0, 1, \dots, 2N-1 \quad (14-4)$$

ضرایب مقیاس $C[n]$ باید در شرایط زیر صدق کند:

(۱) شرط لازم و کافی برای وجود جواب در دو معادله یاد شده این است که:

$$\sum_{n=0}^{2N-1} c[n] = \sqrt{2} \quad (15-4)$$

(۲) انتقالها و بازشدنهای صحیح $g(t)$ و $h(t)$ خانواده متعامدی را تشکیل می دهند اگر ضرایب

مقیاس در روابط زیر صدق کنند.

¹ Compactly Supported Orthonormal Wavelet

$$\sum_{n=0}^{2N-1} c[n-2k] c[n-2i] = \delta_{ki} \quad \forall k, i \quad (16-4)$$

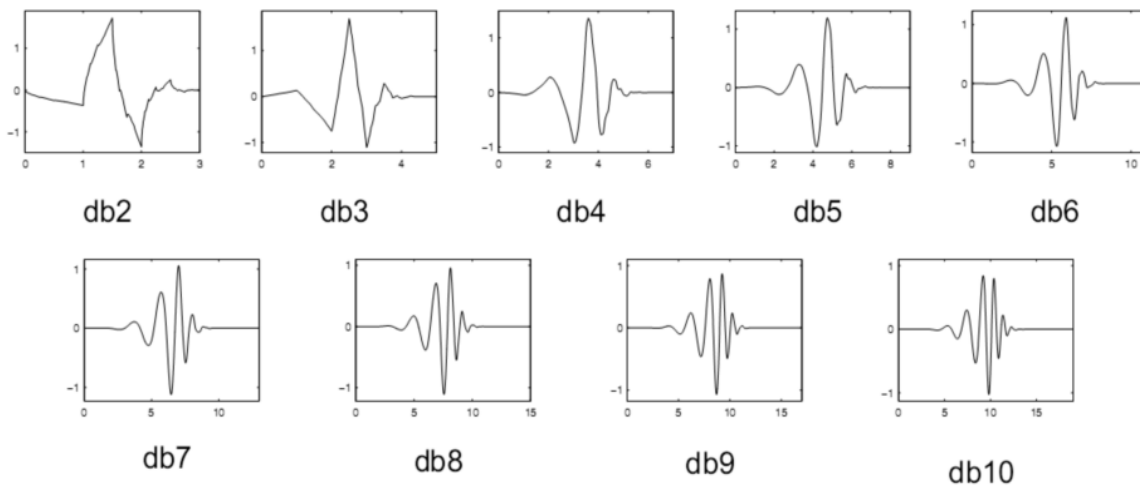
δ_k تابع دلتای کرونیکر است.

(۳) قید زیر برقرار باشد:

$$\sum_{n=0}^{2N-1} (-1)^{n-1} n^k c[n] = 0 \quad ; \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (17-4)$$

در نتیجه مشتقهای تبدیل فوریه $h(t)$ تا مرتبه N ، در مبدا برابر صفر هستند. یعنی:

$$\left. \frac{d^k H(\omega)}{d\omega^k} \right|_{\omega=0} = 0 \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (18-4)$$



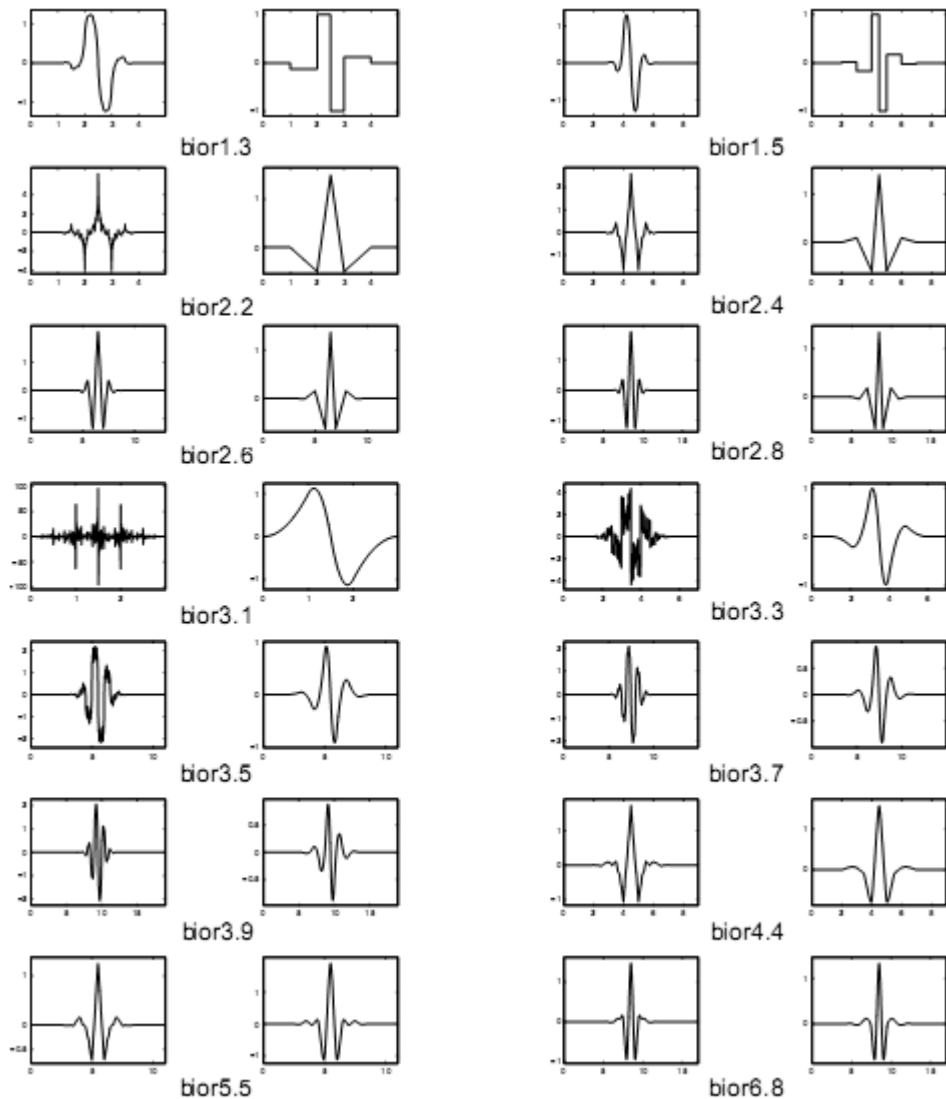
شکل (۴-۲۰): خانواده موجک‌های Daubechies [۱۳]

از میان موجک‌های این خانواده موجک‌هایی با طول کمتر برای فرایندهای سریع و موجک‌هایی با طول بیشتر برای فرایندهای کند مناسب است. استفاده از آنها در تجزیه و تحلیل سیگنال‌های قدرت توصیه شده است [۱۸].

۴-۹-۳- موجک Biorthogonal

این خانواده از موجک‌ها خواص خطی را نمایش می‌دهند که برای بازسازی سیگنال و تصاویر لازم است. با استفاده از دو موجک یکی برای تجزیه و دیگری برای بازسازی سیگنال به جای یک موجک برای هر دو کار خواص جالبی از آنها استخراج شده است. شکل (۴-۲۱) این خانواده از موجک‌ها را

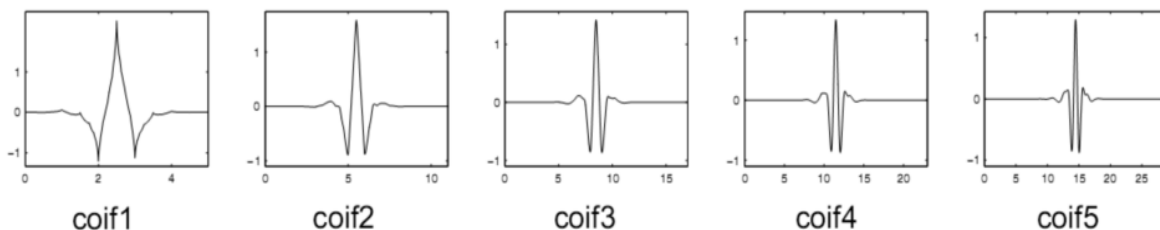
نشان می‌دهد [۱۳].



شکل (۴-۲۱): خانواده موجک‌های Biorthogonal [۱۳]

۴-۹-۴- موجک Coiflets

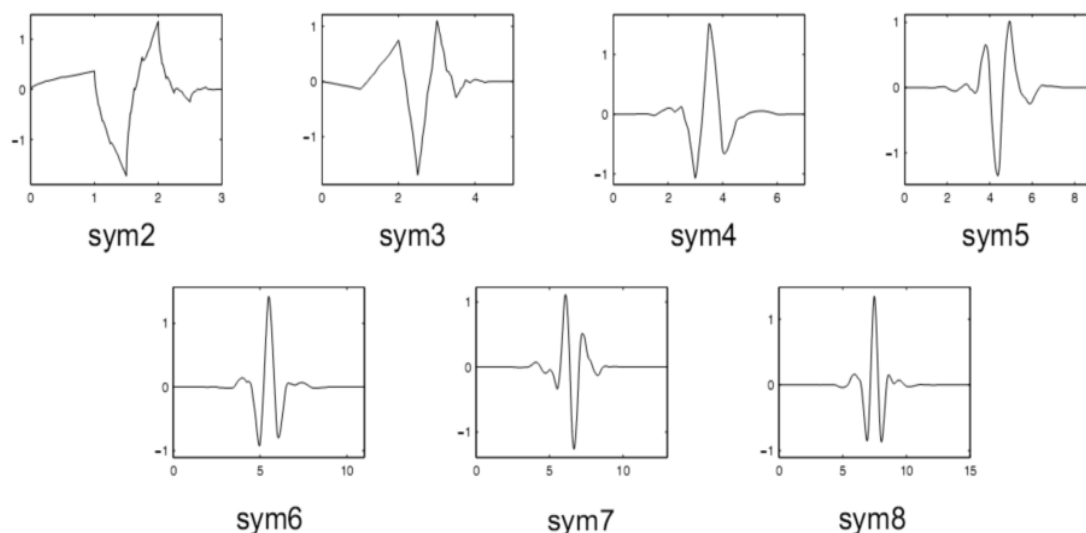
این خانواده از موجک‌ها توسط دابچیز با درخواست آر کوایفمن ساخته شده است. تابع موجک آن در $2N$ لحظه مساوی صفر و تابع مقیاس آن در $2N-1$ لحظه مساوی صفر می‌باشد. دو تابع دارای طول پایه $6N-1$ می‌باشند. این موجک‌ها در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده‌اند [۱۳].



شکل (۴-۲۲): خانواده موجک‌های Coiflets [۱۳]

۴-۹-۵- موجک Symlet

Symlet ها تقریباً متقارن موجک‌های خانواده Daubechies می‌باشند و به عنوان تغییر یافته خانواده db معروفند خواص این دو خانواده از موجک‌ها مشابه هم می‌باشد. شکل (۴-۲۳) این موجک‌ها را نشان می‌دهد [۱۳].



شکل (۴-۲۳): خانواده موجک‌های Symlet [۱۳]

۴-۹-۶- موجک Morlet

این موجک دارای تابع مقیاس نمی‌باشد موجک Morlet طبق رابطه (۴-۱۹) تعریف می‌شود:

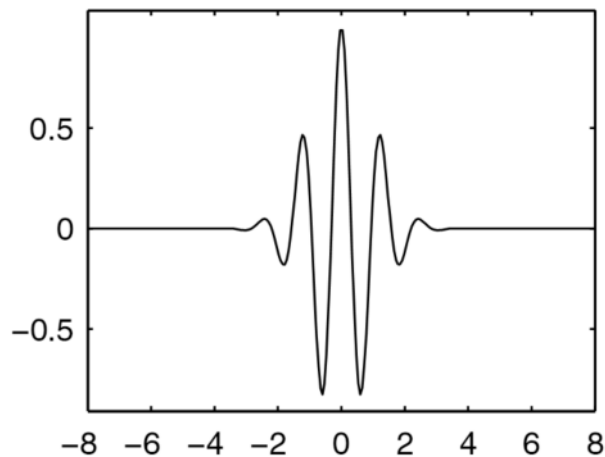
$$h(t) = \pi^{-1/4} (e^{-j\omega_0 t} - e^{-\omega_0^2 / 2}) e^{-t^2 / 2} \quad (۴-۱۹)$$

از آن جا که به ازاء $\omega_0 \geq 5$ جمله دوم داخل پرانتز در رابطه (۴-۱۹) تقریباً برابر صفر است معمولاً

این موجک را بدین صورت تقریب می‌زنند:

$$h(t) = \pi^{-1/4} e^{-j\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad \omega_0 \geq 5 \quad (20-4)$$

موجک Morlet یک موجک مختلط است و توسط آن می‌توان اطلاعات دامنه و فاز فرایند مورد بررسی را استخراج نمود. شکل (۴-۲۴) این موجک را نشان می‌دهد. از موارد کاربرد این موجک می‌توان به تجزیه تحلیل سیگنالهای ژئوفیزیکی و یا بررسی حالت گذرای سیستم قدرت اشاره کرد [۱۴].

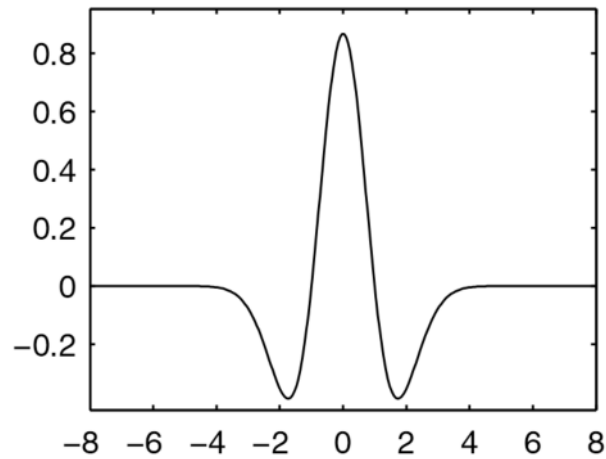


شکل (۴-۲۴): موجک Morlet [۱۳]

۴-۹-۷- موجک Mexican Hat

این موجک دارای تابع مقیاس نمی‌باشد و از یک تابع که متناسب با تابع مشتق مرتبه دوم تابع چگالی احتمال گوسی است مشتق شده است. این موجک با رابطه (۲۱) تعریف می‌شود. شکل (۴-۲۵) موجک این خانواده را نشان می‌دهد [۱۴].

$$h(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1-t^2) e^{-t^2/2} \quad (21-4)$$



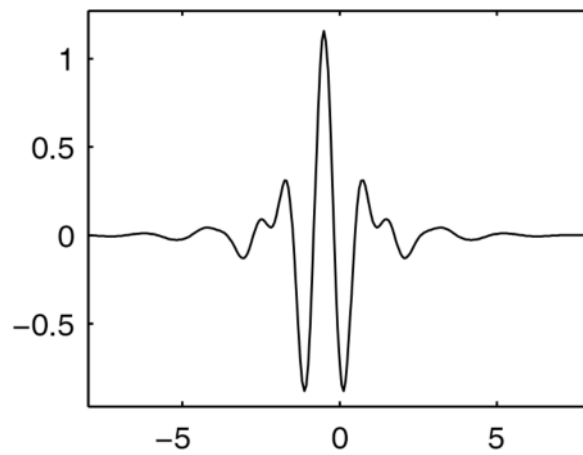
شکل (۴-۲۵): موجک Mexican Hat [۱۳]

این موجک یکی از رایج‌ترین توابع هموارساز می‌باشد و در تشخیص لبه کاربرد دارد.

۴-۹-۸- موجک Meyer

موجک Meyer و تابع مقیاسش در حوزه فرکانس تعریف شده‌اند و در شکل (۴-۲۶) نمایش داده

شده‌اند.



شکل (۴-۲۶): موجک Meyer [۱۳]

۴-۱۰- کاربردهایی از تبدیل موجک بخصوص در سیستم‌های قدرت

همانگونه که قبلاً اشاره شد عمده‌ترین کاربرد تبدیل موجک در تجزیه و تحلیل سیگنالهای

غیرایستا می‌باشد. این تبدیل به دلیل دارا بودن قابلیت بزرگنمایی^۱، برخلاف تبدیل فوریه توصیف بسیار خوبی از نواحی ناپیوسته ارائه می‌دهد و به همین جهت استفاده از آن در محاسبات عددی (مثلاً حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی) مناسب به نظر می‌رسد. در مورد سیستمهای قدرت، آنچه که تاکنون به کمک تبدیل موجک انجام گرفته بیشتر در زمینه تجزیه و تحلیل سیگنالهای اغتشاش بوده است. در زمینه تجزیه تحلیل حالت گذرا از موجکها به عنوان ابزار دیگری علاوه بر روشهای حل در حوزه زمان یا فرکانس استفاده شده است.

از کاربردهای دیگر تبدیل موجک در پردازش سیگنال، تشخیص لبه و نویززدایی (بخصوص در مورد سیگنالهای دوبعدی و تصویری) می‌باشد. از آنجا که لبهها غالباً جهشهایی شدید در سیگنال هستند، محتوی فرکانس بالای بزرگی دارند و با توجه به توانایی موجک در تجزیه سیگنال در مقیاسهای مختلف، این تبدیل ابزار مناسبی در تشخیص لبهها در سیگنالها می‌باشد از این رو کاربردهای مختلفی در سیستمهای قدرت به خصوص در شبکههای انتقال و توزیع دارد که در مراجع مختلف کاربردهایی از آن تشریح شده است [۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲].

همچنین با دانستن محدوده فرکانسی سیگنال اصلی، با استفاده از تبدیل موجک و ویژگیهای تجزیه و تحلیل چنددقتی، می‌توان عمل نویززدایی را با بازده خوبی روی سیگنالهای حاوی نویز انجام داد [۲۳].

۴-۱۰-۱- تشخیص و مکان‌یابی اغتشاش در سیستمهای قدرت با کمک موجکها

اغتشاش در سیستم قدرت هنگامی رخ می‌دهد که تغییرات در ساختار الکتریکی مدار قدرت آن بوجود آید. اغتشاشهایی که موجب قطعی می‌شوند در مقایسه با اغتشاشهایی که هر روز در عملکرد نرمال سیستم رخ می‌دهد غیرمعمول هستند. منحنی بار روزانه با تغییر بارهای صنعتی و خانگی تغییر می‌کند و لذا نیاز به کلیدزنی خط انتقال برای تغذیه جریان اضافی و یا کلیدزنی بانک خازنی برای تعادل بارهای القایی و ایجاد پایداری و بازده بیشتر می‌باشد و لذا اغتشاش روزانه ایجاد می‌گردد. علاوه

^۱ Zooming

بر این اغتشاش‌های نرمال، اغتشاش‌های غیرمعمول مانند: رعد و برق، هادیهای شکسته شده و خطای تجهیزات نیز وجود دارند. به منظور بهبود کیفیت توان الکتریکی منابع، علل این نوع اغتشاش‌ها باید قبل از اینکه عملی برای رفع آن انجام شود شناخته شوند. برای تعیین علل و منابع اغتشاش، باید این اغتشاش‌ها را تشخیص داد و محلیابی کرد. اولین بار در سال ۱۹۹۴ ریبیریو^۱ پیشنهاد کرد که تبدیل موجک وسیله مفیدی برای تحلیل سیگنالهای غیرایستا در سیستمهای قدرت می‌باشد. در سال ۱۹۹۴ سانتاسو^۲ ادعا کرد که روشهای قدیمی برای شناسایی و محلیابی اغتشاش‌ها هزینه‌بر و غیرمؤثر است [۲۴].

روش‌های مناسبی برای شناسایی و محلیابی هر یک از انواع مختلف اغتشاش‌ها در سیستم قدرت مانند نوسانات سریع ولتاژ و تغییرات ولتاژ بلندمدت و کوتاه مدت و اعوجاج هارمونیک ارائه شده است. این روشها براساس تجزیه چند سطحی سیگنال می‌باشد. بطوریکه اغتشاش‌های گذرا و سریع در مقیاس‌های پایین تشخیص داده می‌شوند به دلیل اینکه موجک مادر اغلب با زمان محلیابی می‌شود، در حالیکه اغتشاش‌های گذرای آهسته و طولانی در مقیاس‌های بالاتر شناسایی می‌گردند به دلیل اینکه موجک مادر کمتر در حوزه زمان محلیابی می‌شود [۲۴].

۴-۱۰-۲- فشرده‌سازی و ذخیره‌سازی اطلاعات اغتشاش سیستم قدرت

مسئله اغتشاش در قدرت یک باند فرکانسی وسیعی را می‌پوشاند. برای دریافت یک اغتشاش در سیستم قدرت به تجهیزاتی با پهنای باند وسیعی نیاز می‌باشد و از یک مونیتورینگ کیفیت توان^۳ با نرخ نمونه‌برداری ۱ تا ۴ مگاهرتز استفاده می‌گردد. از آنجا که اغتشاش‌های قدرت ده‌ها بار در میکروثانیه رخ می‌دهد. یک ثبات حوادث که به تنهایی از این تجهیزات نظارت‌کننده استفاده می‌کند قادر به ایجاد داده‌هایی به اندازه مگابایت می‌باشد. به عنوان یک نتیجه مقدار این اطلاعات ثبت شده به شدت افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد هزینه نگهداری این داده‌ها خیلی گران تمام خواهد شد. لذا

¹ Riberio

² Santaso

³ Power quality monitoring

فشرده‌سازی این داده‌ها بسیار مطلوب است. تکنیک به کاررفته در حال حاضر برای کاهش حجم این اطلاعات براساس "به اطراف پراکندن"^۱ می‌باشد که ظرفیت حافظه‌های موجود را بانوشتن روی داده‌های قبلی حفظ می‌کند. یک روش تکنیک کوانتیزه^۲ وجود دارد که با یک گروه از شکل موجهای مشابه را با یک داده ذخیره می‌کند. هر دو روش در فضای حافظه صرفه‌جویی می‌کنند اما داده‌ها را فشرده نمی‌کنند. هم اکنون تعداد زیادی وسیله ثبات اغتشاش قدرت برای سیستمهای قدرت وجود دارند که برای نظارت بر سیستم قدرت به کار می‌روند. این نشاندهنده حجم زیاد اطلاعات می‌باشد.

روش WT برای فشرده‌سازی سیگنالهای اغتشاش قدرت براساس خواص تجزیه و بازسازی موجک‌ها را سانتاسو اولین بار در سال ۱۹۹۷ ارائه داد.

با کار بر روی اندازه ضرایب تبدیل موجک (WTC) به نحوی که ضرایبی که مقدارشان زیر یک حد آستانه‌ای^۳ باشد حذف گردند می‌توان تنها یک سوم و یا یک چهارم از کل WTC که دارای مقادیر غیرصفر هستند را ذخیره کرد. بعدها تحقیقات نشان داد که نرخ فشرده‌سازی (نسبت سائز فایل اصلی به سائز فایل فشرده شده) ۳ تا ۶ را می‌توان با این کار بدست آورد. به این ترتیب محاسبات مخرب (که توسط نقاط غیر صفر که به وجود می‌آیند) به طور چشمگیری کاهش می‌یابد و سیگنال اغتشاش را بطور مطلوبی از فایل ذخیره شده می‌توان بازسازی کرد [۲۴و۲۵].

۴-۱۰-۳- حفاظت دستگاههای قدرت

برخی عیوب موجود در سیستم عایقی و مواد دی‌الکتریک در تجهیزات سیستم قدرت باعث افزایش تخلیه جزئی می‌گردند. این مسئله یک مشکل بزرگ و پنهان برای سیستمهای قدرت می‌باشد و ممکن است نهایتاً باعث از بین رفتن تجهیزات گردد. برای تشخیص این عیوب روشهای زیادی وجود دارد. اما این روشها برای کاربردهای عملی مناسب نمی‌باشند و نتایج بدست آمده دقت کافی ندارند. با توسعه روشهای دیجیتال پردازش سیگنال بخصوص تبدیل موجک، امکان تشخیص دقیق این عیوب و

¹ wrap-around

² Quantization Technique

³ Threshold

حفاظت از تجهیزات سیستم قدرت بوجود آمد. یکی از مهمترین قسمتهای سیستم قدرت ترانسفورماتورهای قدرت می‌باشند. قابلیت اطمینان و پایداری کل سیستم قدرت به ترانسفورماتورهای قدرت و در مدار بودن آنها بستگی دارد. از این روست که حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت برای عملکرد صحیح این تجهیزات الزامی است. مسئله اصلی برای حفاظت صحیح ترانسفورماتورها تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی می‌باشد. یکی از روشهای متداول استفاده از هارمونیک دوم موجود در سیگنال جریان هجومی برای تشخیص آن از جریان خطا می‌باشد. بدین ترتیب با اندازه‌گیری مؤلفه هارمونیک دوم، تصمیم‌گیری در مورد قطع کردن ترانسفورماتور انجام می‌شود. روش معمول برای تشخیص جریان هجومی ترانسفورماتور از جریان خطا استفاده از انرژی سیگنال روش موجک‌ها می‌باشد [۲۴].

۴-۱۰-۴- تحلیل اغتشاش‌های شبکه قدرت

محققین پیشنهاد کردند که از حل تبدیل موجک شبکه که در روشهای شناسایی از آن استفاده شده است می‌توان شکل موجهای ولتاژ و جریان را در شبکه به صورت همزمان بدست آورد. اخیراً یک روش جدید با نام تحلیل گذراها براساس موجک^۱ (WBTA) برای آنالیز اغتشاش‌های سیستم قدرت بر پایه معادل حوزه موجک مؤلفه‌های سیستم قدرت مانند مقاومت‌ها، سلف‌ها و خازن‌ها توسعه یافته است. این روش یک راه سیستمی را برای تحلیل مسئله اغتشاش در سیستم قدرت پیشنهاد می‌کند. معادل‌های حوزه موجک با بکار بردن تبدیل موجک بر روی معادلات انتگرال-دیفرانسیل المانها بدست می‌آیند. حاصل یک سری معادلات جبری برای کل شبکه خواهد بود. با حل آنها ضرایب موجک ولتاژها در گره‌های شبکه بدست می‌آیند. ولتاژهای حقیقی با استفاده از بازسازی سیگنال بوسیله تبدیل موجک معکوس بدست می‌آیند و به این ترتیب می‌توان شبکه قدرت را بوسیله موجک‌ها تحلیل کرد [۲۴].

^۱ Wavelet-Based Transient Analysis

۴-۱۰-۵- تشخیص نوسان توان با استفاده از موجک

فرکانس سیستم در هنگام وقوع نوسان توان متغیر است، اما این تغییرات در بازه کوچکی حول فرکانس نامی اتفاق می افتد. از طرف دیگر مشخصه خطا در ایجاد حالت های گذرای شدید است و فرکانس این تغییرات بسیار بالاتر از فرکانس نامی سیستم است. مرجع [۲۶] و [۲۷] از این تفاوت نوسان و خطا برای تشخیص نوسان و تفکیک آن از خطا استفاده می کند.

در این روش از جریان و ولتاژ با فرکانس ۴۰.۹۶ کیلو هرتز نمونه برداری می شود. در هر نیم سیکل، با استفاده از پنجره های ۲ سیکلی، تبدیل Wavelet به شکل موج های ولتاژ و جریان اعمال می شود و به این ترتیب انرژی سیگنال به ۱۳ دسته طبق جدول (۴-۱) تبدیل می شود.

جدول (۴-۱): طبقات Wavelet و فرکانس های نظیر هر طبقه [۲۶]

| Wavelet Level | Frequency Band (Hz) | Center Frequency (Hz) |
|---------------|---------------------|-----------------------|
| d1 | 10240-20480 | 15360 |
| d2 | 5120-10240 | 7680 |
| d3 | 2560-5120 | 3840 |
| d4 | 1280-2560 | 1920 |
| d5 | 640-1280 | 960 |
| d6 | 320-640 | 480 |
| d7 | 160-320 | 240 |
| d8 | 80-160 | 120 |
| d9 | 40-80 | 60 |
| d10 | 20-40 | 30 |
| d11 | 10-20 | 15 |
| d12 | 5-10 | 7.5 |
| d13 | 0-5 | 2.5 |

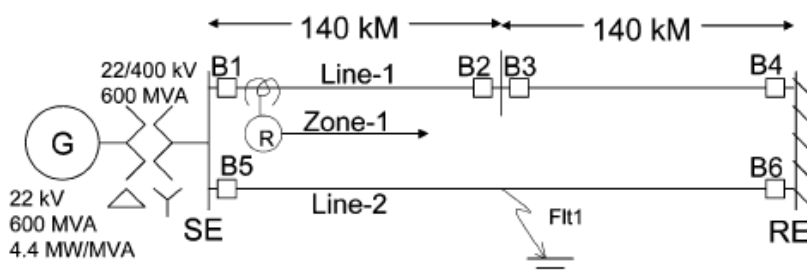
طبق اظهارات گفته شده در این مقاله از آن جا که محاسبات تنها دو بار در هر سیکل انجام می پذیرد، بار محاسباتی زیادی به رله تحمیل نمی گردد.

انرژی هر دسته با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود و با توجه به دسته بندی های صورت گرفته انتظار می رود که انرژی حالت گذرا در دسته های یک تا چهار ، و انرژی فرکانس های نزدیک فرکانس نامی در دسته نهم ذخیره شود.

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N [d(i)]^2} \quad (۴-۲۲)$$

همچنین از آن جا که در صورت بروز خطا حالت های گذرای شدیدتری در ولتاژ به وجود می آید،

در این روش از دسته های یک تا چهار ولتاژ و دسته نهم جریان استفاده می شود. این مقاله برای شبیه سازی روش خود از یک شبکه نمونه طبق شکل (۴-۲۷). استفاده کرده است و وقوع خطا در حالت های مختلف شبکه روی خط ۲ را مورد بررسی قرار داده است.



شکل (۴-۲۷): شبکه مورد بررسی [۲۶]

شکل موج های جریان و انرژی های دسته های مختلف برای حالتی که زاویه بین دو باس قبل از خطا ۴۵ درجه بوده است و خطایی روی خط ۲ در زمان ۰.۶ ثانیه اتفاق افتاده و پس از باز شدن خط ۲ در ۱۰۰ میلی ثانیه شبکه را نوسانی کرده است.

الگوریتم این روش به این صورت است که ولتاژها و جریان های سه فاز نمونه برداری شده و به رله داده می شوند. با استفاده از Wavelet طبقه نهم انرژی جریان برای سه فاز و طبقه های اول تا چهارم انرژی ولتاژ برای سه فاز محاسبه می شوند. سپس چهار انرژی محاسبه شده ولتاژ برای هر فاز با هم جمع می شوند و یک شاخص انرژی ولتاژ برای هر فاز به دست می آید.

این محاسبات هر نیم سیکل یک بار صورت می پذیرد و اگر درصد تغییر شاخص جریان برای یک نمونه نسبت به نمونه قبل بیش از مقدار تنظیم شده باشد در حالی که شاخص ولتاژ تغییر نکرده باشد، این تغییر یک نوسان توان تشخیص داده می شود و اگر در این نمونه نسبت به نمونه قبل تغییر شدیدی در ولتاژ دیده شود، و یا مقدار شاخص ولتاژ بیش از حد معمول باشد، خطا تشخیص داده خواهد شد و خروجی نمایشگر نوسان توان (PSI)^۱ صفر خواهد گردید.

خروجی PSI با خروجی خطای سه فاز رله AND می شود و در صورتی که هر دو فعال شوند، به این معنا که امپدانس در هر سه فاز وارد مشخصه عملکردی رله شده است و نوسان توان نیز تشخیص داده شده است، خروجی PSB فعال خواهد شد. نحوه ترکیب سیگنال PSI با واحد سه فاز

^۱ Power Swing Indicator

رله دیستانس در شکل (۴-۲۸) آورده شده است [۲۱].

| PSI(I) | 3phf | Block |
|--------|------|-------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |



شکل (۴-۲۸): نحوه ترکیب سیگنال PSI با واحد 3-ph رله دیستانس [۲۶]

این مقاله برای روشی که ارائه کرده است مزایایی را به شرح زیر عنوان کرده است:

- این روش تغییرات فرکانس سیستم را در طول نوسان در نظر گرفته است.
- از آن جا که فرکانس سیستم در طول نوسان تغییر می کند، استفاده از Wavelet مناسب تر از تبدیل فوریه خواهد بود.
- از آن جا که محاسبات این روش دو بار در سیکل انجام می شود، بار محاسباتی زیادی به رله وارد نخواهد شد. با این حال الگوریتم به سرعت نوسان و خطا را تشخیص می دهد.
- این الگوریتم نوسان را پیش از ورود امپدانس به ناحیه سوم عملکرد رله دیستانس تشخیص می دهد.
- این روش به هیچ کدام از پارامترهای شبکه که ممکن است تغییر کنند بستگی ندارد [۲۶].

در فصل بعد الگوریتم پیشنهادی در این پایان نامه جهت تشخیص نوسان توان با استفاده از تبدیل

موجک تشریح خواهد شد و نتایج حاصل از شبیه سازی بر روی یک شبکه نمونه ارائه خواهد شد.

فصل پنجم

شبه سازی

۵-۱- تئوری الگوریتم تشخیص نوسان توان با استفاده از تبدیل موجک

فرکانس ولتاژها و جریان‌های شبکه در حین نوسان توان در رنج کوچکی اطراف فرکانس نامی شبکه تغییر می‌کنند. از طرفی شروع خطا با حالت گذرا همراه می‌باشد. فرکانس حالت گذرای سیستم بسته به محل خطا، لحظه وقوع خطا و شرایط سیستم پیش از خطا در یک رنج وسیعی تغییر می‌کند. رنج فرکانس حالت گذرای سیستم‌های قدرت از فرکانس نامی شبکه خیلی بالاتر است. از این نکته می‌توان جهت تشخیص وقوع خطا استفاده کرد.

در الگوریتم پیشنهادی جهت تشخیص نوسان توان از اندازه‌ی امیدانس اندازه‌گیری شده توسط رله حفاظتی جهت تشخیص نوسان توان استفاده می‌شود. در صورتی که امیدانس اندازه‌گیری شده از مقدار مشخصی کوچکتر شود و حالت گذرای فرکانس بالا در ناحیه‌ی حفاظتی وجود نداشته باشد، الگوریتم این شرایط را نوسان توان تشخیص می‌دهد و رله دیستانس را بلاک می‌کند. اما به محض وقوع خطا در ناحیه حفاظتی رله دیستانس که همراه با حالت گذرای فرکانس بالا است سیگنال تشخیص نوسان توان غیر فعال گردیده و رله شروع به کار می‌کند. مقدار حدی امیدانس می‌تواند بیرونی‌ترین ناحیه رله دیستانس در نظر گرفته شود. این انتخاب در خطوط بلند با بارگذاری سنگین مطلوب می‌باشد. در ادامه تئوری تشخیص خطا شرح داده شده است.

سیگنال $y(t)$ را می‌توان بر اساس تبدیل موجک، به صورت مجموع سیگنال‌های مقیاس شده و انتقال یافته موجک مادر مطابق رابطه (۵-۱) نوشت.

$$y(t) = \sum_{L=1}^N X^L(t) = \sum_{L=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} d^L(n) \varphi\left(\frac{t-2^L nT}{2^L}\right) \quad (1-5)$$

در این رابطه $X^L(t)$ مقدار سیگنال در مقیاس (طبقه) 2^L می‌باشد. $d^L(n)$ ضرایب تبدیل موجک در مقیاس 2^L می‌باشد. $\varphi\left(\frac{t-2^L nT}{2^L}\right)$ موجک مادر مقیاس یافته و انتقال داده شده است.

مقدار انرژی هر طبقه از تبدیل موجک مطابق رابطه (۵-۲) محاسبه می‌گردد.

$$E^L = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N |X^L(i)|^2 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |d^L(2)|^2 \quad (2-5)$$

انرژی کل سیگنال طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N |y^l(t)|^2 = \sum_L E^L \quad (3-5)$$

درصد انرژی هر مقیاس نسبت به انرژی کل سیگنال برابر است با:

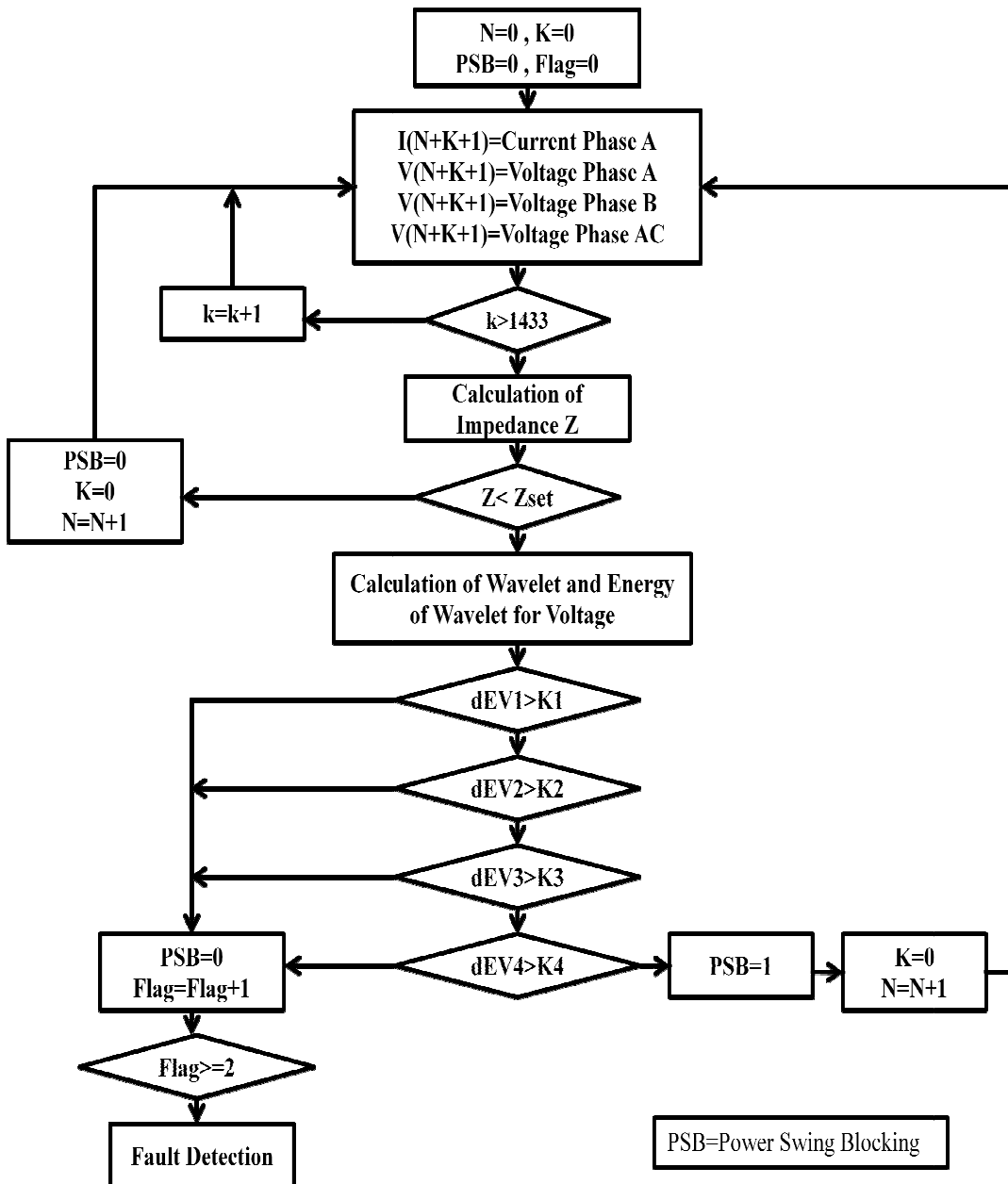
$$D^L = 100 \frac{E^L}{E} \quad (4-5)$$

مقدار انرژی مقیاس‌های پایین (فرکانس‌های بالا) ولتاژ در یک خط هنگامی که خط در آن رخ می‌دهد نسبت به شرایط نوسان توان مقدار قابل توجهی می‌گیرد. در این روش در هر نیم سیکل، یک بار از ولتاژ تمام فازها تبدیل Wavelet گرفته می‌شود و به ۱۰ طبقه^۱ تقسیم‌بندی می‌شوند. سپس با استفاده طبقات ۱ و ۲ و ۳ و ۴ (D1, D2, D3, D4) تبدیل موجک ولتاژ که حاوی محتویات فرکانس بالای سیگنال است، جهت تشخیص وقوع خط استفاده می‌شود.

پس در این الگوریتم به این صورت عمل می‌شود که محاسبات برای تشخیص نوسان توان هر سیکل ۲ بار صورت می‌گیرد. پنجره‌ای که برای تشخیص استفاده می‌شود یک پنجره ۲ سیکلی است. تبدیل Wavelet روی ولتاژ تمام فازها در پنجره ذکر شده اعمال می‌شود و انرژی سیگنال در هر طبقه با استفاده از رابطه (۴-۵) محاسبه و برای زمان‌های مختلف ذخیره می‌گردد. اگر در دو تکرار متوالی الگوریتم، امپدانس اندازه‌گیری شده از حد تعیین شده کمتر باشد و تغییر انرژی یکی از طبقات ۱، ۲، ۳ و ۴ بیشتر از مقادیر تعیین شده باشد، الگوریتم این شرایط را خط تشخیص می‌دهد. در حالتی که امپدانس اندازه‌گیری شده از حد تعیین شده کمتر باشد و اما انرژی هیچ یک از طبقات ۱، ۲، ۳ و ۴ از مقادیر حدی آنها تجاوز نکند الگوریتم این شرایط را نوسان توان تشخیص می‌دهد.

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.

¹ Level



شکل (۵-۱): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

با توجه به توضیحات تبدیل موجک که در فصل ۴ آمده است، فرکانس مرکزی هر باند

فرکانسی طبق رابطه (۵-۵) بدست می‌آید.

$$f_c^L = \frac{f_\phi \times f_s}{2^L} \quad (۵-۵)$$

که در این رابطه f_c^L فرکانس مرکزی طبقه L ام را نشان می‌دهد. f_ϕ فرکانس موجک مادر

است. این فرکانس بر اساس نوع موجک انتخاب می‌شود. با توجه به اینکه موجک دابیز^۱ مرتبه چهار (db4) دارای عملکرد خوبی در آنالیز گذرا و دینامیکی سیستم قدرت می‌باشد [۱۸] و [۲۳] و [۲۴]، در روش پیشنهادی از این نوع موجک به عنوان موجک مادر^۲ استفاده شده است. فرکانس موجک مادر این خانواده از موجک‌ها برابر با ۰/۷۱۳۴ می‌باشد. f_s فرکانس نمونه برداری سیگنال است.

نمونه برداری سیگنال باید با نرخ انجام شود که تعداد طبقات موجک، سیگنال را از نظر فرکانسی به صورت مناسبی تفکیک کند. اگر هر پنجره زمانی دارای N نمونه باشد در نتیجه حداکثر تعداد طبقات برابر با $\log_2 N$ می‌باشد که فرکانس مرکزی هر یک از این طبقات از رابطه (۵-۵) بدست می‌آید. در شبیه‌سازی‌های انجام شده طول هر پنجره زمانی دو سیکل در نظر گرفته شده است و سیگنال با فرکانس ۴۳ کیلو هرتز نمونه برداری شده است. در نتیجه تعداد نمونه‌ها در هر پنجره زمانی برابر با ۱۴۳۳ می‌باشد و همچنین فرکانس مرکزی سطح ۹ برابر با فرکانس ۶۰ هرتز می‌باشد. جدول (۱-۵) فرکانس مرکزی طبقات مختلف تبدیل موجک را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۵): طبقات Wavelet برای فرکانس نمونه برداری ۴۳ کیلوهرتز

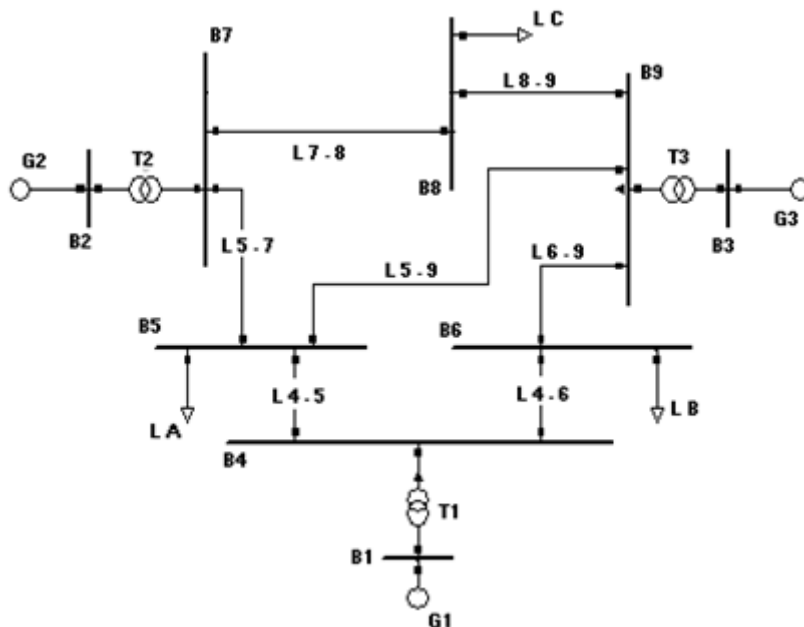
| Wavelet Level | Center Frequency (Hz) |
|---------------|-----------------------|
| d1 | 15263 |
| d2 | 7631 |
| d3 | 3816 |
| d4 | 1908 |
| d5 | 954 |
| d6 | 477 |
| d7 | 238 |
| d8 | 119 |
| d9 | 60 |
| d10 | 30 |

¹ Daubechies Wavelet

² Mother Wavlet

۵-۲- بررسی روش ارائه شده با استفاده از شبکه ۹ باس IEEE

در این بخش با استفاده از سیستم سه ماشین نشان داده شده در شکل (۵-۲) به بررسی روش پیشنهادی پرداخته شده است. از آنجا که این شبکه ۳ ژنراتور دارد و خطوط ارتباطی پیوستگی زیادی در شبکه ایجاد کرده است، می‌تواند مدل کننده شبکه‌های با نوسانات بین ناحیه‌ای نیز باشد. همان طور که دیده می‌شود این شبکه ۳ ژنراتور، ۳ بار، ۳ ترانسفورماتور و ۹ شینه دارد. مشخصات این شبکه در پیوست آورده شده است.

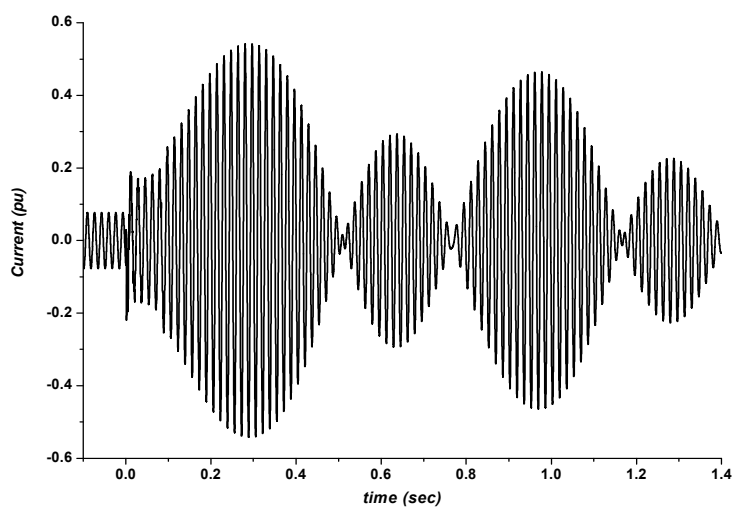


شکل (۵-۲): شبکه سه ماشین (۹ باس IEEE)

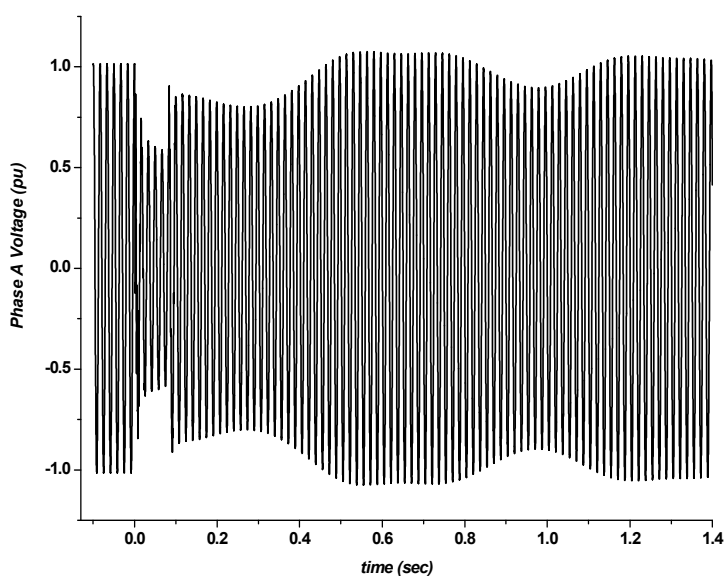
مطالعات بر روی خط L4-6 انجام شده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی برای حالت‌های مختلف آورده شده است.

۵-۲-۱- حالت اول

در حالت اول خطای سه فازی در خط L5-7 در لحظه صفر رخ می‌دهد. این خطا با باز شدن کلیدهای دوسر خط L5-7 در لحظه ۸۰ میلی ثانیه برطرف می‌شود. با خروج این خط شبکه شروع به نوسان می‌کند. شکل موج‌های جریان و ولتاژ خط L4-6 به ترتیب در شکل‌های (۵-۳) و (۵-۴) نمایش داده شده است.

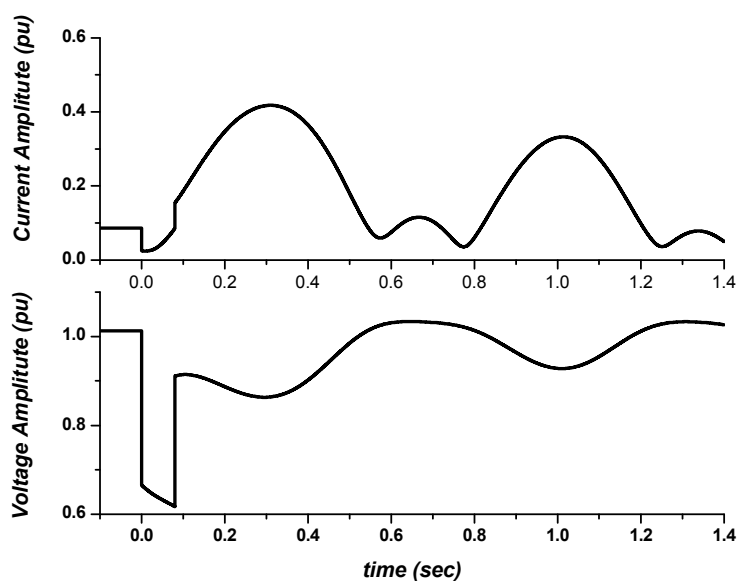


شکل (۳-۵): جریان خط L4-6 در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت اول شبیه‌سازی

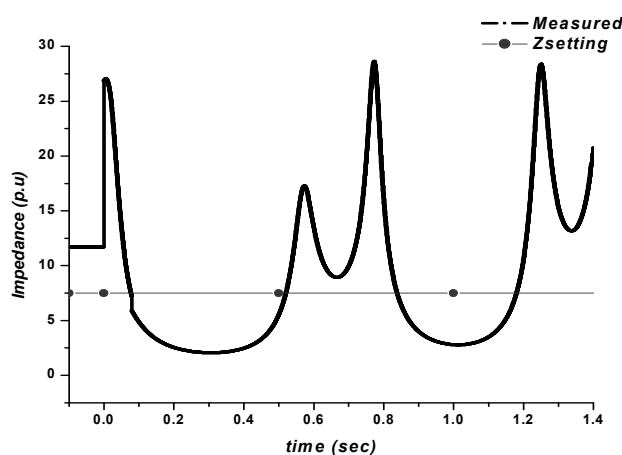


شکل (۴-۵): ولتاژ باس ۶ در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت اول شبیه‌سازی

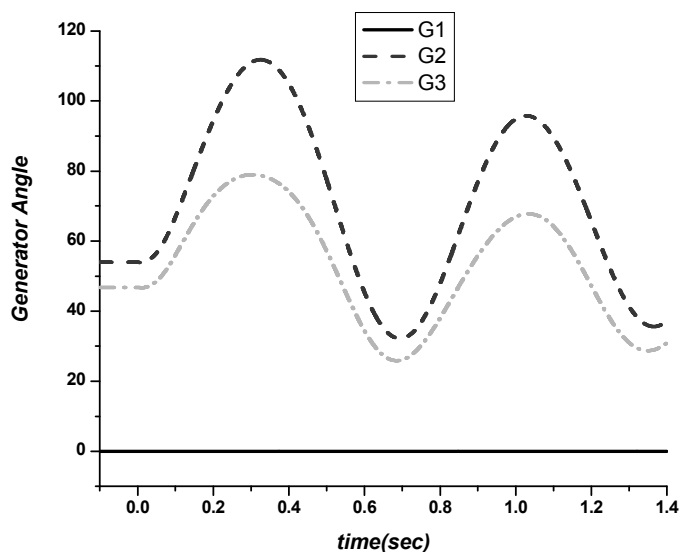
شکل (۵-۵) دامنه‌ی جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در شین ۶ جهت حفاظت خط L4-6 را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است بعد از وقوع خطا در خط L5-7 و رفع آن، شبکه شروع به نوسان می‌کند.



شکل (۵-۵): دامنه جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی در زمانی که جریان به حداکثر خود می‌رسد، ولتاژ به کمترین مقدار خود می‌رسد. در این شرایط اندازه امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله دیستانس قرار گرفته در باس ۶ شبکه در کمترین مقدار خود است. شکل (۵-۶) امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است امپدانس در حین نوسان از مقدار حدی تعیین شده جهت تشخیص خطا عبور می‌کند (این مقدار حدی با توجه به ناحیه‌های حفاظتی رله دیستانس و ناحیه بار تعیین می‌شود). همچنین در شکل (۵-۷) منحنی نوسان زاویه ژنراتورها نسبت به هم رسم شده است.

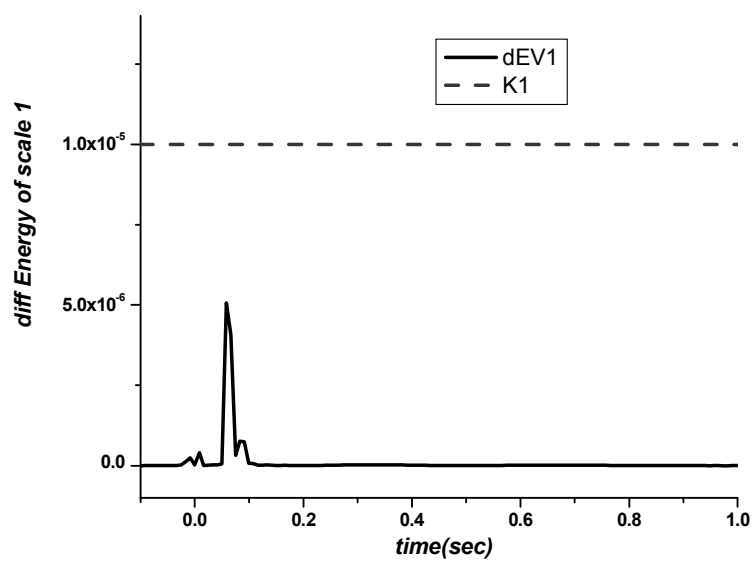


شکل (۵-۶): اندازه‌ی امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی

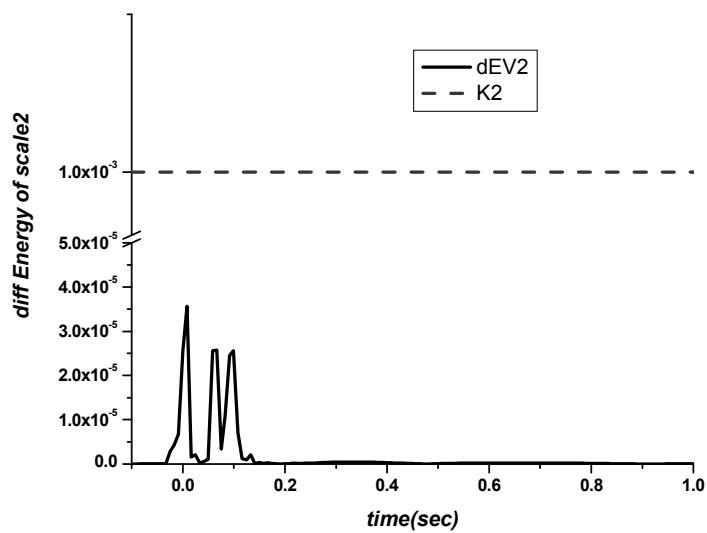


شکل (۷-۵): منحنی نوسان زاویه ژنراتورها

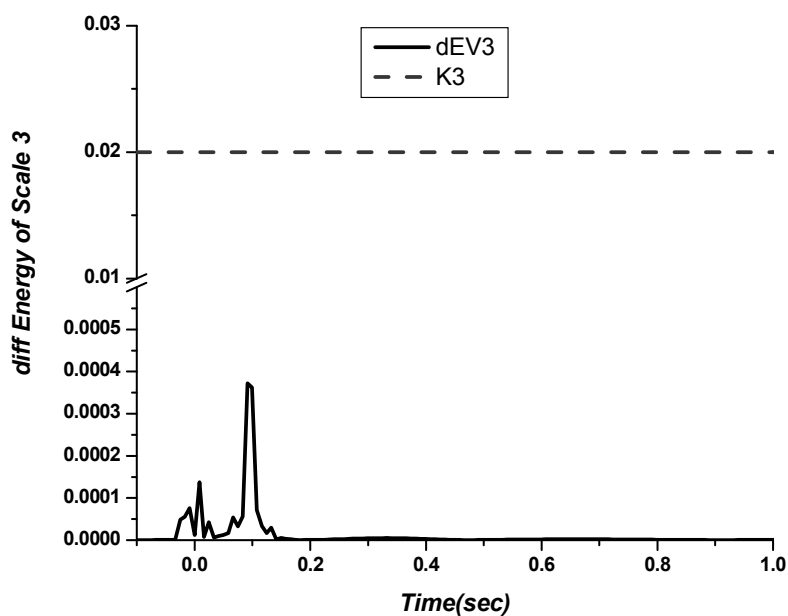
در این شرایط دو اتفاق ممکن است افتاده باشد، یا نوسان توان رخ داده است یا خطا باعث کاهش امپدانس اندازه‌گیری شده گردیده است. در این حالت الگوریتم با مقایسه مقدار انرژی طبقات ۱، ۲، ۳ و ۴ ولتاژ در مورد نوسان توان و خطا تصمیم‌گیری می‌کند. شکل (۵-۸) تا شکل (۵-۱۱) مقدار انرژی طبقات فرکانس بالای ولتاژ را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود با خروج خط L5-7 و آغاز نوسان در خط L4-6 انرژی طبقات ۱، ۲، ۳ و ۴ ولتاژ با ۶ از مقدار حدی تعیین شده تجاوز نمی‌کند. در نتیجه الگوریتم این حالت را نوسان تشخیص می‌دهد و همان طور که در شکل (۵-۱۲) نمایش داده شده است سیگنال PSB برای مدتی که امپدانس اندازه‌گیری شده از مقدار حدی کوچکتر است، فعال می‌گردد و رله بلاک می‌شود.



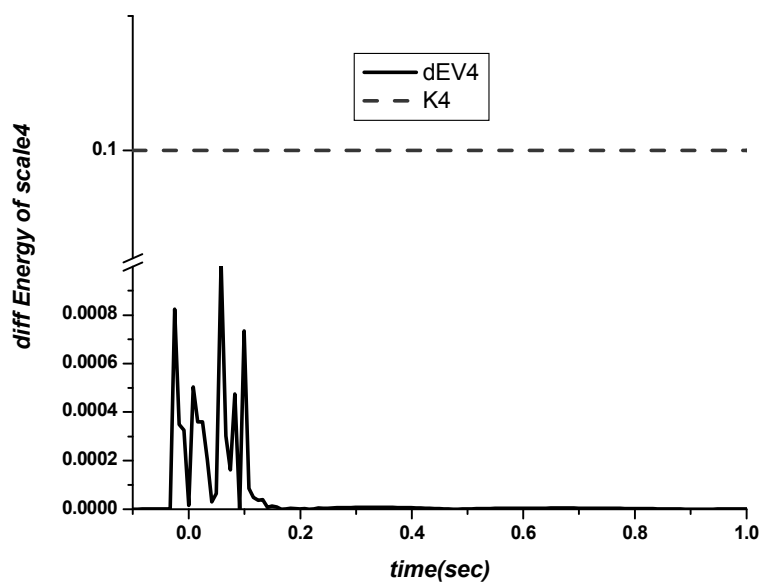
شکل (۸-۵): انرژی طبقه ۱ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی



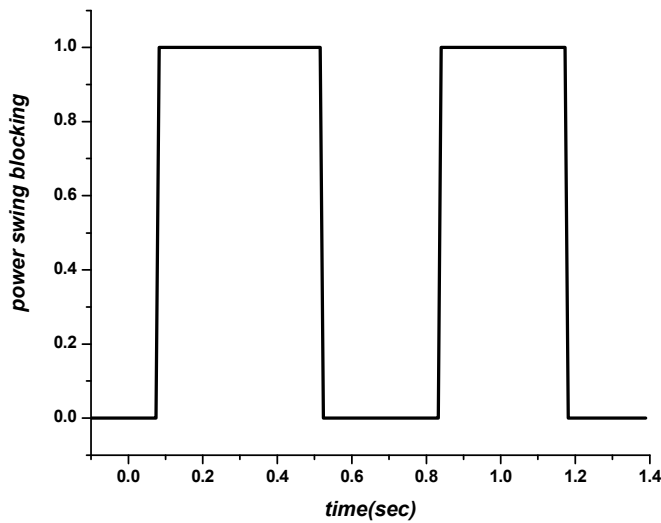
شکل (۹-۵): انرژی طبقه ۲ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی



شکل(۵-۱۰): انرژی طبقه ۳ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی



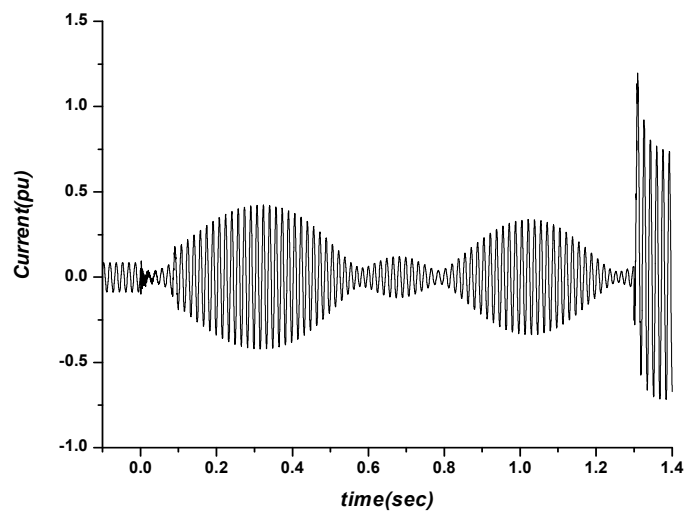
شکل(۵-۱۱): انرژی طبقه ۴ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت اول شبیه‌سازی



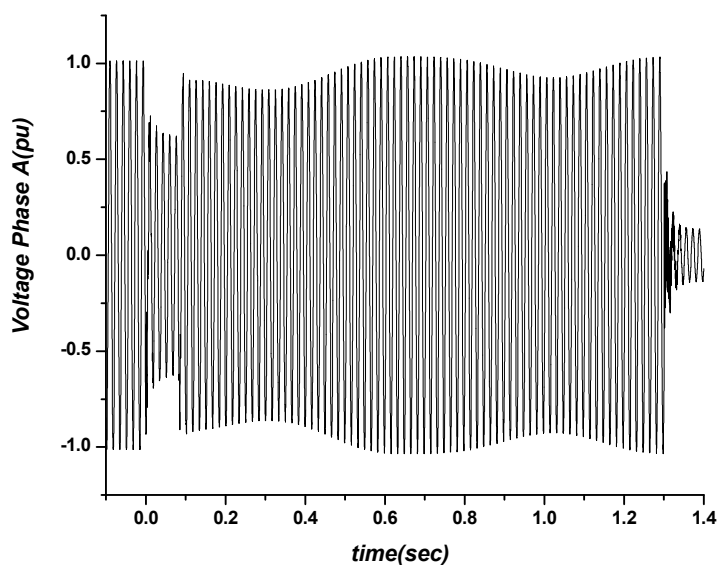
شکل (۵-۱۲): سیگنال PSB برای حالت اول شبیه‌سازی

۵-۲-۲-حالت دوم

در حالت دوم خطای سه فازی در لحظه صفر در ۵۰ درصد خط L5-7 اتفاق می‌افتد. پس از ۸۰ میلی ثانیه با باز شدن کلیدهای دو سر این خط، خطا پاکسازی می‌گردد. بعد از رفع خطا شبکه شروع به نوسان می‌کند. در حین نوسان در لحظه ۱/۳ ثانیه خطای سه فازی روی ۵۰ درصد خط L4-6 اتفاق می‌افتد. شکل (۵-۱۳) جریان خط L4-6 را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵-۱۴) ولتاژ باس ۶ نشان داده شده است.



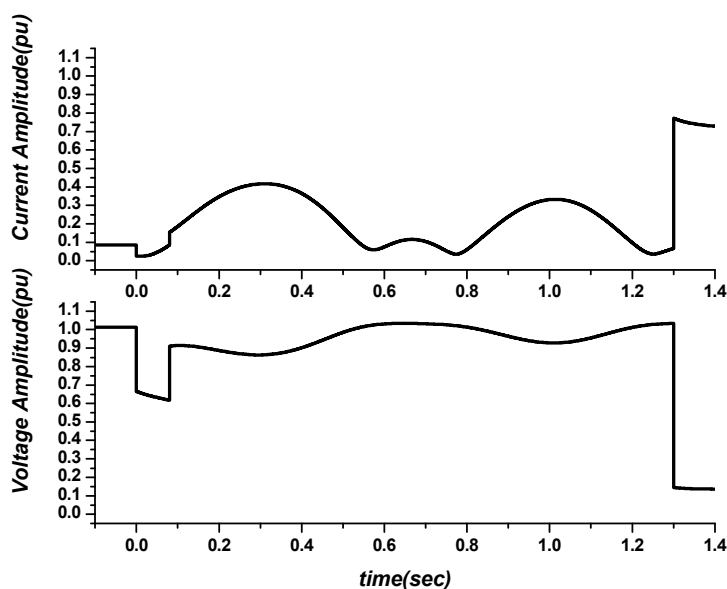
شکل (۵-۱۳): جریان خط L4-6 در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت دوم شبیه‌سازی



شکل (۵-۱۴): ولتاژ باس ۶ در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت دوم شبیه‌سازی

شکل (۵-۱۵) دامنه‌ی جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در شین ۶ جهت

حفاظت خط L4-6 را نشان می‌دهد.

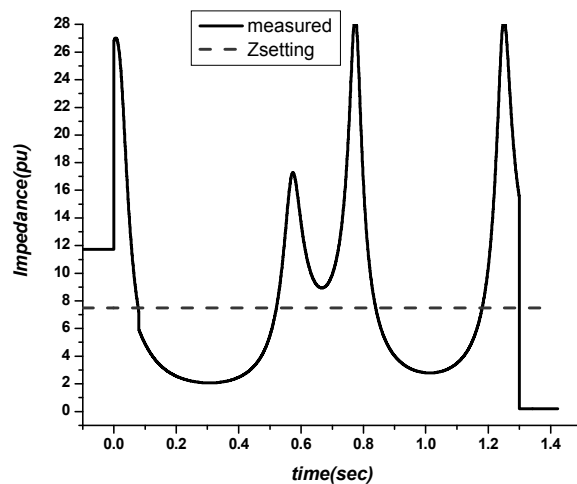


شکل (۵-۱۵): دامنه جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی

شکل (۵-۱۶) امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نشان داده

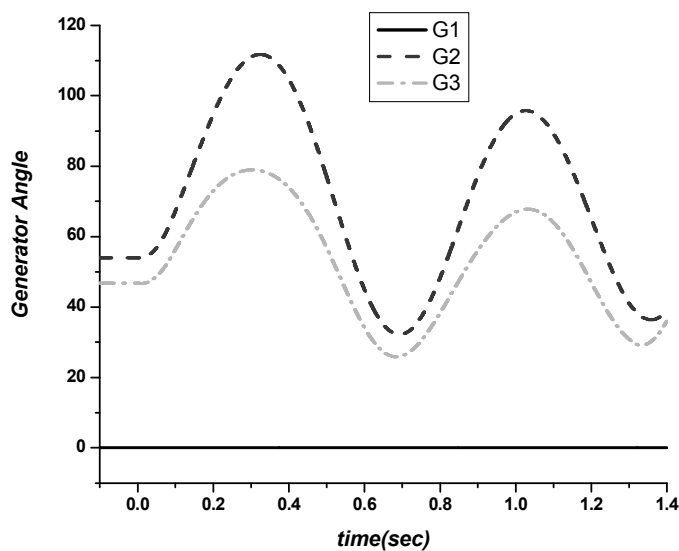
شده است امپدانس در حین نوسان از مقدار حدی تعیین شده جهت تشخیص خطا سه بار عبور می‌-

کند که دو بار آن به دلیل وقوع نوسان توان و یک بار آن به دلیل وقوع خطا می‌باشد. همچنین در شکل (۵-۱۷) منحنی نوسان زاویه ژنراتورها نسبت به هم رسم شده است.



شکل (۵-۱۶): اندازه‌ی امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت دوم

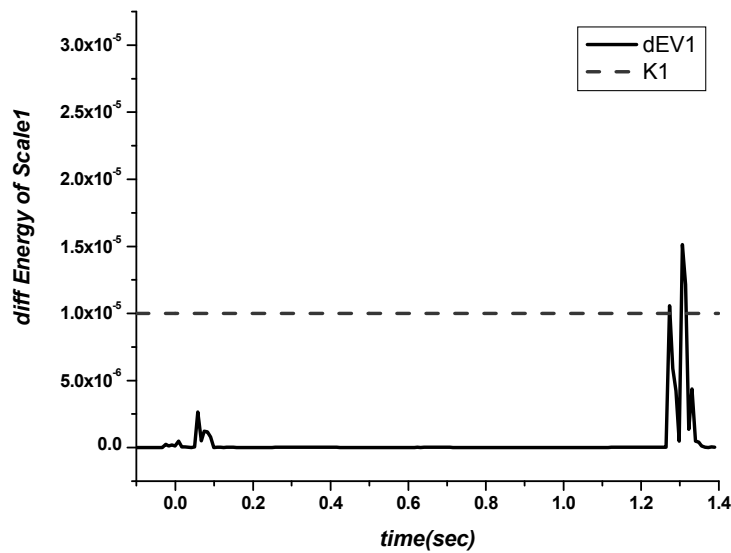
شبیه‌سازی



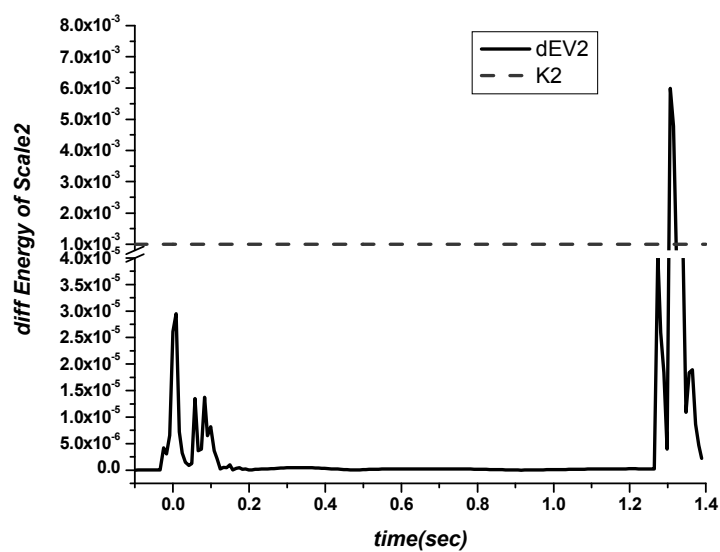
شکل (۵-۱۷): منحنی نوسان زاویه ژنراتورها

شکل (۵-۱۸) تا شکل (۵-۲۱) مقدار انرژی طبقات فرکانس بالای ولتاژ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با خروج خط L5-7 و آغاز نوسان در خط L4-6 انرژی طبقات ۱، ۲، ۳ و ۴

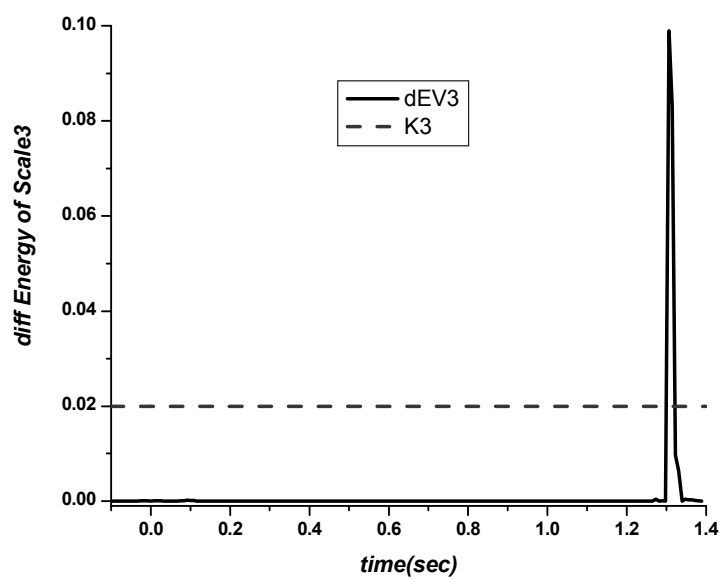
ولتاژ باس ۶ مقدار چندانی ندارد. در نتیجه الگوریتم این حالت را نوسان تشخیص می‌دهد و همان طور که در شکل (۵-۲۲) نمایش داده شده است سیگنال PSB برای مدتی که امپدانس اندازه‌گیری شده از مقدار حدی کوچکتر است، فعال می‌گردد و رله بلاک می‌شود اما در لحظه ۱/۳ ثانیه با وقوع خطا انرژی طبقات ۱، ۲، ۳ و ۴ ولتاژ باس ۶ افزایش می‌یابد به طوری که از میزان تنظیم شده جهت تشخیص خطا بیشتر می‌شود در نتیجه سیگنال PSB همان طور که در شکل (۵-۲۲) نمایش داده شده است به درستی غیر فعال می‌شود.



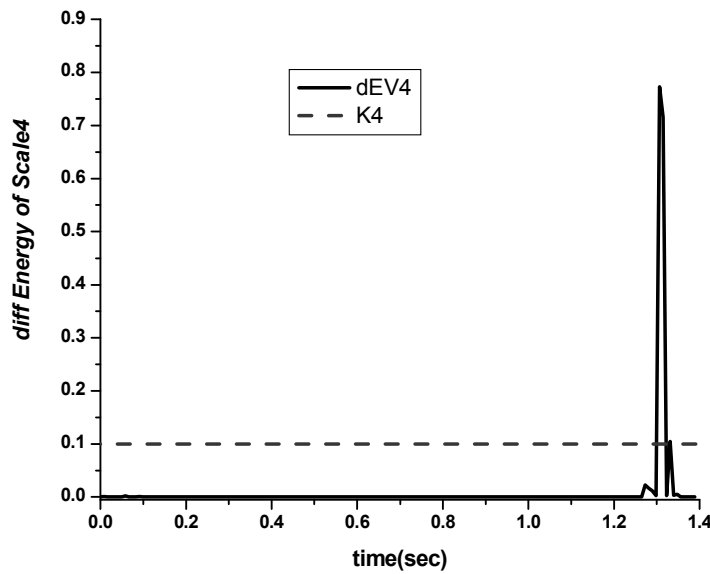
شکل (۵-۱۸): انرژی طبقه ۱ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی



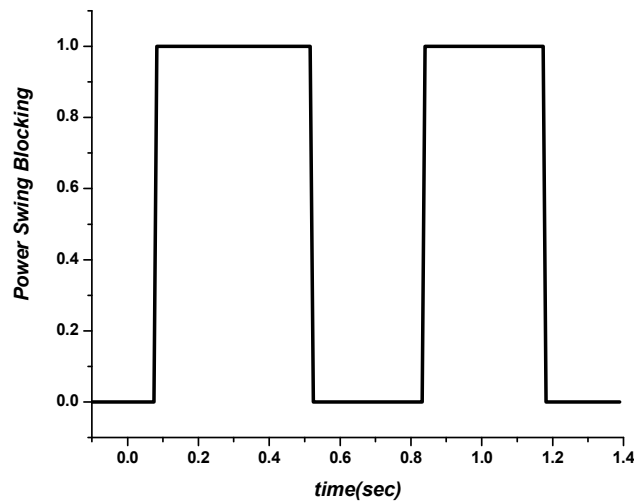
شکل (۵-۱۹): انرژی طبقه ۲ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی



شکل (۵-۲۰): انرژی طبقه ۳ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی



شکل (۵-۲۱): انرژی طبقه ۴ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت دوم شبیه‌سازی

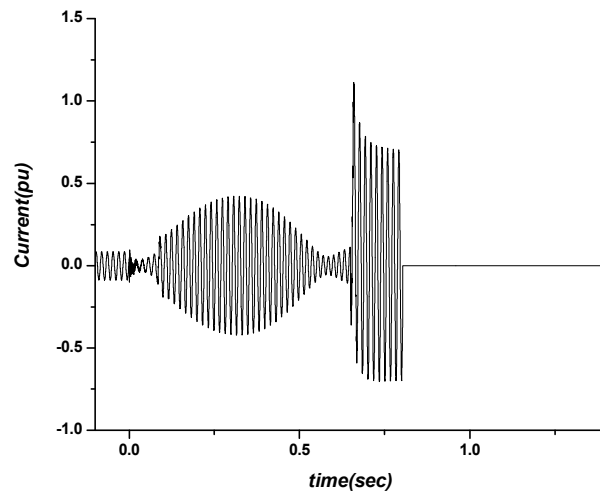


شکل (۵-۲۲): سیگنال PSB برای حالت دوم شبیه‌سازی

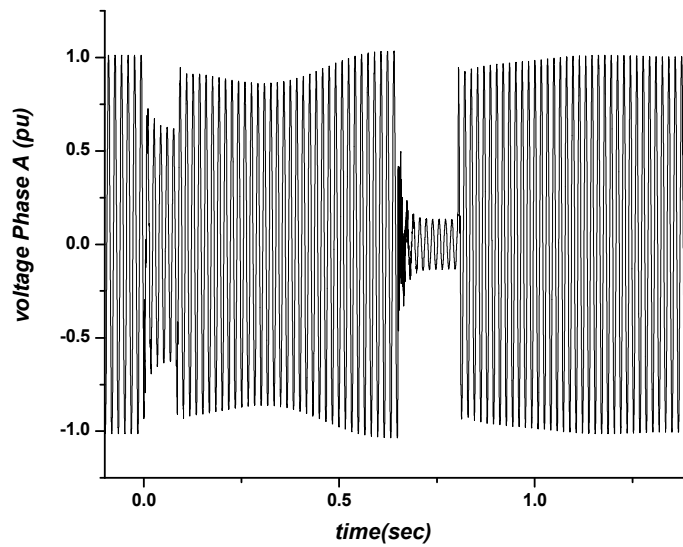
۵-۲-۳-حالت سوم

در حالت سوم خطای سه فاز در لحظه صفر در ۴۰ درصد خط L7-8 اتفاق می‌افتد. پس از ۸۰ میلی ثانیه با باز شدن کلیدهای دو سر این خط، خطا پاک‌سازی می‌گردد. بعد از رفع خطا شبکه شروع به نوسان می‌کند. در حین نوسان در لحظه ۰/۶۵ ثانیه خطای سه‌فازی روی ۴۰ درصد خطا L4-6 اتفاق می‌افتد. شکل (۵-۲۳) جریان خط L4-6 را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵-۲۴)

ولتاژ باس ۶ نشان داده شده است.



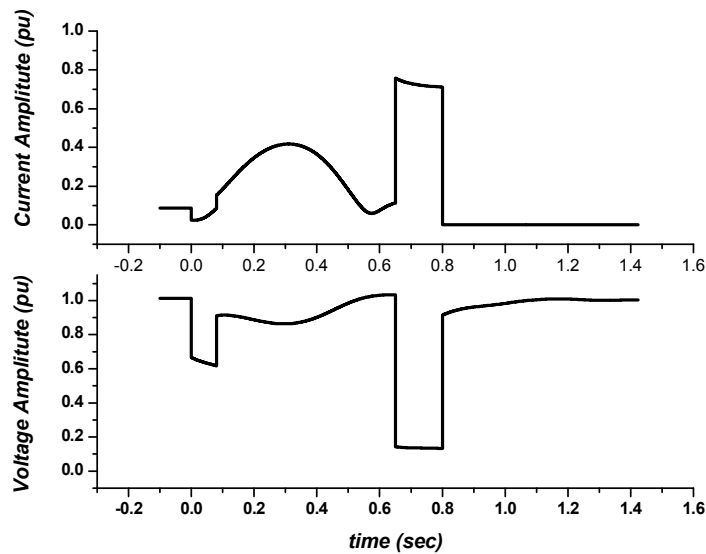
شکل (۲۳-۵): جریان خط L4-6 در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت سوم شبیه‌سازی



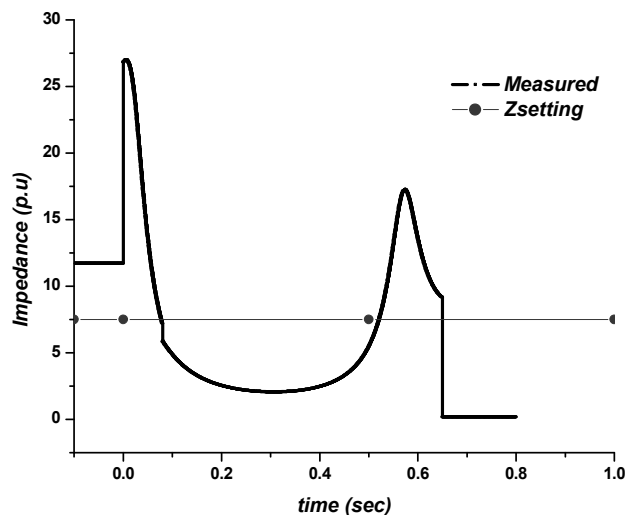
شکل (۲۴-۵): ولتاژ باس ۶ در حین نوسانی شدن شبکه برای حالت سوم شبیه‌سازی

شکل (۲۵-۵) دامنه‌ی جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ جهت

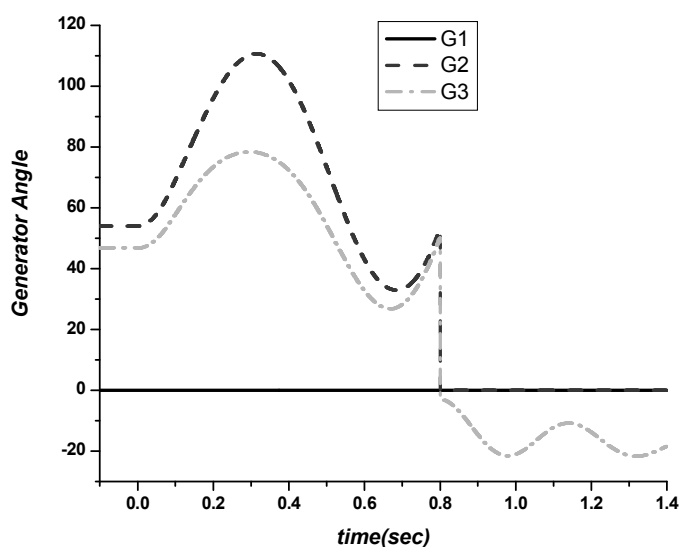
حفاظت خط L4-6 را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۵): دامنه جریان و ولتاژ اندازه گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت سوم شبیه سازی
 شکل (۵-۲۶) امپدانس اندازه گیری شده توسط رله را نشان می دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده است امپدانس در حین نوسان از مقدار حدی تعیین شده جهت تشخیص خطا دو بار عبور می کند که یک بار آن به دلیل وقوع نوسان توان و یک بار آن به دلیل وقوع خطا می باشد. همچنین در شکل (۵-۲۷) منحنی نوسان زاویه ژنراتورها نسبت به هم رسم شده است.

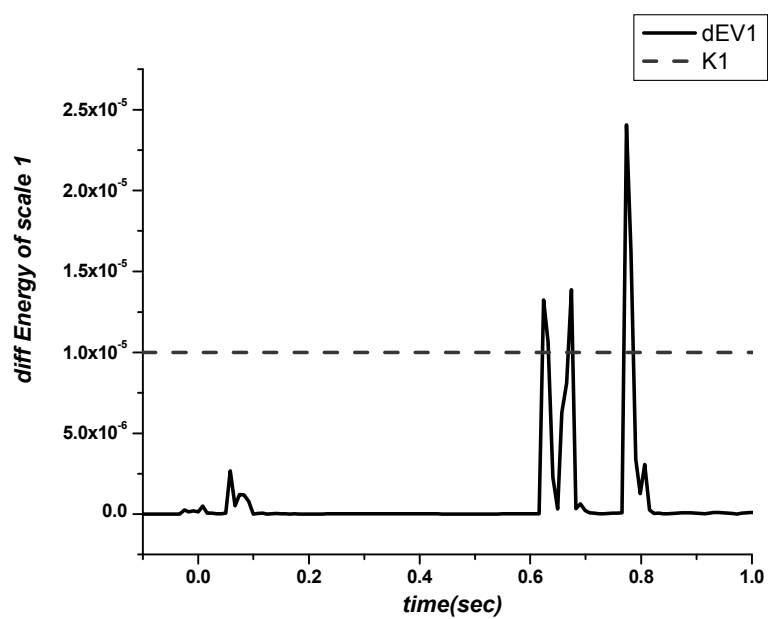


شکل (۵-۲۶): اندازه ی امپدانس اندازه گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت سوم شبیه سازی

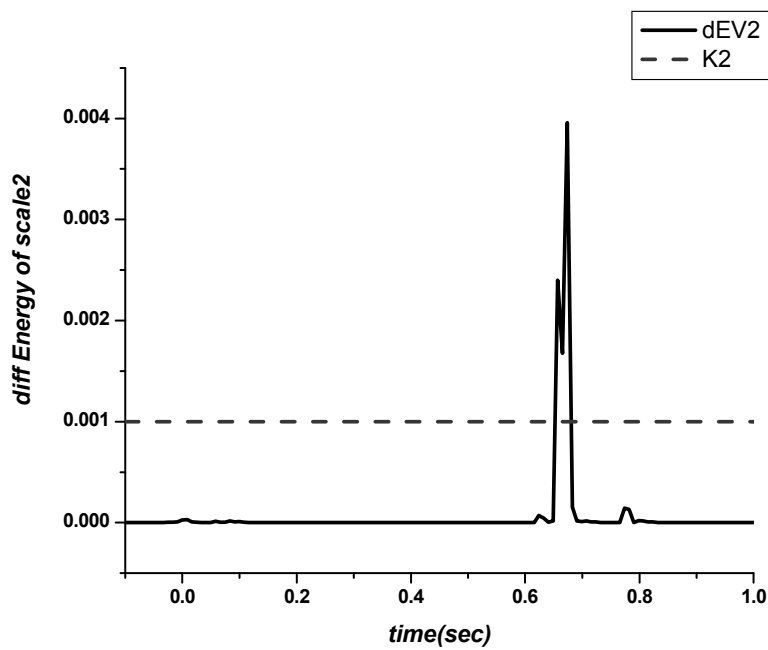


شکل(۵-۲۷): منحنی نوسان زاویه ژنراتورها

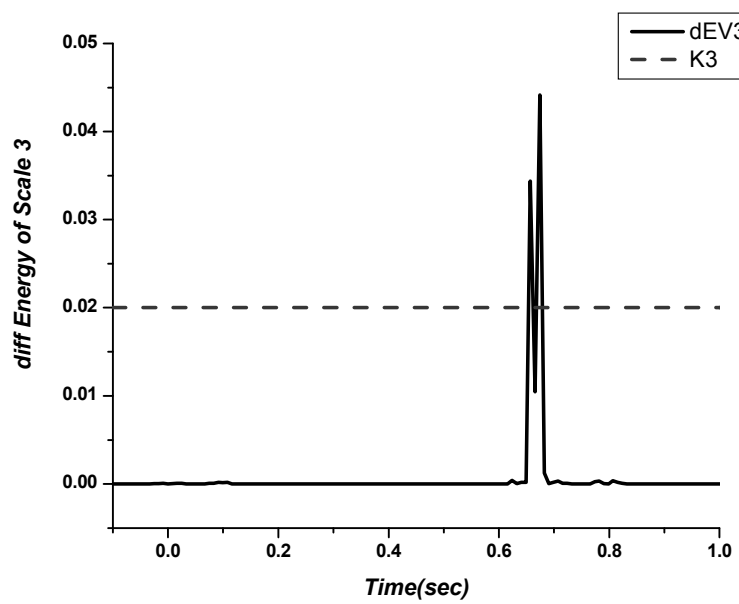
شکل(۵-۲۸) تا شکل(۵-۳۱) مقدار انرژی طبقات فرکانس بالای ولتاژ را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل دیده می‌شود با خروج خط L7-8 و آغاز نوسان در خط L4-6 انرژی طبقات ۱، ۲، ۳ و ۴ ولتاژ باس ۶ مقدار چندانی ندارد. در نتیجه الگوریتم این حالت را نوسان تشخیص می‌دهد و همان طور که در شکل(۵-۳۲) نمایش داده شده است سیگنال PSB برای مدتی که امپدانس اندازه‌گیری شده از مقدار حدی کوچکتر است، فعال می‌گردد و رله بلاک می‌شود. اما در لحظه ۰/۶۵ ثانیه با وقوع خطا انرژی طبقات ۱، ۲، ۳ و ۴ ولتاژ باس ۶ افزایش می‌یابد به طوری که از میزان تنظیم شده جهت تشخیص خطا بیشتر می‌شود در نتیجه سیگنال PSB همان طور که در شکل(۵-۳۲) نمایش داده شده است به درستی غیر فعال می‌باشد.



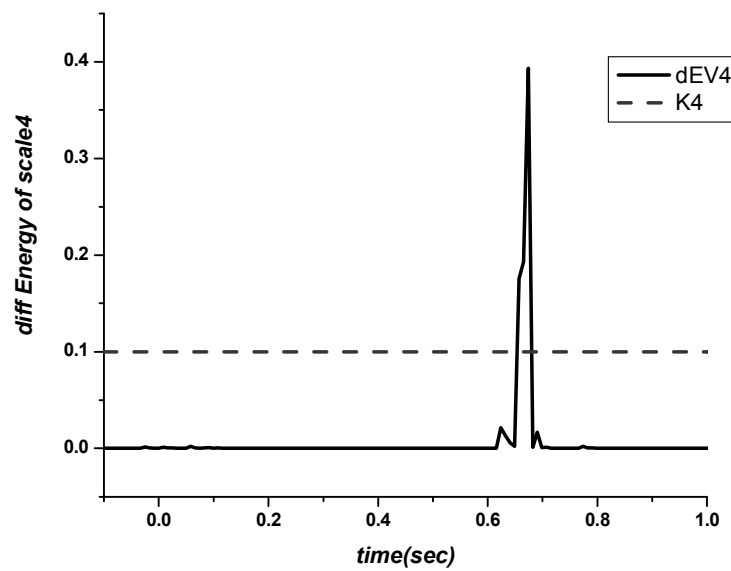
شکل(۵-۲۸): انرژی طبقه ۱ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی



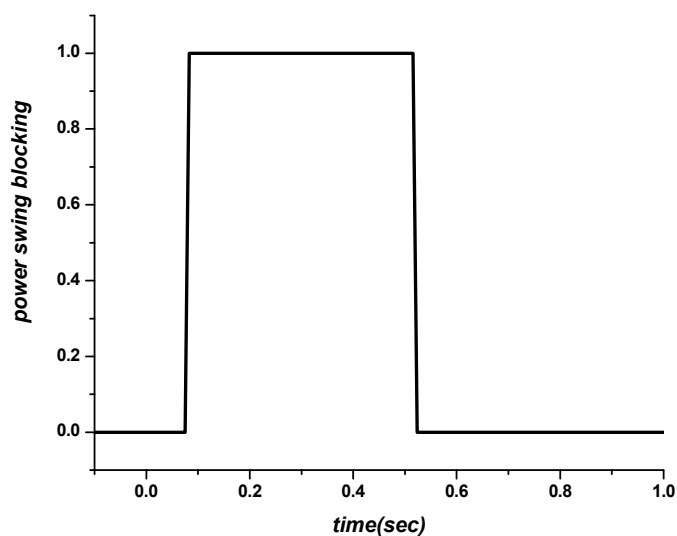
شکل(۵-۲۹): انرژی طبقه ۲ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی



شکل (۳۰-۵): انرژی طبقه ۳ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی



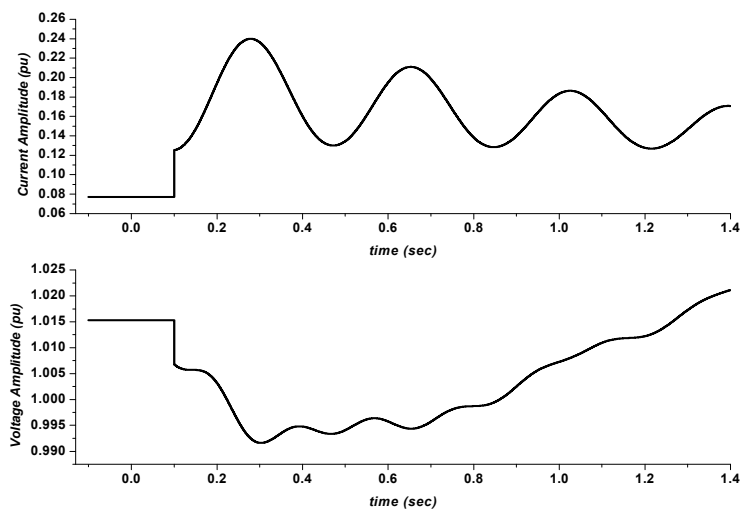
شکل (۳۱-۵): انرژی طبقه ۴ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت سوم شبیه‌سازی



شکل (۳۲-۵): سیگنال PSB برای حالت سوم شبیه‌سازی

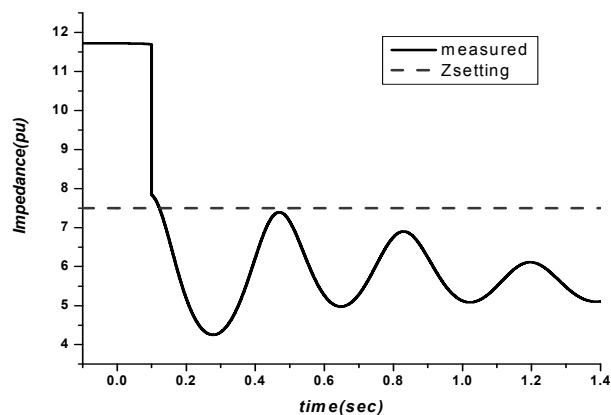
۵-۲-۴- حالت چهارم

در حالت چهارم ژنراتور G2 در زمان ۱۰۰ میلی ثانیه از شبکه خارج می‌شود. با خروج این ژنراتور تعادل بین تولید و مصرف در شبکه بر هم می‌خورد. در نتیجه شبکه شروع به نوسان می‌کند. دامنه‌های جریان خط L4-6 و ولتاژ باس ۶ به ترتیب در شکل (۳۳-۵) نمایش داده شده است.

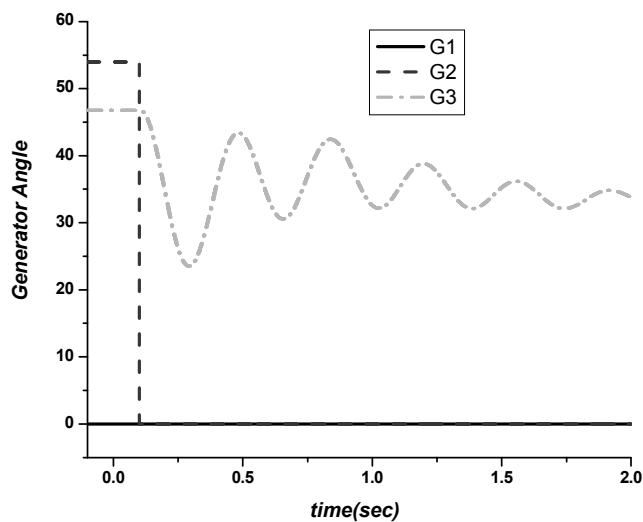


شکل (۳۳-۵): دامنه جریان و ولتاژ اندازه گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی‌ها

شکل (۳۴-۵) امیدانس اندازه‌گیری شده توسط رله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است امیدانس در حین نوسان از مقدار حدی تعیین شده جهت تشخیص خطا عبور می‌کند. همچنین در شکل (۳۵-۵) منحنی نوسان زاویه ژنراتورها نسبت به هم رسم شده است.



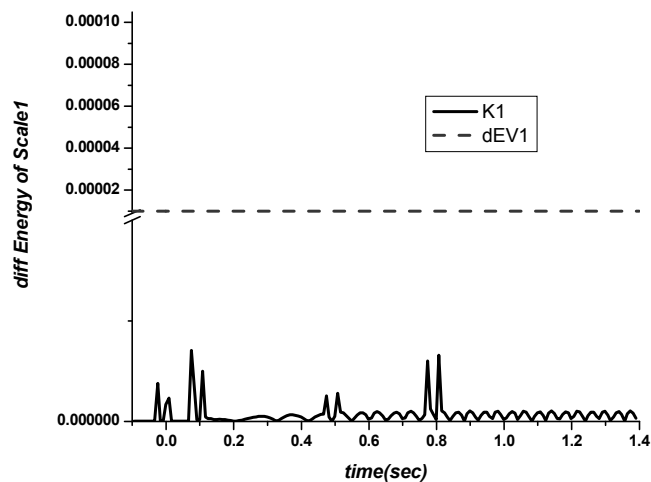
شکل (۳۴-۵): اندازه‌ی امیدانس اندازه‌گیری شده توسط رله قرار گرفته در باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی



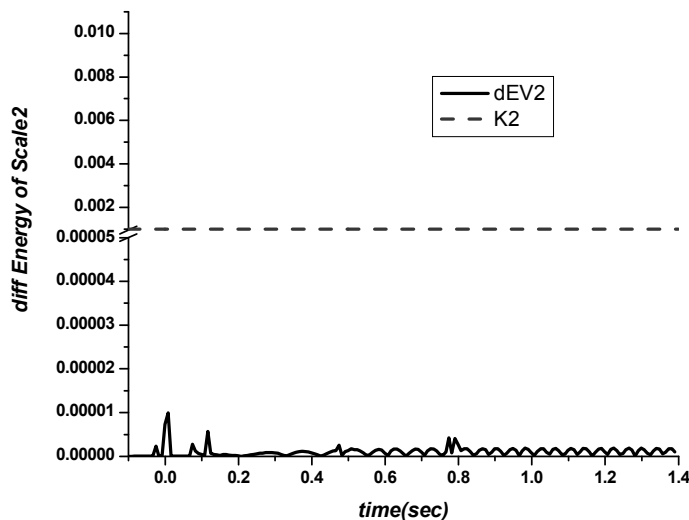
شکل (۳۵-۵): منحنی نوسان زاویه ژنراتورها

شکل (۳۶-۵) تا شکل (۳۹-۵) مقدار انرژی طبقات فرکانس بالای ولتاژ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود باخروج ژنراتور G2 و آغاز نوسان در خط L4-6 انرژی طبقات ۱، ۲، ۳ و

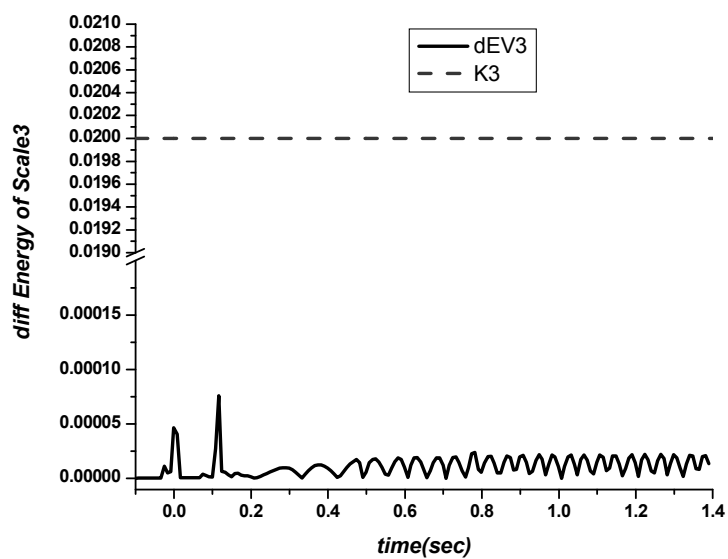
۴ ولتاژ باس ۶ از مقدار حدی تعیین شده تجاوز نمی‌کند. در نتیجه الگوریتم این حالت را نوسان توان تشخیص می‌دهد و همان‌طور که در شکل (۵-۴۰) نمایش داده شده است سیگنال PSB برای مدتی که امپدانس اندازه‌گیری شده از مقدار حدی کوچکتر است، فعال می‌گردد و رله بلاک می‌شود.



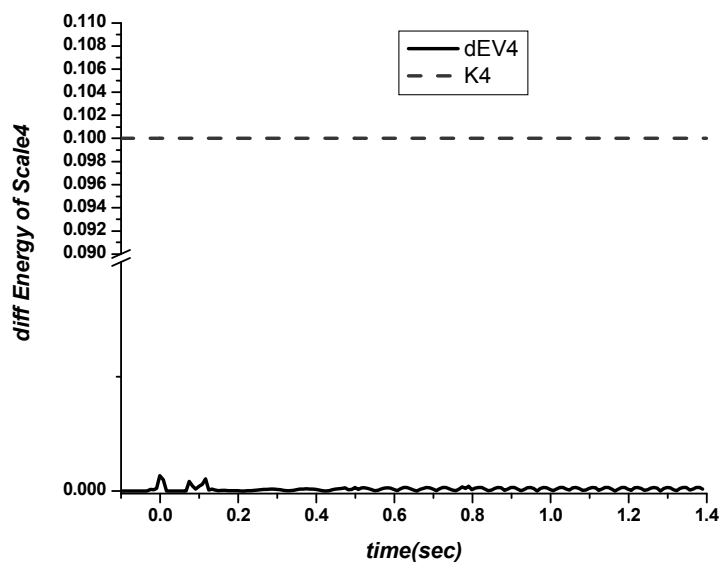
شکل (۵-۳۶): انرژی طبقه ۱ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی



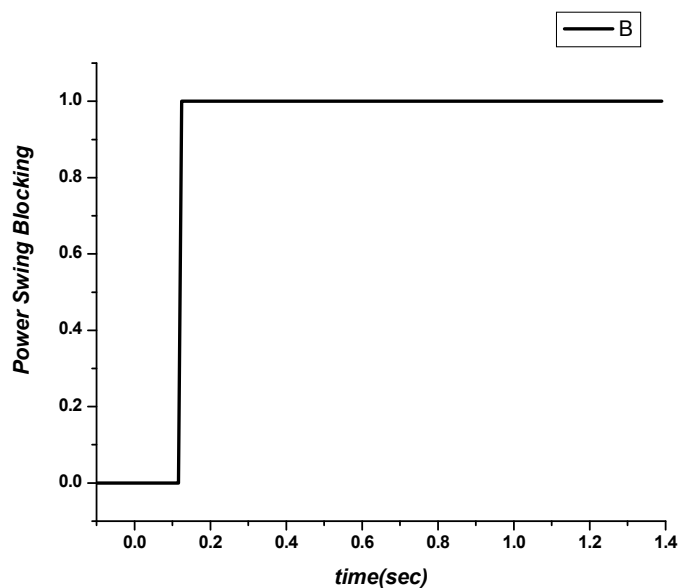
شکل (۵-۳۷): انرژی طبقه ۲ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی



شکل (۳۸-۵): انرژی طبقه ۳ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی



شکل (۳۹-۵): انرژی طبقه ۴ تبدیل WT ولتاژ باس ۶ برای حالت چهارم شبیه‌سازی



شکل (۵-۴۰): سیگنال PSB برای حالت چهارم شبیه‌سازی

۵-۳- جمع بندی

در این فصل ابتدا تئوری و الگوریتم استفاده شده جهت تشخیص پدیده نوسان توان به کمک تبدیل موجک شرح داده شد. سپس نتایج شبیه‌سازی بررسی شد که همان‌طور که ملاحظه شد این روش به درستی پدیده نوسان توان و خطا را در شرایط مختلف از یکدیگر متمایز می‌کند. در این روش با توجه به این که در هر سیکل محاسبات دو بار انجام می‌شود سرعت تشخیص نوسان توان و خطا نسبت به روش‌های معمول بیشتر است. و همچنین این روش به هیچ کدام از پارامترهای شبکه وابسته نیست و این مزیت دیگر این روش بر روش‌های دیگر است.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در هر شبکه به هم پیوسته‌ای، که در آن عناصر چرخانی مانند ژنراتورها توسط خطوط انتقال نیرو به یکدیگر متصل شده اند، بروز هر گونه تغییر ناگهانی در توان انتقالی یا مصرفی می تواند تعادل قدرت الکتریکی و مکانیکی را بر هم زده و باعث ایجاد تغییرات و اعوجاجات در امواج انرژی الکتریکی و پارامترهای مختلف شبکه ناشی از نوسانات ژنراتورها نسبت به یکدیگر شود.

حفاظت خطوط انتقال نیرو در شبکه های قدرت توسط رله های دیستانس انجام می شود، از اینرو عملکرد صحیح رله های مذکور از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.

همانطور که در این پروژه مشاهده شد نوسان توان، پدیده ایست که توان بالقوه ای در ایجاد خطا در عملکرد رله های دیستانس دارد. دلیل این امر نوسان کمیت های ولتاژ و جریان و در نتیجه تغییر در مکان هندسی امپدانس دیده شده توسط رله می باشد. وقوع چندین خاموشی در ایران، و همچنین سایر کشورهای جهان، لزوم مطالعه در خصوص پدیده نوسان توان را آشکار می سازد.

همان طور که در فصل اول بیان شد روش های تشخیص نوسان توان به چند دسته تقسیم می - شوند. هر یک از این روش ها دارای مزایا و معایبی بودند که در مورد آنها صحبت شد. با توجه به اینکه روش های تشخیص نوسان توان بر اساس امپدانس اندازه گیری شده توسط رله در رله های امروزی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد، در اینجا به مقایسه روش پیشنهادی در این پایان نامه با روش مذکور پرداخته می شود.

روش های مبتنی بر تغییر امپدانس بر اساس اینکه نرخ تغییر امپدانس چه مقدار می باشد، نوسان توان را از خطا تمایز می کند. این روش ها نوسانات فرکانس پایین را به خوبی تشخیص می دهند اما قادر نیستند نوسانات فرکانس بالا را تشخیص دهند. همچنین در بعضی از خطاها مثل خطاهای امپدانس بالاممکن است به اشتباه عمل کند. یا اگر در حین نوسان توان خطایی سه فاز رخ دهد ممکن است الگوریتم نتواند آن را تشخیص دهد. اما الگوریتم پیشنهادی مستقل از سرعت نوسان توان می باشد. در این روش به محض اینکه امپدانس از یک حدی کمتر شود الگوریتم مقدار انرژی مؤلفه - های فرکانس بالای سیگنال ولتاژ را چک می کند. این مؤلفه ها نشان دهنده وجود خطا در ناحیه

حفاظتی می‌باشند. در نتیجه این الگوریتم مستقل از فرکانس نوسان توان می‌باشد. همچنین مشکل تشخیص خطا در حین بلاک شدن رله رفع شده است و در این الگوریتم وجود ندارد، به محض وقوع خطا که همرا با ایجاد حالت گذرای فرکانس بالا در سیستم می‌باشد، سیگنال تشخیص نوسان توان غیر فعال می‌گردد.

مشکل دیگر روش‌های مبتنی بر تغییر امیدانس تنظیم پارامترهای آنها می‌باشد. در بعضی از شبکه‌های پیچیده تنظیم این پارامترها مشکل یا در بعضی مورد غیر ممکن می‌باشد. در خطوط بلند ممکن است انتخاب ناحیه امیدانسی غیر ممکن باشد. از نقطه نظر بهره‌برداری در پیک بار ممکن است ناحیه بار به ناحیه‌های حفاظتی رله دیستانس نزدیک باشد و امکان تعریف مشخصه‌های نوسان توان وجود نداشته باشد. اما در روش پیشنهادی هر چقدر که ناحیه بار به ناحیه‌های حفاظتی رله دیستانس نزدیک باشد بر الگوریتم تاثیر ندارد. در خطوط بلند با بارگذاری سنگین می‌توان مقدار حدی امیدانس را برابر با مقدار امیدانس که ناحیه حفاظتی سوم رله دیستانس را نشان می‌دهد در نظر گرفت.

۶-۲- پیشنهادات

الف) با توجه به اینکه روش پیشنهادی در این پروژه جدید می‌باشد، لذا بررسی صحت آنها با نتایج عملی اولین پیشنهاد بدیهی به نظر می‌رسد.

ب) راجع به مسئله نوسان توان دو امر مهم وجود دارد. اول آن که در صورت بروز نوسان توان، این پدیده تشخیص داده شود. که در این تحقیق به آن پرداخته شد. دومین امر مرتبط با نوسان توان تشخیص پایدار بودن یا ناپایدار بودن آن است. در صورتی که ناپایداری نوسان توان تشخیص داده شود باید بلافاصله عملیات کنترلی جهت نجات شبکه انجام شود. این فصل می‌تواند با بررسی عملیات کنترلی جهت بازگرداندن شبکه به شرایط عادی تکمیل گردد.

ج) با توجه به اینکه استفاد از تبدیل موجک در سال‌های اخیر جهت آنالیز حالت‌های دینامیکی سیستم‌های قدرت پیشنهاد شده است به نظر می‌رسد که این روش هنوز در اول راه می‌باشد. لازم است عملکرد این تبدیل بیشتر بررسی گردد تا نقاط ضعف و قوت این روش بیشتر روشن شود.

د) همچنین بررسی این روش بر روی شبکه های دیگر و همچنین تاثیر پارامترهای مختلف شبکه بر عملکرد این روش ضروری به نظر می رسد.

مراجع

مراجع

- [1] Power Swing and Out of Step Considerations on Transmission Lines, A Report to the Power System Relaying Committee Of the IEEE Power Engineering Societ, July 2005.
- [۲] محمد چهرقانی بزچلویی، حفاظت گسترده سیستم قدرت در برابر نوسانات زاویه ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، زمستان ۱۳۸۵.
- [3] Prabha Kundur (Canada, Convener), John Paserba (USA, Secretary), Venkat Ajjarapu (USA), Göran Andersson (Switzerland), Anjan Bose (USA) , Claudio Canizares (Canada), Nikos Hatziargyriou (Greece), David Hill (Australia), Alex Stankovic (USA), Carson Taylor (USA), Thierry Van Cutsem (Belgium), and Vijay Vittal (USA), "Definition and Classification of Power System Stability", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004.
- [4] Siprotec/Numerical Protection Relays/Catalog SIP 2008/www.siemens.com.
- [5] Jan Machowski, W. Bialek, R. Bumby, "Power System Dynamics Stability and Control", John Wiley & Sons, 2nd Ed., 2008.
- [۶] ح.عسکریان، م.طالشیان، "حفاظت و رله ها"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۸۵.
- [7] Sanaye-Pasand M.; Jahromi A.N., Study, Comparison and Simulation of Power System Swing Detection and Prediction Methods, Power Engineering Society General Meeting, 2003 IEEE.
- [8] Joe Mooney; Normann Fischer, Application Guidelines for Power Swing Detection on Transmission Systems, Schweitzer Engineering Laboratories.
- [9] Yang, Lai, Zhang, Rajkumar, "Fault Identification during Power Swing with Symmetrical Components", International Conference on Energy Management and Power Delivery, EMPD, Vol. 1, 3-5 March 1998.

- [10] Khorashadi-Zade H, "Evaluation and Performance Comparison of Power Swing Detection Algorithms", Power engineering society general meeting, IEEE, 12-26 June 2005.
- [11] lumschein, Y. Yelgin, M. Kereit, Siemens AG, Energy Sector, "Proper detection and treatment of power swing to reduce the risk of Blackouts", DRPT2008 6-9 April 2008.
- [12] Y. Ohura, M. Suzuki, K. Yanagihashi, M. Yamaura M, K. Omata, T. Nakamura, S. Mitamura, H. Watanabe, "A Predictive Out-of-Step Protection System Based on Observation of the Phase Difference between Substations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, Issue 4, October 1990.
- [13] Michel Misiti, Yues Misiti, Geoges Oppenheim, Jean-Michel Poggi "Wavelet Toolbox For Use with MATLAB" , July 2002, version 2.2.
- [14] Burrus, M.S., Gopinath, R.A. and Guo, H., "Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms", Prentice Hall, 1998.
- [15] Meyer, Y. and Ryan, R.D., "Wavelets Algorithms & Applications", Society for Industrial and Applied Mathematics, 1993.
- [16] Cohen, I. Daubechies, B. Jawerth, P. Vial, Multiresolution analysis, "Wavelets and Fast Wavelet Transform on an Interval", CRAS Paris, Ser. A, t.316, pp.417-421, 1993.
- [17] Coifman, R.R., Y. Meyer, M.V. Wickerhauser, "Wavelet analysis and Signal Processing in Wavelets and their Applications", M.B. Ruskai et al. (Eds), pp. 153-178, Jones and Bartlet 1992.
- [18] Megahed, A.I.; Monem Moussa, A.; Elrefaie, H.B.; Marghany, Y.M. "Selection of a suitable mother wavelet for analyzing power system fault transients" Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, Volume , Issue , 20-24 July 2008.
- [19] A.I. Megahed; A.M. Moussa; A.E. Bayoumy "Usage of wavelet transform in the protection of series-compensated transmission lines" Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 21, Issue 3, July 2006.

- [20] Meliopoulos, A.P.S.; Chien-Hsing Lee “An alternative method for transient analysis via wavelets” Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 15, Issue 1, Jan 2000.
- [21] Mukerjee, R.N.; Tanggawelu, B.; Ariffin, A.E.; Basha, A. “Detection and identification of voltage disturbances via clustering and wavelets” Power System Technology, 2002. Proceedings. Power Con 2002. International Conference, on Volume 1, Issue, 13-17 Oct 2002.
- [22] Jun Liang; Zhihao Yun; Feifan Liu; Yutian Liu “A method of fault line detection in distribution systems based on wavelets” Power System Technology, 2002. Proceedings. Power Con 2002. International Conference, on Volume 4, Issue, 2002.

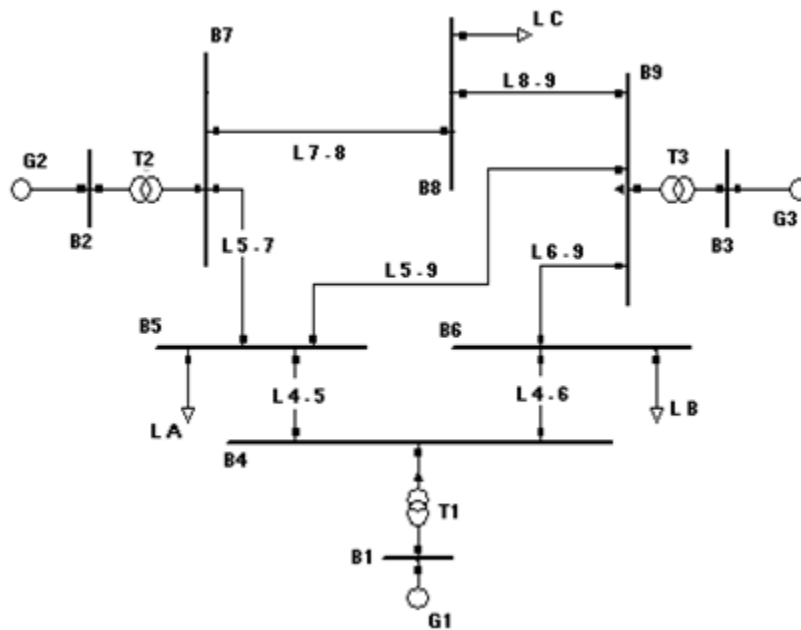
[۲۳] حسینی، س.ح. و مسلط، ف.، آشکارسازی و دسته بندی اغتشاش های سیستم توزیع به کمک

Wavelet، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی شریف، مهر ۱۳۷۷.

- [24] Lee, C. H., Wang, Y. J. and Hang, W. L., “A Literature Survey of Wavelet in Power Engineering Application”, Proc. Natl. Sci. Counc. ROC (A), Vol. 24, No. 4, PP.249-258, 2000.
- [25] Wayne Galli, A. and Nielsen, O. M., "Wavelet analysis for Power System Transients", IEEE Computer Application in Power, PP. 58-60, January 1999.
- [26] Sukumar M. Brahma, “Distance Relay With Out-of-Step Blocking Function Using Wavelet Transform” IEEE Trans. Power Del., July2007.
- [27] Sukumar M. Brahma, “Use of Wavelets for Out-of-Step Blocking Function of Distance Relays” IEEE Trans. Power Del., 2003.
- [28] S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady, and P. Hofmann, “Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis,” IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 2 , Apr. 1996
- [29] A. Osman and O. P. Malik, “Transmission Line Distance Protection Based on Wavelet Transform,” IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 2, Apr. 2004
- [30] David C. Robertson, Octavia I. Camps, Jeffery S. Mayer, William B. Gish, “Wavelets and Electromagnetic Power System Transient” IEEE Trans. Power Del, April 1996.

پیوست

شبکه ۹ شینه WSCC^{۷۶} یک شبکه به هم پیوسته و نسبتاً قوی است و می‌تواند مدل کوچکی از یک شبکه واقعی باشد. از آنجا که این شبکه ۳ ژنراتور دارد و خطوط ارتباطی پیوستگی زیادی در شبکه ایجاد کرده است، می‌تواند مدل کننده شبکه‌های با نوسانات بین ناحیه‌ای نیز باشد. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل (۱-۷) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود این شبکه ۳ ژنراتور، ۳ بار، و ۹ شینه دارد. مشخصات ژنراتورها (ژنراتورها با AVR و Governor مدل سازی شده اند)، ترانسفورماتورها، بارها و خطوط انتقال در چهار جدول زیر آمده است. فرکانس نامی این شبکه ۶۰ هرتز است



شکل(۱-۷): شبکه سه ماشینی (۹باس IEEE)

⁷⁶ Western System Coordinating Council (WSCC)

جدول (۷-۱): مشخصات ژنراتورها

| | G1 | G2 | G3 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| Type | Salient Pole | Round Rotor | Round Rotor |
| H (s) | 9.55 | 4.165 | 2.765 |
| Voltage (kV) | 16.5 | 18 | 13.8 |
| Power (MVA) | 247.5 | 192 | 128 |
| X_d, X_q (pu) | 0.36 , 0.24 | 1.72 , 1.66 | 1.68 , 1.61 |
| X_d', X_q' (pu) | 0.15 , --- | 0.23 , 0.378 | 0.23 , 0.32 |
| T_d', T_q' (s) | 3.73 , --- | 0.8 , 0.12 | 0.806 , 0.12 |
| X_d'', X_q'' (pu) | 0.1 , 0.1 | 0.2 , 0.2 | 0.2 , 0.2 |
| T_d'', T_q'' (s) | 0.05 , 0.05 | 0.05 , 0.05 | 0.05 , 0.05 |
| P_{GEN} (MW) | 160 | 163 | 85 |
| Q_{GEN} (MVar) | 27 | -8 | -14 |

جدول (۷-۲): مشخصات ترانسفورماتورها

| | T1 | T2 | T3 |
|--------------|------|------|------|
| LV Side (kV) | 16.5 | 18 | 13.8 |
| HV Side (kV) | 230 | 230 | 230 |
| Power (MVA) | 250 | 200 | 150 |
| U_K % | 14.4 | 12.5 | 8.8 |

جدول (۷-۳): مشخصات بارها

| | L _A | L _B | L _C |
|--------------|----------------|----------------|----------------|
| Voltage (kV) | 230 | 230 | 230 |
| P (MW) | 125 | 130 | 150 |
| Q (MVar) | 70 | 50 | 50 |

جدول (۷-۴): مشخصات خطوط انتقال

| | No of Lines | Length (km) |
|--|-------------|-------------|
| L 4 - 5 | 1 | 100 |
| L 4 - 6 | 1 | 130 |
| L 5 - 7 | 1 | 200 |
| L 5 - 9 | 1 | 220 |
| L 6 - 9 | 1 | 180 |
| L 7 - 8 | 2 | 150 |
| L 8 - 9 | 1 | 150 |
| Line Impedance: $0.531 \angle 85^\circ \Omega/\text{km}$ | | |

Abstract

Growing demand for electricity consumption and competitive electricity markets has led to fast changes in operation of power systems. Consequently, the transmission lines overloaded. As a result, the generating units of power systems are highly faced to instability. This kind of instability mainly happens when grid is highly overloaded and some several outages happen in a short period of time. These outages cause power swing in generating units and nearby grids. Therefore, due to excessive voltage drop and lose of synchronism, the instability is happened. The transmission lines are protected by distance relays. One of the main reasons of cascading outages after a large disturbance is wrong operation of distance relays. To prevent these unwanted events, the wrong operation of distance relay in power swing mode must be avoided.

In this thesis, the main reason of power swing is discussed and system behavior during this mode is analyzed, then several conventional techniques in power swing are reviewed briefly. Since, the wavelet transform is used in this thesis to analyze the power swing phenomenon, this transform is reviewed briefly. After that, the proposed algorithm which uses energy of first to fourth levels of wavelet transform of voltage waveform for power swing detection is employed and then, simulation results are presented. Finally, in the last chapter conclusion and results are presented.

Index Terms: Power swing, wavelet transform, distance relay



Shahrood University of Technology

Department of Electrical and Robotic Engineering

Msc. Thesis in Power Electrical Engineering

**Analysis the Effect of Power Swing on the Performance
of Distance Relays in Power Systems**

Hamid Ghasemi

Supervisor:

Dr. Mahdi Banejad

Consultant:

Dr. Dastfan & Dr. Ahmadyfard

January 2010