

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





دانشکده: برق و رباتیک

گروه: قدرت

تشخیص خطای امپدانس بالا در سیستم‌های توزیع با استفاده از تبدیل موجک

دانشجو:

حسن ایجادي

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

دی ۱۳۹۲

ج



## تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش را به ما عطا فرمود. اینجانب بر خود لازم می‌دانم که در این چند خط محدود از تلاش‌ها و کمک‌های فراوان استادم دکتر مهدی بانزاد کمال تشکر را داشته باشم، که در مسیر تهیه و ارائه این پروژه کمال همکاری را با اینجانب داشته‌اند.



## چکیده

یکی از مسائل حائز اهمیت در زمینه ایمنی شبکه‌های توزیع برق جلوگیری از وقوع حوادث ناگوار همچون آتش‌سوزی و مرگ بر اثر برق‌گرفتگی می‌باشد. از اصلی‌ترین این نوع رخدادها، ایجاد خطای امپدانس پایین و خطای امپدانس بالا می‌باشد. بهترین روش برای جلوگیری از این مسئله پیشگیری وقوع حوادث با تشخیص زودهنگام رخ دادن خطا می‌باشد. در این پایان‌نامه یک روش از ترکیب تبدیل موجک گسسته و تقریبگر تابع فازی برای تشخیص خطای امپدانس بالا در شبکه توزیع پیشنهاد شده است. این روش در ابتدا سیگنال ولتاژ فیدر را اندازه‌گیری و به مدت یک ثانیه ذخیره می‌کند. سپس سیگنال اندازه‌گیری شده توسط تبدیل موجک گسسته تجزیه می‌شود. در مرحله بعد با بررسی چندین نوع موجک مادر و سطح جزئیات سیگنال فیدر از خروجی تبدیل موجک، شاخص مناسب انتخاب می‌گردد. شاخص‌های ساخته شده به عنوان ورودی تقریبگر تابع فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تقریبگر تابع فازی به کمک زوج‌های ورودی-خروجی به عنوان داده‌های آموزش تابع رخداد خطا را تقریب می‌زند. سپس این سیستم توانایی تشخیص وقوع یا عدم وقوع خطای امپدانس بالا برای یک داده جدید را دارد.

در این پایان‌نامه از دو شبکه توزیع نمونه شعاعی و حلقوی برای شبیه‌سازی استفاده می‌گردد که این دو دارای انواع بارهای خطی و غیرخطی در باس‌های تغذیه خود می‌باشد. در کنار تنوع بالا در مدل‌های بار الکتریکی، سه نوع مدل خطای امپدانس بالا (الکتریکی، دینامیکی و ترکیبی) با حالات مختلف نیز استفاده می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانایی تشخیص حالت کار عادی شبکه و وقوع خطای امپدانس بالا را با دقت بالا دارد.

**کلیدواژه:** سیستم قدرت، شبکه توزیع، تشخیص خطا، خطای امپدانس بالا، تبدیل موجک، تابع تقریب فازی،





## مقالات مستخرج از پایان نامه

1. Banejad M., Ijadi H., "High Impedance Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform and Fuzzy Function Approximation", Journal of Artificial Intelligence & Data Mining, 2014, Iran, In press.
2. Ijadi H., Banejad M., "High Impedance Fault Detection of Distribution Meshed Network by Fuzzy Function Approximation", International Review of Electrical Engineering, 2014, Italy, In press.



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د.....	فهرست جدول‌ها.....
و.....	فهرست شکل‌ها.....
۲.....	فصل ۱- مقدمه.....
۶.....	فصل ۲- ماهیت خطای امیدانس بالا و مدل‌سازی آن.....
۶.....	۱-۲- مقدمه.....
۶.....	۲-۲- تعریف خطای امیدانس بالا.....
۶.....	۳-۲- انواع خطای امیدانس بالا.....
۸.....	۴-۲- ویژگی‌های جریان خطای امیدانس بالا.....
۱۱.....	۵-۲- مدل کردن خطای امیدانس بالا.....
۱۴.....	۶-۲- جمع‌بندی.....
۱۶.....	فصل ۳- روش‌های موجود تشخیص خطای امیدانس بالا.....
۱۶.....	۱-۳- مقدمه.....
۱۷.....	۲-۳- رویکردهای کلاسیک در تشخیص HIF.....
۱۷.....	۱-۲-۳- استفاده از جریان نول.....
۱۸.....	۲-۲-۳- استفاده از دامنه و فاز هارمونیک‌ها.....
۱۸.....	۳-۲-۳- استفاده از ویژگی‌های رفتاری HIF.....
۲۰.....	۳-۳- رویکردهای مدرن در تشخیص HIF.....
۲۰.....	۱-۳-۳- اندازه‌گیری و آماده‌سازی.....
۲۱.....	۲-۳-۳- ابزارهای تجزیه و استخراج ویژگی سیگنال.....
۲۲.....	۱-۲-۳-۳- فیلترهای متداول.....
۲۲.....	۲-۲-۳-۳- فیلتر کالمن.....
۲۴.....	۳-۲-۳-۳- تبدیل فوریه.....
۲۵.....	۴-۲-۳-۳- تبدیل موجک WT.....
۲۸.....	۳-۳-۳- تعیین و ساخت شاخص تمایز.....
۳۰.....	۱-۳-۳-۳- استفاده از مجموع قدر مطلق پنجره‌ای خروجی موجک.....

۳۲	استفاده از مجموع قدر مطلق خروجی موجک	۲-۳-۳-۳
۳۳	استفاده از مقدار موثر خروجی موجک	۳-۳-۳-۳
۳۳	استفاده از شمارش خروجی موجک	۴-۳-۳-۳
۳۴	استفاده از شاخص‌های ترکیبی خروجی موجک	۵-۳-۳-۳
۳۵	دسته‌بندی و اعلام رخداد HIF	۴-۳-۳
۳۵	الگوریتم تصمیم حد مرزی	۱-۴-۳-۳
۳۸	الگوریتم‌های هوشمند	۲-۴-۳-۳
۳۹	الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی	۳-۴-۳-۳
۴۳	الگوریتم سیستم فازی	۴-۴-۳-۳
۴۴	ماشین بردار تکیه‌گاه	۵-۴-۳-۳
۴۴	رویکردهای دیگر در خطای امپدانس بالا	۴-۳
۴۴	جمع‌بندی	۵-۳
<b>۴۸</b>	<b>مدل‌سازی شبکه مورد آزمایش</b>	<b>۴</b>
۴۸	مقدمه	۱-۴
۴۸	شبکه مورد آزمایش	۲-۴
۴۹	ساختار شبکه	۱-۲-۴
۴۹	ساختار شعاعی چند انشعاب	۱-۱-۲-۴
۵۰	ساختار حلقوی دو سو تغذیه	۲-۱-۲-۴
۵۱	مدل خط توزیع	۲-۲-۴
۵۳	مدل بار الکتریکی	۳-۲-۴
۵۳	بار توان ثابت	۱-۳-۲-۴
۵۳	کلید زنی بار	۲-۳-۲-۴
۵۴	کلید زنی بانک خازنی	۳-۳-۲-۴
۵۵	موتور القایی	۴-۳-۲-۴
۵۵	کوره قوس الکتریکی	۵-۳-۲-۴
۵۶	بار تریستوری	۶-۳-۲-۴
۵۷	یکسو کننده تک فاز	4-2-3-7-
۵۷	مدلسازی دیگر عوامل	۸-۳-۲-۴
۵۸	مدل خطای امپدانس بالا	۳-۴
۵۸	مدل دینامیکی	۱-۳-۴
۶۰	مدل الکتریکی	۲-۳-۴

۶۲	مدل ترکیبی	۳-۳-۴
۶۴	جمع بندی	۴-۴
۶۶	<b>فصل ۵- بیان و شبیه سازی روش پیشنهادی</b>	
۶۶	مقدمه	۱-۵
۶۶	انتقال سیگنال ولتاژ و جریان به الگوریتم پیشنهادی	۲-۵
۶۷	بیان کلی الگوریتم پیشنهادی تشخیص HIF	۳-۵
۶۸	یافتن و ساختن شاخص تمایز به کمک خروجی موجک	۴-۵
۷۰	روش فازی به عنوان ابزار تقریبگر تابع خطا HIF	۵-۵
۷۱	تابع تقریبگر فازی	۱-۵-۵
۷۲	داده های آموزش	۲-۵-۵
۷۳	یافتن انحراف معیار $\sigma$ مناسب	۳-۵-۵
۷۵	شبیه سازی کلی الگوریتم پیشنهادی	۶-۵
۷۵	خروجی اندازه گیری سیگنال فیدر	۱-۶-۵
۷۶	خروجی تبدیل موج گسسته	۲-۶-۵
۸۱	ساخت شاخص تمایز به کمک خروجی موجک	۳-۶-۵
۸۶	نتایج الگوریتم تشخیص HIF روش پیشنهادی	۷-۵
۸۷	به کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای شبکه نمونه اول و تحلیل نتایج	۱-۷-۵
۸۸	به کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای شبکه نمونه دوم و تحلیل نتایج	۲-۷-۵
۹۰	الگوریتم پیشنهادی تشخیص خطای امیدانس بالا و فاز خطا	۳-۷-۵
۹۰	الگوریتم تشخیص بر اساس تعدد شاخص	۴-۷-۵
۹۱	الگوریتم نهایی پیشنهادی تشخیص HIF و فاز خطا	۸-۵
۹۲	جمع بندی	۹-۵
۹۴	<b>فصل ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات</b>	
۹۴	نتیجه گیری	۱-۶
۹۵	پیشنهادات	۲-۶
۹۸	<b>پیوست ۱: تبدیل موجک گسسته</b>	
۹۸	۱-۱- مقدمه	
۹۹	۲-۱- معرفی تبدیل موجک	

پ ۱-۳- تبدیل موجک گسسته	۱۰۰
پیوست ۲: تابع تقریبگر فازی	۱۰۳
پ ۱-۲- مقدمه	۱۰۳
پ ۲-۲- سیستم فازی	۱۰۳
پ ۳-۲- سیستم فازی به عنوان تقریبگر تابع	۱۰۴
فهرست مراجع	۱۰۸

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

---

جدول (۱-۲): مقدار جریان عبوری خطای امپدانس بالا در چند آزمایش.....	۸
جدول (۱-۳): موجک مادر استفاده شده در برخی از مراجع برای استخراج ویژگی.....	۲۶
جدول (۱-۵): حالات برتر تشخیص در شبکه نمونه اول.....	۸۷
جدول (۲-۵): ده حالت برتر تشخیص فاز خطا در شبکه نمونه اول.....	۸۸
جدول (۳-۵): ده حالت برتر تشخیص در شبکه نمونه دوم.....	۸۹
جدول (۴-۵): حالات برتر در تشخیص HIF شبکه نمونه اول.....	۹۱

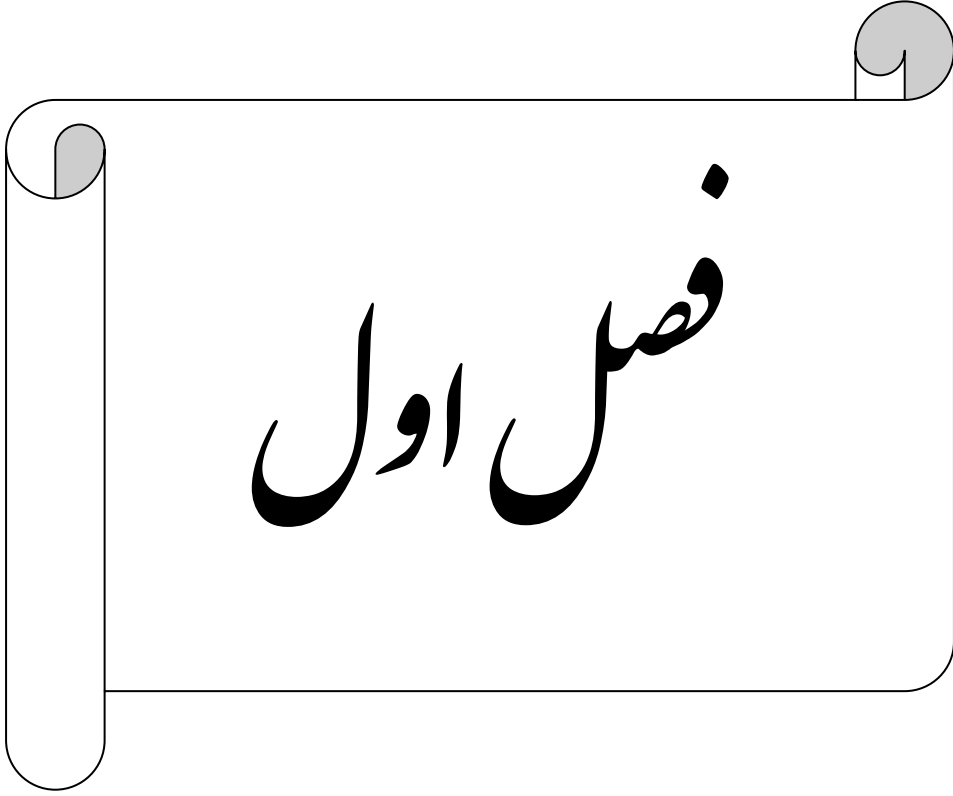
## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲): شمای خطا بدون بریدگی. ....	۷
شکل (۲-۲): شمای خطا بر اثر بریدگی. ....	۷
شکل (۳-۲): نحوه آزمایش خطای امیدانس بالا در مرجع [۴]. ....	۹
شکل (۴-۲): دیاگرام تک خطی آزمایش خطای امیدانس بالا در مرجع [۲]. ....	۹
شکل (۵-۲): جریان خطای امیدانس بالا بر روی سطح خاک و بتن [۲]. ....	۱۰
شکل (۶-۲): جریان خطای امیدانس بالا بر روی سطح آسفالت [۲]. ....	۱۰
شکل (۷-۲): مدل HIF بر طبق مرجع [۷]. ....	۱۲
شکل (۸-۲): مدل HIF بر طبق مرجع [۸]. ....	۱۲
شکل (۹-۲): مدل HIF بر طبق مرجع [۹]. ....	۱۲
شکل (۱۰-۲): مدل HIF بر طبق مرجع [۱۰]. ....	۱۲
شکل (۱۱-۲): مدل خطای امیدانس بالا مرجع [۱۵]. ....	۱۴
شکل (۱-۳): روند تشخیص HIF در رویکرد مدرن. ....	۲۰
شکل (۲-۳): بلوک (۱) اندازه‌گیری و آماده‌سازی. ....	۲۱
شکل (۳-۳): بلوک (۲) تجزیه و استخراج ویژگی سیگنال. ....	۲۱
شکل (۴-۳): فرکانس عبور فیلتر میان‌گذر. ....	۲۲
شکل (۵-۳): دامنه هارمونیک‌ها سیگنال جریان شامل خطا HIF [۲۸]. ....	۲۳
شکل (۶-۳): دامنه هارمونیک‌ها سیگنال جریان برای بار غیرخطی [۲۸]. ....	۲۳
شکل (۷-۳): دیاگرام چند وضوحی. ....	۲۶
شکل (۸-۳): جریان HIF و خروجی تبدیل موجک [۱۶]. ....	۲۷
شکل (۹-۳): جریان کلید زنی و خروجی تبدیل موجک [۱۶]. ....	۲۸
شکل (۱۰-۳): بلوک (۳) تعیین و ساخت شاخص تمایز. ....	۲۸
شکل (۱۱-۳): شبکه توزیع نمونه مورد استفاده در مرجع [۸]. ....	۲۹
شکل (۱۲-۳): جزئیات D3 جریان سه فاز پس از HIF در فاز a [۳۵]. ....	۳۱
شکل (۱۳-۳): مجموع قدرمطلق پنجره‌ای از رابطه (۲-۳) [۳۵]. ....	۳۲



- شکل (۳-۱۴): خروجی موجک از سیگنال [۱۵]. ..... ۳۴
- شکل (۳-۱۵): شمارش تعداد عبور رخداد از حد آستانه [۱۵]. ..... ۳۴
- شکل (۳-۱۶): بلوک (۴) دسته‌بندی و اعلام رخداد HIF. .... ۳۵
- شکل (۳-۱۷): الگوریتم تصمیم موازی ..... ۳۶
- شکل (۳-۱۸): الگوریتم تصمیم ترتیبی ..... ۳۷
- شکل (۳-۱۹): الگوریتم تشخیص HIF بر اساس سیستم هوشمند. .... ۳۹
- شکل (۳-۲۰): یک نرون با ورودی. .... ۴۰
- شکل (۳-۲۱): نسبت دو شاخص تمایز در مرجع [۳۳]. ..... ۴۱
- شکل (۳-۲۲): ساختار شبکه عصبی مرجع [۳۷]. ..... ۴۲
- شکل (۴-۱): ساختار شبکه توزیع شعاعی چند انشعابی. .... ۵۰
- شکل (۴-۲): مدل شبکه توزیع حلقوی دو سو تغذیه. .... ۵۱
- شکل (۴-۳): ساختار دیتیل TCL با کراس آرم ۲/۴۴ [۵۸]. ..... ۵۲
- شکل (۴-۴): منحنی ولتاژ و جریان کلید زنی بار. .... ۵۴
- شکل (۴-۵): منحنی ولتاژ و جریان کلید زنی بانک خازنی. .... ۵۵
- شکل (۴-۶): منحنی ولتاژ-جریان یک نمونه از کوره قوس الکتریکی. .... ۵۶
- شکل (۴-۷): منحنی ولتاژ و جریان بار تریستوری. .... ۵۷
- شکل (۴-۸): مدل دینامیکی HIF بکار رفته در پایان‌نامه. .... ۵۸
- شکل (۴-۹): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل دینامیکی HIF. .... ۵۹
- شکل (۴-۱۰): منحنی ولتاژ-جریان یک نمونه از مدل دینامیکی HIF. .... ۵۹
- شکل (۴-۱۱): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل دینامیکی HIF. .... ۶۰
- شکل (۴-۱۲): مدل الکتریکی HIF بکار رفته در پایان‌نامه. .... ۶۰
- شکل (۴-۱۳): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل الکتریکی HIF. .... ۶۱
- شکل (۴-۱۴): منحنی ولتاژ-جریان یک نمونه از مدل الکتریکی HIF. .... ۶۱
- شکل (۴-۱۵): مدل ترکیبی HIF. .... ۶۲
- شکل (۴-۱۶): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل ترکیبی HIF. .... ۶۳
- شکل (۴-۱۷): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل ترکیبی HIF. .... ۶۳
- شکل (۴-۱۸): منحنی ولتاژ-جریان یک نمونه از مدل ترکیبی HIF. .... ۶۴
- شکل (۵-۱): انتقال سیگنال ولتاژ و جریان به الگوریتم پیشنهادی. .... ۶۶

- شکل (۲-۵): الگوریتم کلی روش پیشنهادی. ۶۸.....
- شکل (۳-۵): روند بلوک (۳) از الگوریتم کلی روش پیشنهادی. ۷۰.....
- شکل (۴-۵): روند محاسبه و ذخیره داده‌های آموزش در الگوریتم پیشنهادی. ۷۳.....
- شکل (۵-۵): الگوریتم انتخاب  $\sigma$  مناسب در روش پیشنهادی. ۷۴.....
- شکل (۶-۵): ولتاژ سه فاز فیدر برای بار نامتقارن. ۷۵.....
- شکل (۷-۵): ولتاژ سه فاز فیدر برای وقوع HIF. ۷۶.....
- شکل (۸-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد کلید زنی بار. ۷۷.....
- شکل (۹-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد اشباع ترانسفورماتور. ۷۸.....
- شکل (۱۰-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد کوره قوس الکتریکی. ۷۸.....
- شکل (۱۱-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با بار تریستوری زاویه آتش ثابت. ۷۹.....
- شکل (۱۲-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با بار تریستوری زاویه آتش متغیر. ۷۹.....
- شکل (۱۳-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با بار نامتعادل دیودی. ۸۰.....
- شکل (۱۴-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد HIF. ۸۰.....
- شکل (۱۵-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد HIF. ۸۱.....
- شکل (۱۶-۵): مجموع قدر مطلق جزئیات از ولتاژ موجک مادر Db14 سطح پنج. ۸۲.....
- شکل (۱۷-۵): مجموع قدر مطلق جزئیات از ولتاژ موجک مادر Rbio3.3 سطح پنج. ۸۲.....
- شکل (۱۸-۵): شاخص اول و دوم. ولتاژ فاز، موجک مادر Db14، جزئیات پنج. ۸۳.....
- شکل (۱۹-۵): شاخص اول و دوم. ولتاژ فاز، موجک مادر Rbio3.1، جزئیات چهار. ۸۳.....
- شکل (۲۰-۵): شاخص اول و دوم. ولتاژ فاز، موجک مادر db14، جزئیات پنج. ۸۴.....
- شکل (۲۱-۵): شاخص اول و دوم. جمع ولتاژ ۳ فاز، موجک مادر Dmey، جزئیات شش. ۸۴.....
- شکل (۲۲-۵): شاخص اول و دوم. جریان فاز، موجک مادر Rbio2.2، جزئیات هفت. ۸۵.....
- شکل (۲۳-۵): شاخص اول و دوم نسبت به هم. ولتاژ فاز، موجک مادر Rbio3.1، جزئیات هفت. ۸۵.....
- شکل (۲۴-۵): شاخص اول و دوم نسبت به هم. جریان فاز، موجک مادر Db20، جزئیات چهار. ۸۶.....
- شکل (۲۵-۵): الگوریتم تشخیص خطا و فاز خطا. ۹۰.....
- شکل (۲۶-۵): الگوریتم نهایی تشخیص خطا و فاز خطا. ۹۲.....
- شکل (پ ۱-۱): مراحل فیلتر کردن سیگنال در تبدیل موجک گسسته. ۱۰۲.....
- شکل (پ ۱-۲): ساختار سیستم فازی. ۱۰۴.....



مقدمه

## فصل ۱ – مقدمه

وجود ایمنی و بالا بودن قابلیت اطمینان یکی از ملزومات در شبکه برق‌رسانی به شمار می‌آید، به طوری که در صورت پایین بودن قابلیت اطمینان خسارت‌های زیادی برای مصرف‌کننده به خصوص مصرف‌کنندگان صنعتی در بر خواهد داشت. همچنین نبود ایمنی در شبکه برق‌رسانی منجر به وقوع حوادث ناگواری از قبیل آتش‌سوزی جنگل‌ها و حتی مرگ انسان‌ها بر اثر برق‌گرفتگی خواهد شد که حتی بعد از آن با صرف هزینه نیز نمی‌توان این خسارات را جبران کرد. بهترین روش برای این امر مهم صرف هزینه در اجرای طرح‌های پیشگیرانه می‌باشد.

یکی از مسائلی که منجر به عدم امنیت مالی و جانی در شبکه می‌شود، وقوع خطاهایی از قبیل قطع خطوط و یا برخورد خطوط با اجسام می‌باشد. که در صورت آگاهی زودهنگام از وقوع آن می‌توان برای اصلاح و جلوگیری از فاجعه اقدامات فوری انجام داد. این نوع خطاها را می‌توان به دو دسته خطای امپدانس پایین<sup>۱</sup> (LIF) و خطای امپدانس بالا<sup>۲</sup> (HIF) تقسیم‌بندی نمود.

بالا بودن جریان عبوری خطای امپدانس پایین امکان تشخیص آسان با اندازه‌گیری جریان در فیدر<sup>۳</sup> را مهیا می‌سازد. سپس این تشخیص فرمانی برای قطع خط به کمک رله‌های حفاظتی اضافه جریان تعبیه‌شده در فیدر می‌گردد و این قطعی خط امکان بوجود آمدن خطرات جانی و مالی را به شدت کاهش می‌دهد. اما در دسته دوم پایین بودن سطح ولتاژ و زیاد بودن امپدانس مسیر باعث کاهش دامنه جریان در این نوع خطاها می‌شود. لذا حفاظت‌های موجود در شبکه مثل رله‌های اضافه جریان قادر به شناسایی آنها نخواهند بود و این جریان پایین را به عنوان افزایش معمول در میزان جریان بار در نظر می‌گیرند.

---

<sup>1</sup> Low impedance fault

<sup>2</sup> High impedance fault

<sup>3</sup> Feeder

هدف اصلی آشکارسازی خطای امپدانس پایین جلوگیری از آسیب‌های حرارتی و مکانیکی به شبکه و تجهیزات آن می‌باشد. این در حالی است که در خطای امپدانس بالا به دلیل پایین بودن سطح جریان خطا، آسیب زیادی به شبکه و تجهیزات وارد نمی‌کند و هدف اصلی آشکارسازی خطای امپدانس بالا حفاظت جان انسان‌ها در برابر برق‌گرفتگی و آتش‌سوزی برشمرده می‌شود. لذا به منظور افزایش سطح ایمنی و همچنین افزایش قابلیت اطمینان شبکه لازم است اقداماتی جهت شناسایی مطمئن این نوع خطاها صورت پذیرد. به همین منظور محققین زیادی اقدام به ارائه روش‌هایی برای شناسایی خطاهای امپدانس بالا نموده‌اند. بخشی از روش‌های قدیمی بر مبنای توسعه رله‌های حفاظتی می‌باشد و بخشی بر مبنای خصوصیات رفتاری خطای امپدانس بالا تشخیص را انجام می‌دهد. در روش‌های جدیدتر بر اساس پردازش سیگنال و حتی سیستم‌های هوشمند این تشخیص صورت می‌گیرد. هر روش دارای مشکلات و امتیازاتی می‌باشد، که به نوبه خود نمی‌توان یک روش را مطلقاً از روش دیگر برتری داد.

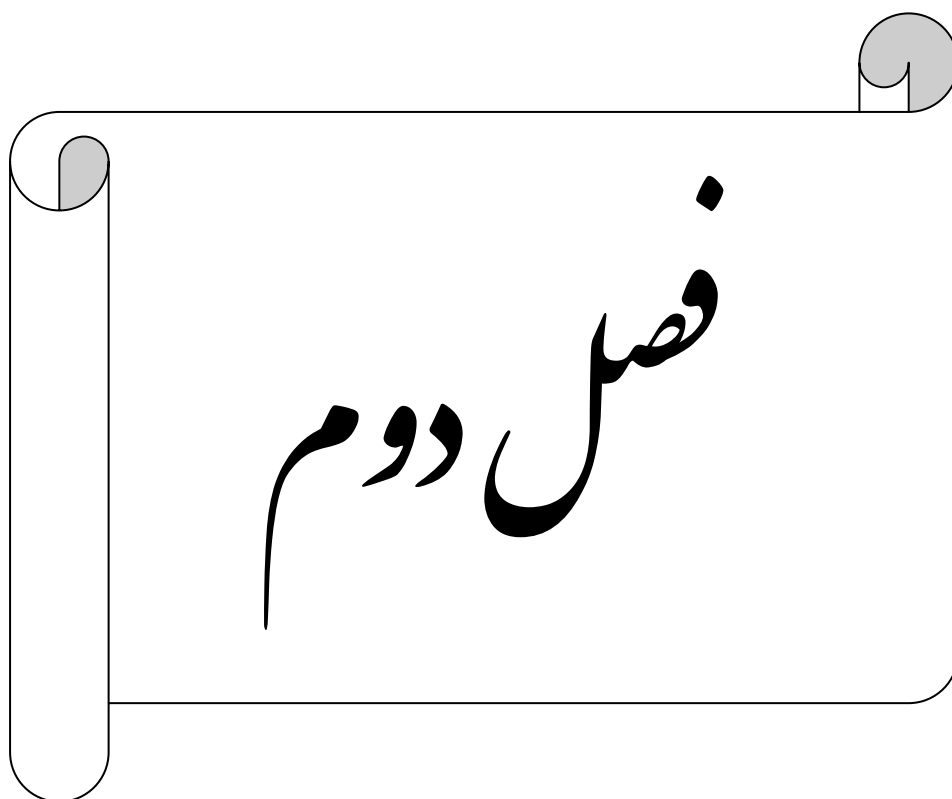
یکی از مسائل مهم در روند شناسایی روش تشخیص خطای امپدانس بالا، شبیه‌سازی شبکه و مدل‌سازی اجزای آن بویژه مدل‌سازی خطای امپدانس بالا می‌باشد. محققین مدل‌های متعددی را برای خطای امپدانس بالا ارائه نموده‌اند که هرچند کامل نیستند ولی با توجه به اینکه بر مبنای نتایج آزمایش‌های عملی هستند، حداقل‌هایی از ویژگی‌های خطا را در بر می‌گیرند. مدل‌سازی از این‌رو دارای اهمیت می‌باشد که یافتن روش تشخیص HIF بر اساس مدل‌های شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. در نتیجه تطبیق هرچه بیشتر مدل‌های شبیه‌سازی با واقعیت، دقت روش تشخیص در شبکه واقعی را افزایش می‌دهد.

این پایان‌نامه از شش فصل تشکیل شده است. در فصل بعد به بیان ماهیت خطای امپدانس بالا، ویژگی‌های آن و همچنین مدل‌سازی‌های صورت گرفته توسط محققین پرداخت شده است. در فصل سوم به بررسی روش‌های تشخیص خطای امپدانس بالا در طول زمان پرداخت شده و رویکردها به دو

دسته کلاسیک و مدرن تقسیم‌بندی گردیده است. رویکردهای کلاسیک عموماً الگوریتم‌های ساده با ابزارهای تجزیه سیگنال ساده را شامل می‌شود. در صورتی که رویکردهای مدرن الگوریتم‌های پیچیده‌تر به واسطه استفاده از ابزارهای تجزیه سیگنال جدیدتر و بعضاً استفاده از سیستم‌های هوشمند همچون شبکه عصبی برای دسته‌بندی برخوردار هستند. از فصل چهارم کارهای انجام شده در این پایان‌نامه آغاز شده است. در این فصل ابتدا ساختار دو شبکه مورد آزمایش بیان و سپس مدل‌سازی اجزای شبکه همچون خط، انواع بارهای خطی و غیرخطی و در نهایت سه نوع مدل خطای امیدانس بالامعرفی و بررسی گردیده است. در فصل پنجم روش پیشنهادی برای تشخیص خطای امیدانس بالا ارائه شده است. این روش با استفاده از تبدیل موجک گسسته، سیگنال تجزیه و با استفاده از خروجی موجک شاخص‌های مناسب را می‌سازد. شاخص‌های ساخته شده با بررسی انواع موجک مادر در سطوح مختلف جزئیات از سیگنال‌های ولتاژ و جریان فیدر انتخاب شده‌اند. این شاخص‌ها به عنوان ورودی سیستم دسته‌بندی خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. دسته‌بندی خطا به کمک سیستم فازی به عنوان تقریبگر تابع<sup>1</sup>، صورت گرفته است. این ابزار با استفاده از زوج‌های ورودی-خروجی به عنوان داده‌های آموزش، تابع تقریب خطا را می‌سازد و اقدام به تشخیص وقوع خطا برای داده جدید می‌کند. در پایان این فصل الگوریتم نهایی تشخیص وقوع و فاز خطای امیدانس بالا در کنار نتایج دقت روش پیشنهادی بیان شده است. فصل آخر نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه شده است.

---

<sup>1</sup> Fuzzy system as function approximation



مبیت خطای امیدانس بالاو مدل سازی آن

## فصل ۲- ماهیت خطای امپدانس بالا و مدل‌سازی آن

### ۲-۱- مقدمه

قبل از بیان چگونگی تشخیص خطای امپدانس بالا باید یک شناخت کامل از ماهیت خطای امپدانس بالا و مدل‌سازی آن داشت. در این فصل در ابتدا به بیان انواع خطای امپدانس بالا و علت رخداد پرداخته می‌شود سپس به بررسی ویژگی‌های رفتاری پرداخته شده است و در آخر مدل‌های ارائه شده توسط محققین برای خطای امپدانس بالا بیان می‌گردد.

### ۲-۲- تعریف خطای امپدانس بالا

به طور کلی به ایجاد هر نوع برخورد (یا اتصال) الکتریکی میان یک هادی برقدار (که می‌تواند خطوط توزیع یا خطوط انتقال باشد) به زمین به واسطه اجسام خارجی غیر هادی خطای امپدانس بالا گفته می‌شود [۱]. اجسام خارجی مورد نظر به طور ذاتی غیر هادی هستند، اما در صورتی که ولتاژ اعمال شده به آنها به قدر کافی بزرگ باشد، قادر به هدایت جریان خواهند بود. این نوع خطا عموماً در خطوط سطح ولتاژ متوسط<sup>۱</sup> رخ می‌دهد که می‌تواند انواع مختلفی در وقوع خطا داشته باشد.

### ۲-۳- انواع خطای امپدانس بالا

معمولاً خطای امپدانس بالا به دو دلیل ایجاد می‌شوند: یا هادی برقدار بدون بریدگی با جسمی که دارای امپدانس زیاد است تماس پیدا می‌کند و یا هادی بریده شده و بر روی زمین (بتن، شن و ماسه، آسفالت و...) می‌افتد.

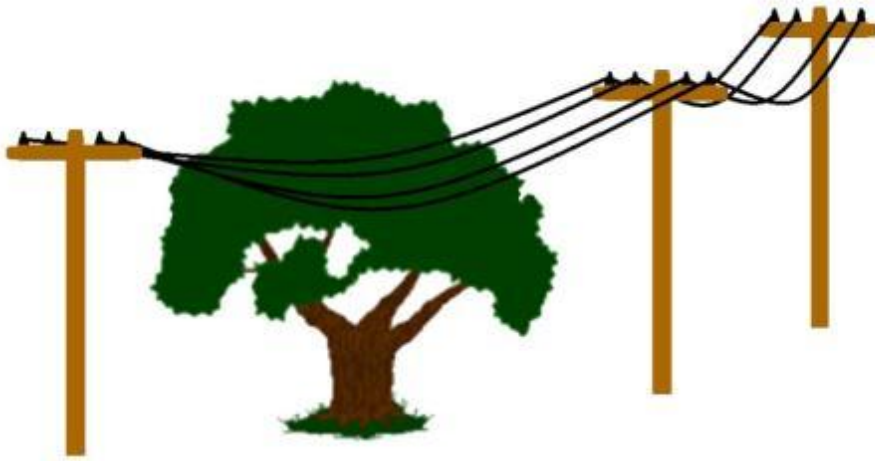
نوع اول خطاهای امپدانس بالا معمولاً بر اثر وجود خط توزیع (یا انتقال) در کنار درختان منجر می‌گردد. این اتفاق با گرم شدن سیم‌ها و یا بزرگ شدن درختان و حتی بر اثر افتادن درختان بر روی

---

<sup>1</sup> Medium Voltage(MV)

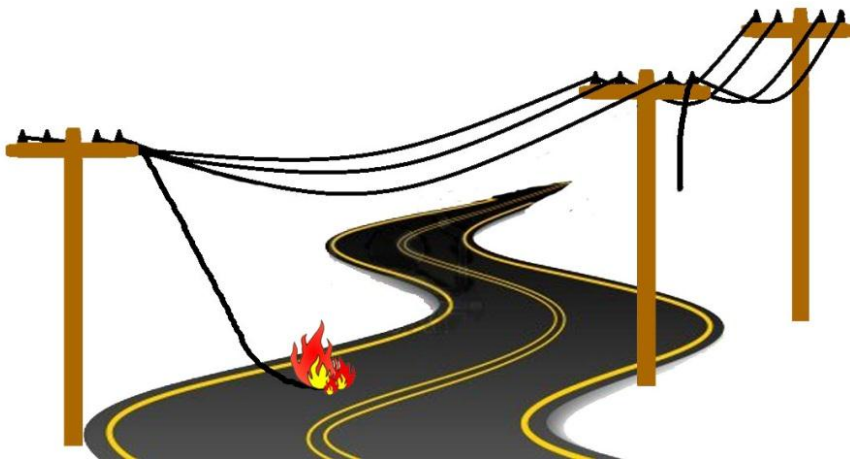


خط امکان‌پذیر است که خود می‌تواند ویژگی‌های مختلفی از نظر نیمه‌هادی بودن داشته باشد. شکل (۱-۲) شمای خطای بدون بریدگی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲): شمای خطا بدون بریدگی.

نوع دوم خطا معمولاً بر اثر برخورد وسیله‌ای مانند خودرو و یا فرسایش گیره‌های هادی در خط توزیع (یا انتقال) منجر می‌گردد. پس از پارگی هادی، بسته به نوع جسم تماس هادی خطا واکنش متفاوتی دارد. شکل (۲-۲) شمای خطا بر اثر بریدگی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲): شمای خطا بر اثر بریدگی.

## ۲-۴- ویژگی‌های جریان خطای امپدانس بالا

ویژگی جریان خطای امپدانس بالا با توجه به شرایط مختلف دارای تنوع می‌باشد و عموماً شامل قوس الکتریکی در مدت زمان خطا و یا بخشی از زمان خطا می‌باشد [۲]. اجسام غیر هادی مقاومت الکتریکی بسیار بزرگی از خود نشان داده و در نتیجه در هنگام وقوع HIF جریان کمی از خود عبور می‌دهند، از این رو پیک جریان متعارف خطای امپدانس بالا در حدود چند ده آمپر در سطح ولتاژ متوسط (MV) می‌باشد. جدول (۱-۲) مقدار جریان عبوری در چند نوع سطح در ولتاژ ۲۰ و ۱۲/۵ کیلوولت را نشان می‌دهد [۲-۳].

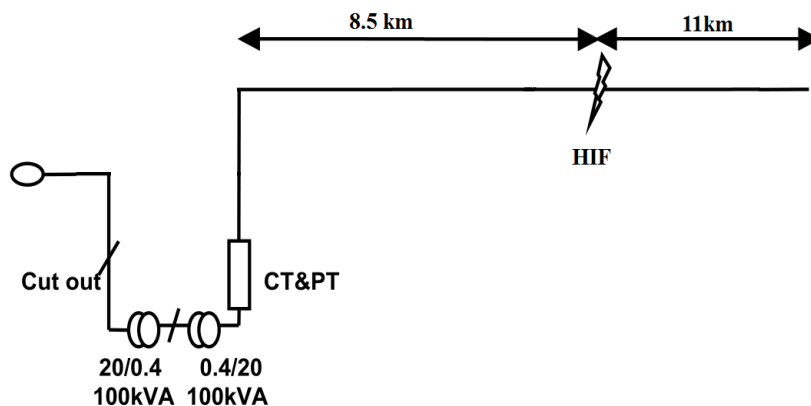
جدول (۱-۲) : مقدار جریان عبوری خطای امپدانس بالا در چند آزمایش.

جنس سطح تماس	سطح ولتاژ	مقدار پیک جریان عبوری
آسفالت خشک	۱۲/۵ کیلوولت	~ 0 A
شن و ماسه	۱۲/۵ کیلوولت	15 A
چمن	۱۲/۵ کیلوولت	25 A
علفزار	۱۲/۵ کیلوولت	45 A
بتن ۱۰ سانت	۲۰ کیلوولت	25-120A
آسفالت ۲ سانت	۲۰ کیلوولت	≈ 120 A
آسفالت ۲۰ سانت	۲۰ کیلوولت	No arc
ترکیب خاک و بتن	۲۰ کیلوولت	80-140 A

جریان عبوری خطا امپدانس بالا به دلیل ماهیت غیرخطی و همچنین رخداد قوس الکتریکی دارای مؤلفه‌های فرکانسی مختلف می‌باشد. این رفتار تاثیرات متفاوتی بر روی مؤلفه‌های فرکانس پایین و فرکانس بالای ولتاژ و جریان فاز شبکه بوجود می‌آورد که جای بررسی دارد.

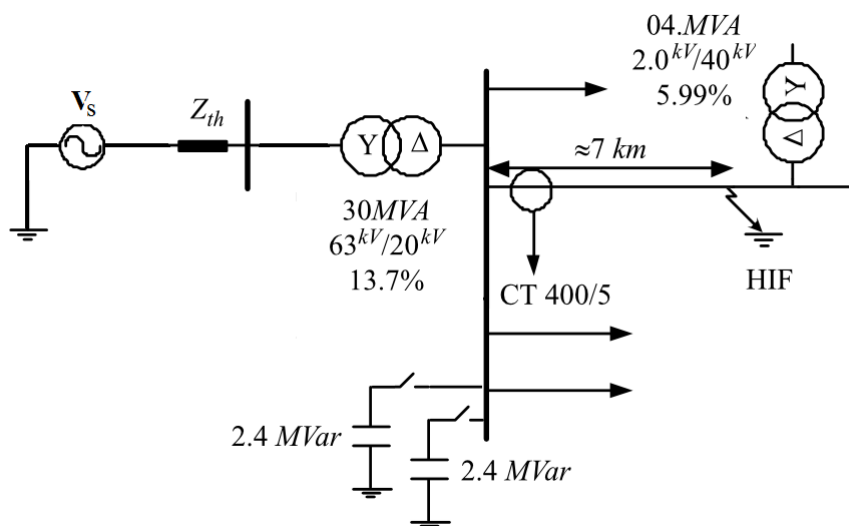
بهترین روش برای یافتن ویژگی هرچه دقیق‌تر از خطای امپدانس بالا، انجام آزمایش واقعی کنترل شده می‌باشد. برای این منظور معمولاً یک خط بدون بار را با استفاده از دو ترانسفورماتور ۲۰ کیلو به ۴۰۰ ولت و ۴۰۰ به ۲۰ کیلوولت به شبکه متصل می‌کنند و سپس خطای امپدانس بالا را به صورت

عمدی بر روی خط بدون بار اعمال و جریان عبوری را اندازه‌گیری و ثبت می‌کنند. شکل (۳-۲) سیستم تک خطی آزمایش در مرجع [۴] را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲): نحوه آزمایش خطای امپدانس بالا در مرجع [۴].

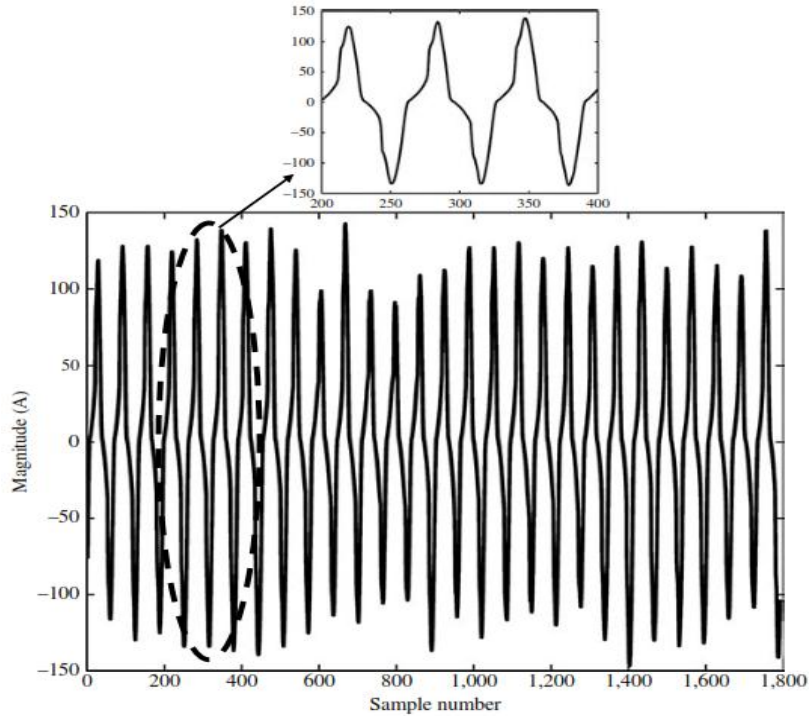
اما در مرجع [۲] برای بالا بردن سطح داده‌های خطای امپدانس بالا، خطا را در خط دارای بار آزمایش نموده است که دیاگرام تک خطی سیستم آزمایش شده در شکل (۴-۲) آورده شده است. بار خط در مجموع ۲۸۰ آمپر می‌باشد که تقریباً ۳۰ درصد آن صنعتی و ۷۰ درصد آن ثابت است.



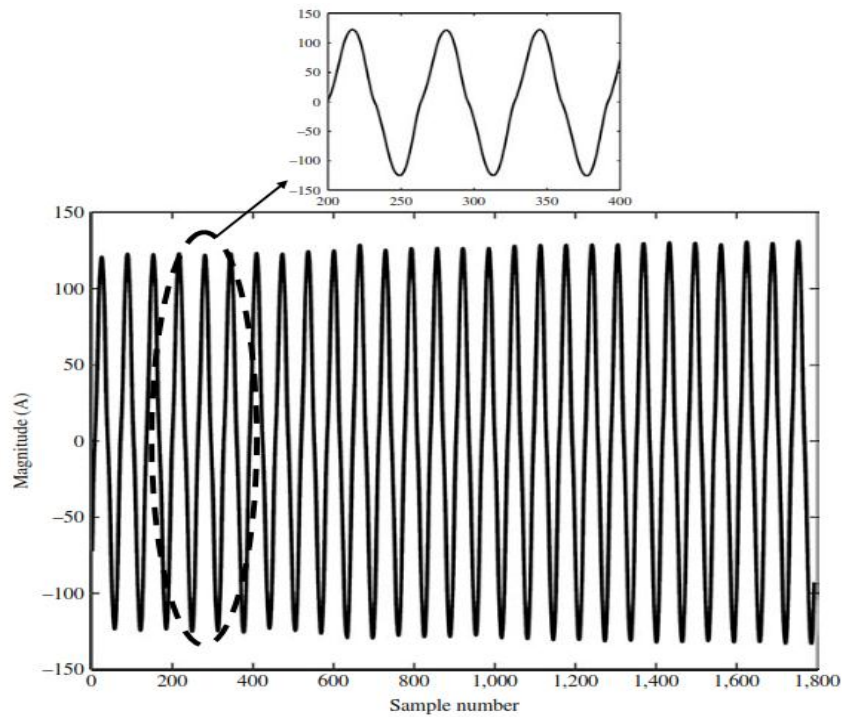
شکل (۴-۲): دیاگرام تک خطی آزمایش خطای امپدانس بالا در مرجع [۲].

در مرجع [۲] خطای امپدانس بالا بر روی چندین سطح انجام پذیرفته که دو نمونه آن در ادامه

آورده شده است.



شکل (۲-۵): جریان خطای امپدانس بالا بر روی سطح خاک و بتن [۲].



شکل (۲-۶): جریان خطای امپدانس بالا بر روی سطح آسفالت [۲].

همان‌گونه که در دو شکل (۲-۵) و شکل (۲-۶) مشاهده می‌گردد شکل موج جریان HIF بر روی سطوح مختلف دارای تفاوت می‌باشد و همچنین دامنه جریان خطا در طول زمان یکسان نیست. در ابتدای نیمه سیکل مثبت، جریان دارای مقدار کوچک است و این مقدار به کندی افزایش می‌یابد و پس از یک آستانه ولتاژ (معمولاً ۵-۷ کیلوولت) شروع به هدایت با امپدانس بالا می‌کند و تا زمان پایان پیک مثبت ادامه دارد. در نیمه منفی ولتاژ، همانند نیم سیکل مثبت، جریان در ابتدا دارای مقدار کوچک و به کندی افزایش می‌یابد. اما پس از یک آستانه ولتاژ شروع به هدایت با امپدانس بالا می‌کند. هر دو پیک بی‌آنکه متقارن باشند دارای رفتار مشابه هستند و سیکلها تشابهی با هم ندارند. به طوری که دامنه جریان خطای امپدانس بالا نیز دارای تغییرات تصادفی می‌باشد. این موضوع بیانگر تفاوت شکل موج جریان خطای امپدانس بالا در سطوح و شرایط مختلف می‌باشد.

## ۲-۵- مدل کردن خطای امپدانس بالا

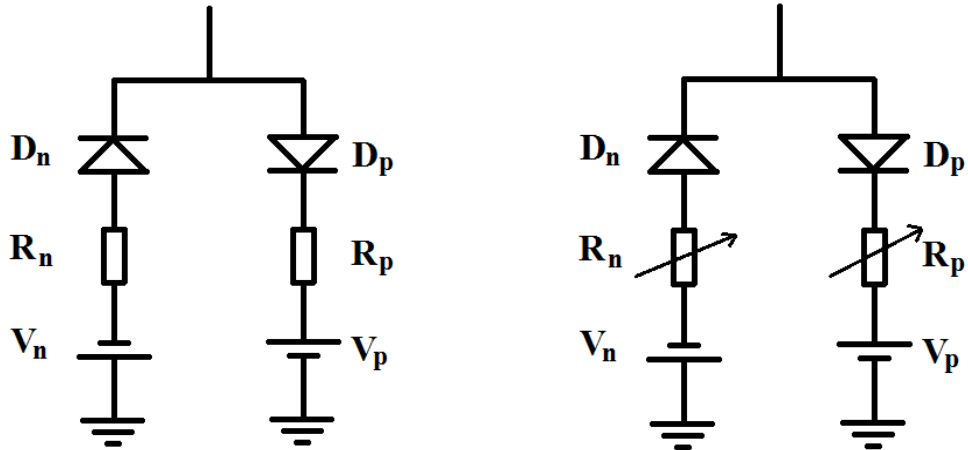
مدل‌سازی هرچه دقیق‌تر و کامل‌تر هر بخش از سیستم قدرت در شبیه‌سازی برای بررسی سیستم بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی از نتایج مهمی که از آزمایش‌های واقعی خطای امپدانس بالا می‌تواند حاصل گردد، ارائه یک مدل کامل و دارای تطبیق هر چه بیشتر با رفتار واقعی HIF می‌باشد. ماهیت کاملاً تصادفی خطای امپدانس بالا، تأثیرپذیری جریان خطا از پارامترهای گوناگون و متغیر، نظیر مقاومت زمین، مکان وقوع خطا، ساختار شبکه، رطوبت هوا، سطح تماس هادی با زمین و... ارائه مدلی کامل که دربرگیرنده همه پارامترها و شرایط باشد را دشوار ساخته است. محققین مدل‌های متعددی را ارائه نموده‌اند که هرچند کامل نیستند ولی با توجه به اینکه بر مبنای نتایج آزمایش‌های عملی هستند، حداقل‌هایی از ویژگی‌های خطا را در بر دارند.

اولین مدل خطای امپدانس بالا ارائه شده در سال ۱۹۸۵ تنها با یک مقاومت در محل خطا ارائه شد [۵]. اما در سال ۱۹۹۰ با توجه به وجود قوس الکتریکی در خطای امپدانس بالا مدلی با ماهیت قوس الکتریکی ارائه شد [۶]. این مدل دارای دو دیود و دو منبع ولتاژ DC به طور معکوس باهم موازی

شده همراه با امپدانس سری با آن تشکیل شده است. دو دیود به همراه دو منبع DC آستانه ولتاژ هدایت جریان قوس الکتریکی را تعیین و امپدانس موجود جریان خطا را کنترل می کند.

در سال ۱۹۹۳ دو مقاومت غیرخطی در شاخه های منابع DC، جایگزین امپدانس کنترل جریان

شد [۷]. در سال ۲۰۰۵ همین آرایش با مقاومت های ثابت و متفاوت در دو مسیر موازی ارائه شد [۸].

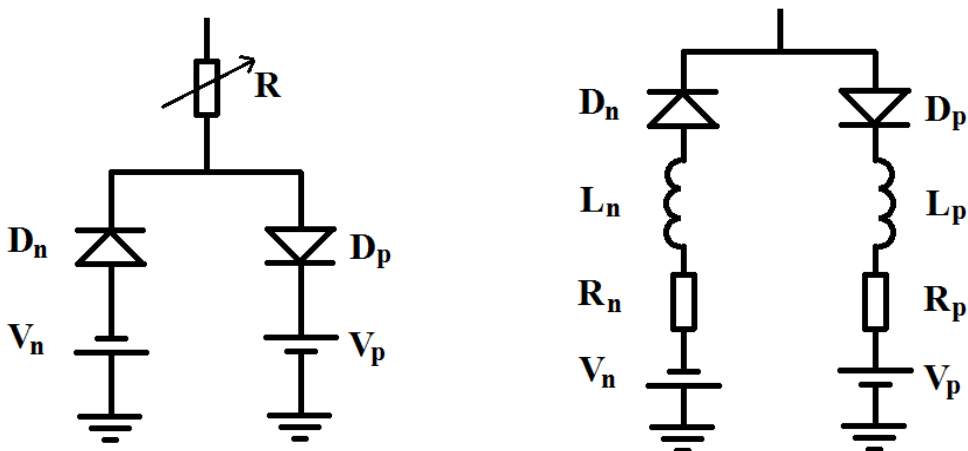


شکل (۷-۲): مدل HIF بر طبق مرجع [۷]. شکل (۸-۲): مدل HIF بر طبق مرجع [۸].

بعضی از مقاله ها در مسیرهای دیودی از یک سلف سری با مقاومت استفاده می کنند [۹]. مرجع

[۱۰] از یک مقاومت متغیر قابل کنترل به جای مقاومت متغیر در دو مسیر استفاده کرده است. این

کنترل کنندگی باعث می گردد تا تغییرات دامنه جریان خطا قابل تغییر باشد [۱۱].



شکل (۹-۲): مدل HIF بر طبق مرجع [۹]. شکل (۱۰-۲): مدل HIF بر طبق مرجع [۱۰].

علاوه بر رویکردهای الکتریکی برای مدل خطای امپدانس بالا از رویکرد دینامیکی به واسطه روابط دینامیکی قوس الکتریکی نیز می‌توان بهره برد. برای این منظور از یک مقاومت متغیر به عنوان امپدانس متغیر خطای امپدانس بالا استفاده می‌شود. مقدار این مقاومت متغیر با استفاده از روابط دینامیکی زیر محاسبه می‌شود [۱۲].

$$g = \int \frac{1}{\tau} (G - g) dt \quad (1-2)$$

$$G = \frac{|i|}{u_{st}} \quad (2-2)$$

$$u_{st} = (u_0 + r|i|)l \quad (3-2)$$

$$R = \frac{1}{g} \quad (4-2)$$

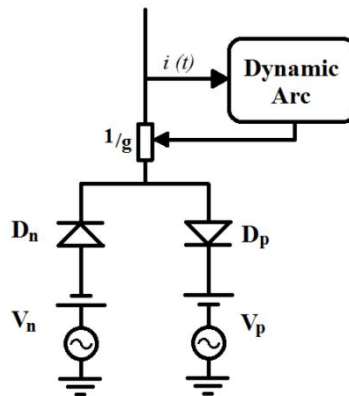
در روابط بالا  $g$  رسانایی قوس الکتریکی متغیر با زمان،  $G$  ثابت هدایت قوس الکتریکی،  $\tau$  ثابت زمانی،  $u_{st}$  ثابت ولتاژ قوس الکتریکی،  $u_0$  ثابت ولتاژ قوس در طول،  $r$  مقاومت طولی قوس،  $i$  جریان قوس الکتریکی و  $l$  طول قوس الکتریکی می‌باشد.

مرجع [۱۳] از روابط دینامیکی در کنار کلید زنی وقوع HIF بهره برده است. مرجع [۱۴] با در نظر گرفتن تغییرات تصادفی ۱۵ درصد حول مقدار ثابت برای ثابت ولتاژ قوس الکتریکی، به خطای امپدانس بالا ویژگی تصادفی دامنه جریان را افزوده است.

علاوه بر دو رویکرد الکتریکی و دینامیکی، رویکرد ترکیبی از هر دو نیز وجود دارد. مزیت رویکرد ترکیبی پوشش بیشتر ویژگی قوس الکتریکی با نتایج آزمایش‌های واقعی می‌باشد. همچنین با وجود دو مسیر دیودی می‌توان عدم تشابه نیم سیکل مثبت و منفی خطای امپدانس بالا را نیز پوشش داد.

مرجع [۱۵] با قرار دادن مقاومت متغیر بر مبنای روابط دینامیکی قوس الکتریکی در خارج از دو مسیر دیودی این رویکرد را برای مدل سازی HIF انجام داده است. البته در مدل ارائه شده دو منبع سینوسی نیز با منابع مستقیم سری شده است که باعث می‌شود، دامنه جریان HIF دارای تغییرات

گردد که این امر مطابق با ویژگی جریان خطای امپدانس بالای واقعی می‌باشد. در مرجع [۱۶] به جای دو منبع سینوسی از دو منبع DC با مقادیر متغیر و تصادفی بهره گرفته شده تا هم تغییر دامنه جریان وجود داشته باشد و هم ویژگی متغیر بودن تصادفی دامنه جریان نیز ایجاد گردد.



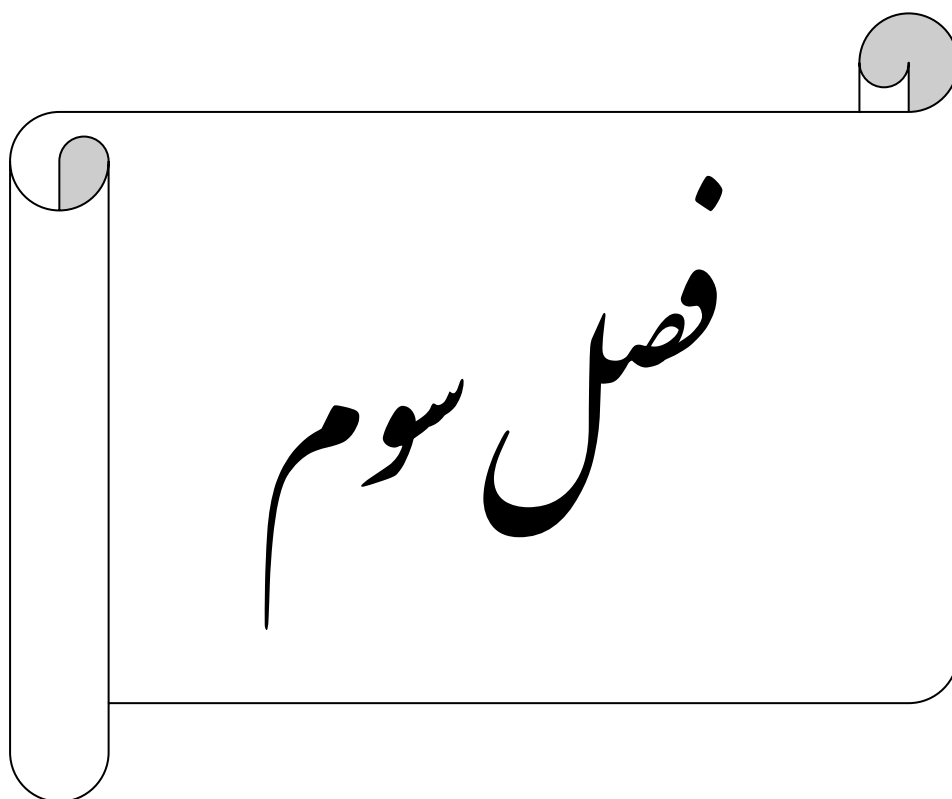
شکل (۲-۱۱): مدل خطای امپدانس بالا مرجع [۱۵].

در بعضی از حالت‌های رخداد خطای امپدانس بالا، مسیر وقوع خطا دارای امپدانس کاهشی در چند سیکل می‌باشد که می‌تواند با یک مقاومت کاهشی سری با مدل‌های بیان شده استفاده گردد [۱۷]. از این رو قرار دادن این ویژگی HIF در مدل‌های ارائه شده برای تشخیص خطای امپدانس بالا حائز اهمیت نمی‌باشد.

## ۲-۶- جمع‌بندی

در این فصل ماهیت رخداد خطای امپدانس بالا انواع و چگونگی وقوع آن بیان گردید. همچنین تاریخچه‌ای از انواع رویکردهای مدل‌های استفاده شده برای شبیه‌سازی خطای امپدانس بالا با خلاصه‌ای از مزایا و معایب هر یک بیان شد. در فصل بعد رویکردهای تشخیص خطای امپدانس بالا توسط محققین بررسی خواهد شد.





روش‌های موجود تشخیص خطای امیدانس بالا

## فصل ۳ - روش‌های موجود تشخیص خطای امپدانس بالا

### ۳-۱- مقدمه

همان طور که در فصل قبل بیان شد از ویژگی‌های معمول خطای امپدانس بالا جریان عبوری کم و وجود قوس الکتریکی می‌باشد. ممکن است تصور شود با توجه به اینکه جریان عبوری در اکثر مواقع کوچک است نباید اهمیت تشخیص خطای امپدانس بالا زیاد مهم باشد! اما این گفته درست نیست بلکه هدف اصلی از آشکارسازی خطاهای امپدانس بالا حفاظت از جان انسان‌ها و جلوگیری از بروز آتش‌سوزی است [۱]. در واقع هنگامی که چنین خطایی رخ می‌دهد، ممکن است هادی برق‌دار در دسترس انسان‌ها و حیوانات قرار بگیرد و موجب برق‌گرفتگی و حتی مرگ شود. همچنین به دلیل آنکه بروز این نوع خطاها معمولاً همراه با قوس الکتریکی است، ممکن است موجب بروز آتش‌سوزی گردد که در نتیجه خسارت‌های جانی و مالی را به بار می‌آورند. لازم به ذکر است جلوگیری از هدر رفتن انرژی طی وقوع خطای امپدانس بالا جزء اهداف ثانویه برطرف کردن چنین خطاهایی محسوب می‌شود.

در تشخیص خطای امپدانس بالا باید به دو نکته توجه شود، نکته اول آنکه در صورتی که سیستم تشخیص HIF نتواند خطا را تشخیص دهد هزینه بی‌فایده‌ای صرف شده که نتوانسته اهدافی همچون آتش‌سوزی و حفاظت جان انسان‌ها را برآورده کند. نکته دوم آنکه در صورتی که سیستم اعلام HIF را به اشتباه اعلام کند علاوه بر صرف هزینه انسانی برای رفع خطای کاذب باعث قطعی برق و پایین آمدن قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. در نتیجه تشخیص درست این رخداد اهمیت ویژه‌ای دارد.

تشخیص HIF توسط تجهیزات حفاظتی متداول موجود در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی امری دشوار است، چرا که وقوع آن تنها منجر به افزایش کمی در مقدار جریان فیدر می‌شود که معمولاً به اشتباه به صورت افزایش معمول در میزان جریان بار تلقی می‌شود. اما علاوه بر این مشکل،

در مسیر تشخیص با تحلیل ویژگی‌های خطای امپدانس بالا مشاهده می‌گردد که طیف فرکانسی HIF با دیگر پدیده‌های موجود در شبکه قدرت هم پوشی دارد. پدیده‌هایی همچون کلید زنی بارهای الکتریکی مختلف، کلید زنی بانک خازنی، انواع بارهای غیرخطی (دیودی- تریستوری و غیره)، کوره‌های قوس الکتریکی و همه پدیده‌هایی که در طیف فرکانسی تأثیر دارند باعث دشواری تشخیص خطای امپدانس بالا و تمیز دادن این پدیده‌ها با وقوع HIF می‌گردند. باین‌وجود، راه‌حل‌های موثر و گوناگونی برای تشخیص این نوع خطا با استفاده از ابزارها مختلف وجود دارد. در این فصل انواع روش‌های تشخیص خطای امپدانس بالا توسط محققین بر اساس ابزارهای به‌کاررفته و ویژگی‌های استخراج شده در تشخیص، انواع روش‌ها به دو دسته کلی رویکردهای کلاسیک و رویکردهای مدرن دسته‌بندی شده است و در ادامه این دو دسته به طور کامل توضیح داده می‌شود.

### **۳-۲- رویکردهای کلاسیک در تشخیص HIF**

در رویکردهای کلاسیک عموماً تکنیک‌ها و تحلیل‌های پیچیده برای تشخیص وجود ندارد، بلکه تا حد امکان با ارتقای سیستم‌های حفاظتی قبلی، حتی استفاده از الگوریتم ساده با عبور شاخص تمایز از یک حد آستانه اعلام کننده وقوع خطا می‌باشند. در ادامه چند نمونه از رویکردها مطرح می‌گردد.

#### **۳-۲-۱- استفاده از جریان نول**

ابتدایی‌ترین رویکردها برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده از تجهیزات حفاظتی موجود در شبکه و بعضاً ارتقای این تجهیزات می‌باشد. در همین راستا محققین یک الگوریتم برای رله آشکارساز خطای امپدانس بالا متناسب با رله‌های الکترومکانیکی پیشنهاد داده‌اند [۱۸]. رله زمین درصدی یک رله الکترومکانیکی می‌باشد که از جریان عدم تعادل در شبکه چهار سیمه توزیع برای آشکارسازی استفاده می‌کند. رله تناسبی نیز یک روش دیگر مبنی بر شبکه توزیع چهار سیمه زمین شده می‌باشد [۵]. این روش نیز در صورت خروج تعادل جریان خط و زمین و نول از یک نسبت تنظیم شده که ناشی از وجود خطا می‌باشد وقوع HIF را اعلام می‌کند. ایراد وارد بر این نوع روش‌ها قابل اجرا

نبودن در شبکه توزیع سه سیمه می‌باشد. از این رو محققین به سمت رفتارهای فرکانسی و تأثیر ویژگی خطا امپدانس بالا بر روی طیف فرکانسی گرایش پیدا کردند.

### ۳-۲-۲- استفاده از دامنه و فاز هارمونیک‌ها

در تشخیص خطای امپدانس بالا علاوه بر استفاده مستقیم از سیگنال اصلی ولتاژ و جریان فیدر (و حتی نول در خطوط چهار سیمه) می‌توان از هارمونیک‌های سیگنال‌ها نیز بهره برد. محققین از روش‌هایی بر اساس ضرایب سوم و پنجم و ... هارمونیک سیگنال‌های گذرنده از فیدرهای پست‌های توزیع در بدست آوردن معادلات مرتبط با عدم تعادل جهت تشخیص خطای امپدانس بالا پیشنهاد کرده‌اند. اما استفاده صرف از هارمونیک‌های فرد به دلیل مشترک بودن ایجاد هارمونیک فرد در HIF و بیشتر اجزا در سیستم قدرت، توانایی تشخیص درست خطای امپدانس بالا را به شدت کاهش می‌دهد. مرجع [۱۹] از نسبت اندازه هارمونیک دوم به اصلی نیز در کنار ویژگی هارمونیک‌های فرد بهره برده است.

نسبت گیری یکی دیگر از روش‌های انتخاب شاخص تشخیص می‌باشد. مرجع [۲۰] از انواع نسبت‌های مقدار DC و هارمونیک اول و دوم بهره برده است. مرجع [۲۱] از نسبت هارمونیک‌های زوج استفاده کرده است. مرجع [۱۰] علاوه بر مقدار موثر هارمونیک دوم، سوم و پنجم از اختلاف فاز هارمونیک سوم نیز کمک گرفته است. همچنین در مرجع [۲۲] علاوه بر استفاده از دامنه هارمونیک سوم و نسبت هارمونیک سوم و پنجم به اول از اختلاف فاز هارمونیک سوم نیز استفاده کرده است.

### ۳-۲-۳- استفاده از ویژگی‌های رفتاری HIF

خطای امپدانس بالا ویژگی‌های رفتاری خاصی از خود نشان می‌دهد که این ویژگی‌ها بر روی سیگنال‌های ولتاژ و جریان فیدر تأثیر می‌گذارد و می‌تواند در تشخیص خطای امپدانس بالا موثر واقع گردد. سه ویژگی مورد استفاده در ادامه بیان می‌شود:

**ویژگی رفتاری اول:** همانطور که در بخش ۲-۴ بیان شد، جریان خطای امیدانس بالا دارای دامنه متغییر و تصادفی می‌باشد. از این رو سیگنال‌های فیدر نیز به نسبتی رفتار تصادفی به خود می‌گیرند که می‌تواند در تشخیص HIF به عنوان یک شاخص مورد استفاده قرار گیرد. مرجع [۲۳] در کنار شاخص‌های دیگر از این شاخص نیز بهره برده است.

**ویژگی رفتاری دوم:** شکل موج جریان خطای امیدانس بالا در نیم سیکل مثبت و منفی یکسان نمی‌باشد. از این رو سیگنال‌های فیدر نیز به نسبتی رفتار عدم تقارن نیم سیکل مثبت و منفی به خود می‌گیرند. مرجع [۲۴] در کنار شاخص‌های دیگر از این شاخص نیز بهره برده است.

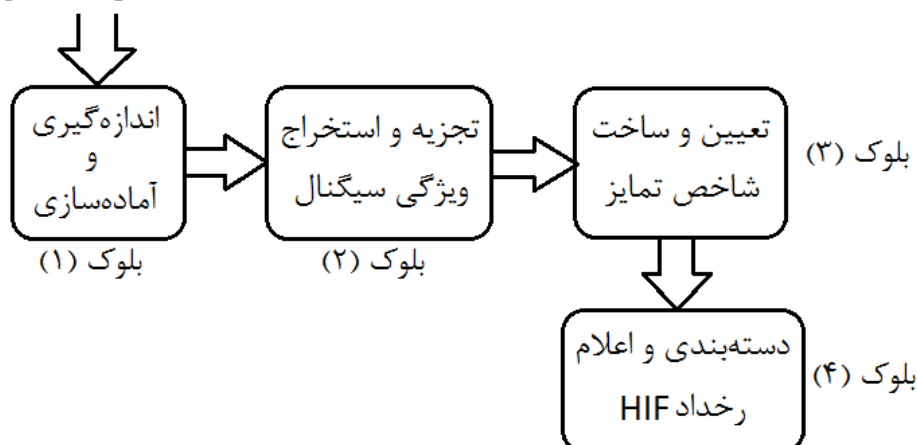
**ویژگی رفتاری سوم:** با توجه به اینکه خطای امیدانس بالا در طول مدت زمان طولانی تر نسبت به حوادث زودگذر تداوم دارد (به طور مثال تاثیر کلیدزنی بانک خازنی در تعداد سیکل طولانی ادامه‌دار نیست)، تاثیر خطای امیدانس بالا بر روی سیگنال‌های فیدر نیز متداوم و محدود به چند سیکل نمی‌باشد. از این رو می‌توان در تشخیص HIF مورد استفاده قرار گیرد. این امر در بیشتر الگوریتم‌ها به صورت گذر از تعداد سیکل مشخص مرور می‌گردد.

مرجع [۲۵] نسبت انرژی مؤلفه‌های دو تا ده کیلوهرتز به انرژی متوسط سیگنال در یک سیکل را در کنار ویژگی تصادفی و تداوم دار بودن برای تشخیص HIF به کار برده است. این الگوریتم در سه مرحله کاندیدای خطای امیدانس بالا را انتخاب می‌کند. در مرحله نسبت انرژی در یک سیکل محاسبه می‌شود در صورت عبور از حد آستانه وارد مرحله بعد می‌شود. مرحله دوم تعداد سیکل‌های عبور از آستانه نسبت انرژی شمارش می‌شود و در صورت عبور از حد مجاز در مرحله سوم انحراف معیار تصادفی بودن سیگنال را بررسی می‌کند و در صورت عبور از حد آستانه، در نهایت وقوع HIF را اعلام می‌کند.

### ۳-۳- رویکردهای مدرن در تشخیص HIF

رویکردهای مدرن عموماً بر روی پردازش جزئیات سیگنال‌های اندازه‌گیری شده بیشتری تکیه دارد و همچنین کمتر از الگوریتم آستانه که در رویکردهای کلاسیک متداول تر است استفاده می‌شود و به جای آن از روش‌هایی هوشمند همچون شبکه عصبی برای دسته‌بندی خطا بهره گرفته می‌شود. عموماً روند تشخیص خطای امیدانس بالا در روش‌های مدرن را به چهار قسمت می‌توان تقسیم نمود. این چهار قسمت شامل اندازه‌گیری و آماده‌سازی سیگنال فیدر، ابزار تجزیه و استخراج ویژگی‌های سیگنال، تعیین و ساخت شاخص تمایز و دسته‌بندی می‌باشد که در شکل (۳-۱) این روند در چهار بلوک نشان داده شده است. در ادامه کارهای انجام شده توسط محققین بیان می‌شود.

سیگنال‌های فیدر



شکل (۳-۱): روند تشخیص HIF در رویکرد مدرن.

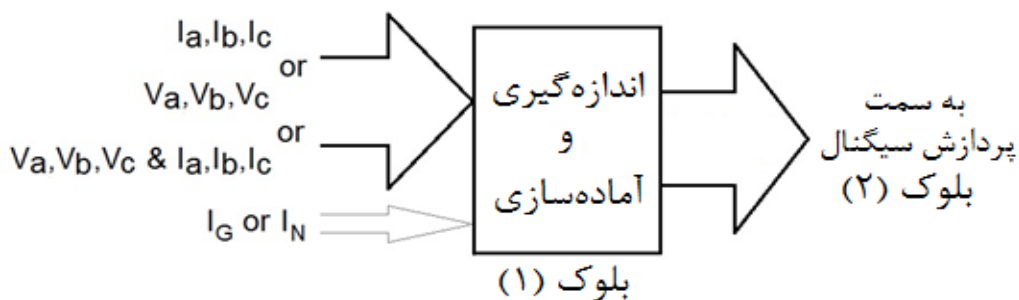
### ۳-۳-۱- اندازه‌گیری و آماده‌سازی

اساسی‌ترین وظیفه این بخش، اندازه‌گیری دقیق سیگنال ورودی می‌باشد. با توجه به نوع شاخص انتخابی بر پایه روش تشخیص خطای امیدانس بالا سیگنال ورودی مورد استفاده در روش بیان شده می‌تواند هر یک از:

- جریان سه فاز فیدر
- ولتاژ سه فاز فیدر

• جریان و ولتاژ سه فاز فیدر

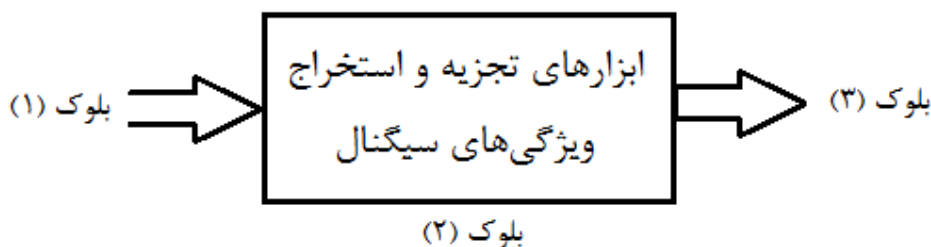
و در صورت چهار سیمه بودن خطوط توزیع با توجه به روش تشخیص از جریان زمین و جریان نول نیز به عنوان ورودی می‌تواند انتخاب گردد. به طور مثال در روش مرجع [۱۵] ولتاژ و جریان فاز مورد نیاز می‌باشد و یا مرجع [۲۶] فقط ولتاژ و مرجع [۲۷] فقط اندازه‌گیری جریان مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به نوع روش تشخیص HIF این بلوک می‌تواند علاوه بر وظیفه اندازه‌گیری و آماده‌سازی سیگنال ورودی وظیفه ذخیره چندین سیکل از سیگنال اندازه‌گیری را نیز داشته باشد.



شکل (۲-۳): بلوک (۱) اندازه‌گیری و آماده‌سازی.

### ۳-۲-۳- ابزارهای تجزیه و استخراج ویژگی سیگنال

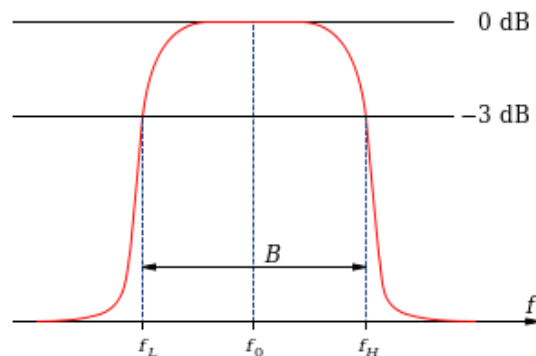
پس از اندازه‌گیری و آماده‌سازی اولیه سیگنال‌های فیدر باید به واسطه ابزارهایی ویژگی‌های از قبیل دامنه و فاز هارمونیک‌های زوج و فرد سیگنال را استخراج نمود. این امر توسط ابزارهای متفاوتی توسط محققین صورت گرفته است که در ادامه به بیان چند مورد از ابزارهای به کار رفته در تشخیص خطای امپدانس بالا اشاره و معرفی می‌شود.



شکل (۳-۳): بلوک (۲) تجزیه و استخراج ویژگی سیگنال.

### ۳-۳-۲-۱ - فیلترهای متداول

از ابتدایی‌ترین روش برای جداسازی بخشی از فرکانس یک سیگنال برای تشخیص ویژگی آن بخش از فرکانس، استفاده از فیلتر میان‌گذر<sup>۱</sup> می‌باشد. این فیلتر با فرکانس گذر و پهنای باند، تعریف و قابل اجرا می‌باشد [۲۴].



شکل (۳-۴): فرکانس عبور فیلتر میان‌گذر.

### ۳-۳-۲-۲ - فیلتر کالمن<sup>۲</sup>

فیلتر کالمن یک الگوریتمی است که با استفاده از یک سری داده‌های اندازه‌گیری شده در طول زمان حاوی اغتشاش یک برآورد آماری از سیگنال را تخمین<sup>۳</sup> می‌زند. از این رو از این ابزار به عنوان تخمین‌گر هارمونیک‌های سیگنال ورودی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. مرجع [۲۸-۲۹] از این ابزار برای استخراج دامنه هارمونیک‌های فرد ۱ تا ۱۳ جریان استفاده کرده است. در این روش داده اصلی سیگنال با یک تابع تطبیق داده می‌شود و عدم تطبیق به عنوان نویز در نظر گرفته می‌شود. مرجع [۲۰] برای استخراج هارمونیک اول و دوم از فیلتر کالمن استفاده کرده است.

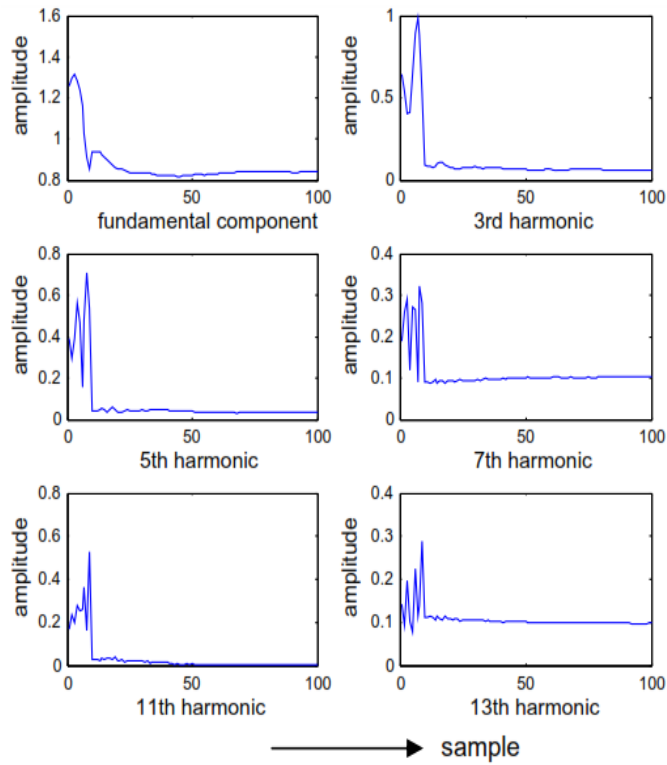
به طور مثال خروجی تخمین دامنه هارمونیک سیگنال جریان طی صد مرحله برای خطا امپدانس بالا در شکل (۳-۵) و بار غیرخطی در شکل (۳-۶) آورده شده است.

<sup>1</sup> Band pass filter

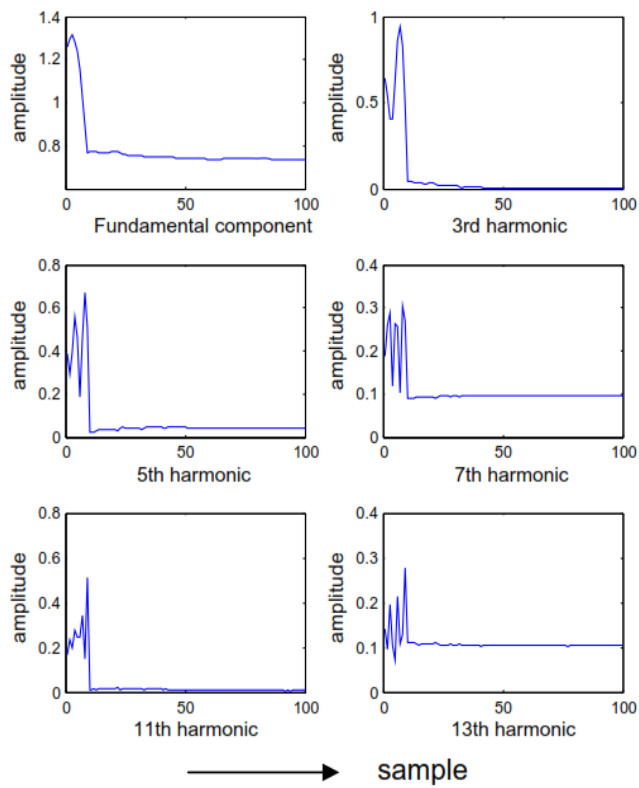
<sup>2</sup> Kalman Filter

<sup>3</sup> Estimation





شکل (۳-۵): دامنه هارمونیک‌ها سیگنال جریان شامل خطا HIF [۲۸].



شکل (۳-۶): دامنه هارمونیک‌ها سیگنال جریان برای بار غیرخطی [۲۸].

یکی از روش‌های دستیابی به اطلاعات محتوای فرکانسی سیگنال استفاده از تبدیل فوریه می‌باشد. در صورتی که داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت دیجیتال باشد باید از تبدیل فوریه گسسته<sup>۲</sup> بهره برد. از آن‌رو که سرعت محاسبه تبدیل فوریه گسسته کند است از انواع تبدیل فوریه سریع<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. مرجع [۱۱، ۱۹] برای دستیابی هارمونیک دوم و سوم سیگنال جمع ولتاژ و جمع جریان از تبدیل فوریه گسسته با نرخ نمونه‌گیری یک کیلوهرتز بهره برده است. مرجع [۳۰] از هر سیکل ولتاژ و جریان تبدیل فوریه سریع می‌گیرد تا بتواند به هارمونیک سوم و پنجم سیگنال ولتاژ و جریان دست پیدا کند.

در بسیاری از کارهای پردازش سیگنال با توجه به نایستای<sup>۴</sup> بودن (متغیر با زمان بودن فرکانس سیگنال) سیگنال اصلی و نویزهای تحمیلی، لازم است علاوه بر اطلاع از محتوای فرکانسی یک سیگنال، از توزیع زمانی مؤلفه‌های فرکانسی آن نیز اطلاع داشت. روش تبدیل فوریه زمان کوتاه<sup>۵</sup> می‌تواند با ضرب تابع در یک تابع پنجره و گرفتن تبدیل فوریه، اطلاعات فرکانسی در بازه زمانی تابع پنجره بدست آورد. با مقیاس پذیر کردن تابع پنجره در تبدیل فوریه زمان کوتاه، روش تبدیل فوریه زمان کوتاه اصلاح شد و حاصل کار را تبدیل S می‌نامند. مرجع [۳۱] از مقادیر خروجی تبدیل S ویژگی‌های آماری را استخراج و به عنوان شاخص در روش تشخیص HIF به کار می‌گیرد. یک نوع تبدیل زمان به زمان به نام تبدیل TT وجود دارد که تبدیل فوریه معکوس تبدیل S است و سری زمانی یک بعدی را به صورت دو بعدی در صفحه زمان-زمان نشان می‌دهد. مرجع [۳۲-۳۳] از این ابزار برای استخراج ویژگی‌های سیگنال اندازه‌گیری شده بهره برده است.

<sup>1</sup> Fourier Transform

<sup>2</sup> Discrete Fourier transform

<sup>3</sup> Fast Fourier Transform

<sup>4</sup> Non-stationary

<sup>5</sup> Short-time Fourier transform

### ۳-۳-۲-۴ - تبدیل موجک WT<sup>۱</sup>

امواج متناوب با دوره‌های نامحدود عموماً به کمک تبدیل فوریه به شکل موج‌های مختلف با فرکانس‌های متفاوت تجزیه می‌شوند. به طور مشابه تبدیل موجک یک سیگنال را به سیگنال‌های شیفت داده شده و تغییر مقیاس یافته از یک سیگنال اصلی تبدیل می‌کند. موجک یک شکل موج محدود زمانی با یک مقدار متوسط برابر با صفر است. تبدیل موجک برای تحلیل شکل موج‌های کوتاه‌مدت، نامتقارن و نوسانی بسیار کاربردی است همچنین برای تحلیل بازه‌های طولانی و کوتاه‌مدت یک شکل موج نیز مناسب می‌باشد به طوری که هم اطلاعات مربوط به فرکانس‌های بالا و هم اطلاعات مربوط به فرکانس‌های پایین در تبدیل موجک باقی می‌ماند. بنابراین تبدیل موجک دارای خاصیت چند وضوحی<sup>۲</sup> است و برای تحلیل سیگنال‌های گذرا بسیار مناسب است.

تبدیل موجک پیوسته<sup>۳</sup> (CWT) به صورت جمع حاصل ضرب سیگنال زمانی در تغییر مقیاس یافته و شیفت داده شده تابع اصلی موجک تعریف می‌شود. نتیجه تبدیل موجک پیوسته ضرایب زیادی هستند که تابعی از تغییر مقیاس و وضعیت سیگنال می‌باشند. شکل گسسته تبدیل موجک به تبدیل موجک گسسته<sup>۴</sup> (DWT) مشهور است و به صورت رابطه (۳-۱) تعریف می‌شود [۳۴].

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x[n] \cdot g\left[\frac{k - na_0^m}{a_0^m}\right] \quad (۳-۱)$$

در رابطه (۳-۱)  $x[n]$  سیگنال مورد تحلیل،  $g(n)$  تابع موجک مادر<sup>۵</sup>،  $a_0$  و  $k$  ضرایب مقیاس و  $m$ ،  $n$  عضو اعداد حقیقی می‌باشند.

در واقع تبدیل موجک گسسته مشابه یک سری فیلترهای میان‌گذر با فرکانس‌های مرکزی متغیر می‌باشد. این فرکانس‌های مرکزی می‌توانند بوسیله تغییر مقیاس و شیفت زمانی در تابع موجک مادر

<sup>۱</sup> Wavelet Transform

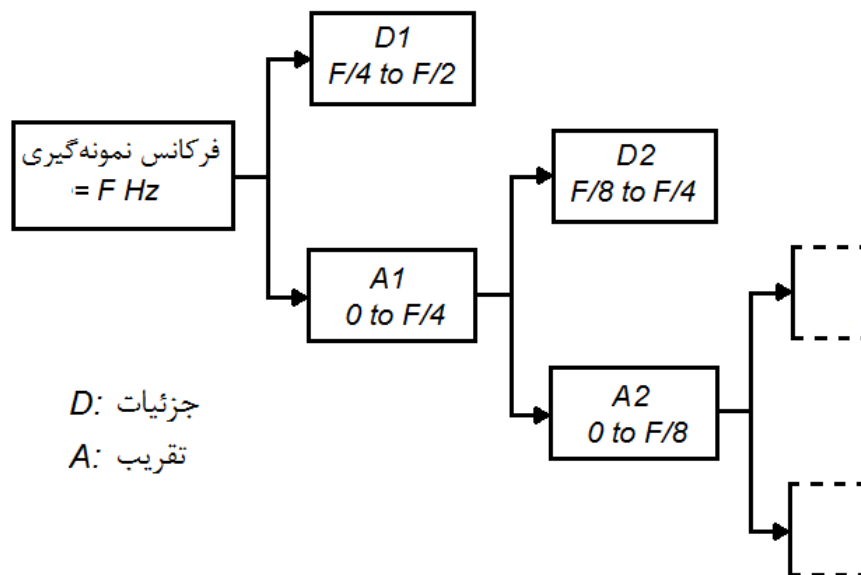
<sup>۲</sup> Multi-Resolution

<sup>۳</sup> Continuous Wavelet Transform

<sup>۴</sup> Discrete Wavelet transform

<sup>۵</sup> Mother wavelet

تغییر پیدا کنند. خروجی چند سطحی جزئیات<sup>۱</sup> در هر مرحله با شکستن بازه فرکانسی به دو نیمه، جزئیات بیشتر را در خروجی خود ظاهر می‌کند [۳۵]. تبدیل موجک می‌تواند در استخراج سیگنال‌های ناخواسته و اجزای فرکانسی گذرا در یک شکل موج بسیار مناسب باشد.



شکل (۷-۳): دیاگرام چند وضوحی.

مقاله‌های زیادی برای استخراج ویژگی‌های سیگنال از تبدیل موجک بهره برده‌اند. تفاوت این مقاله‌ها در استفاده از نوع موجک مادر و سطوح جزئیات به کار رفته می‌باشد. به طور مثال لیست موجک‌های مادر استفاده شده در بخشی از مقالات در جدول (۱-۳) آورده شده است.

جدول (۱-۳): موجک مادر استفاده شده در برخی از مراجع برای استخراج ویژگی.

موجک مادر	شماره مرجع
Db <sup>۴</sup>	[۲۶]، [۳۶]، [۳۷]
Db5	[۳۶]
Db14	[۳۸]، [۳۹]، [۴۰]، [۳۵]
Db20	[۴۱]
Rbio <sup>۳</sup> 3.1	[۴]

<sup>۱</sup> Detail

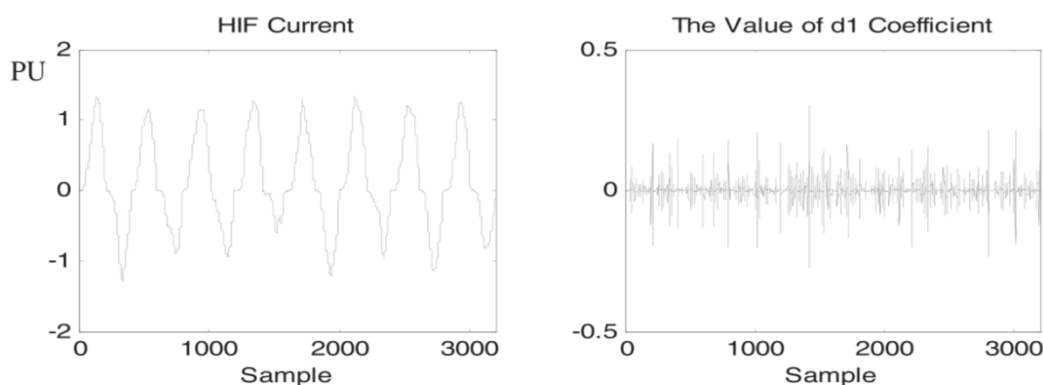
<sup>۲</sup> Daubechies

<sup>۳</sup> Biorthogonal

Rbio3.3	[۴۲]
Sym <sup>1</sup> 8	[۱۶]

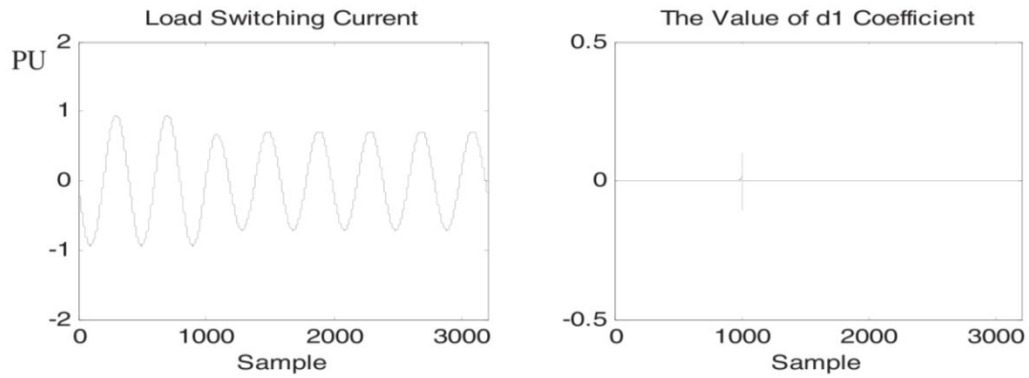
مقاله [۴۱] از روش تبدیل موجک گسسته برای تجزیه سیگنال اندازه‌گیری شده مجموع جریان فازها با موجک مادر Db20 بهره برده است و یا مقاله [۴۲] پس از بررسی چند نوع موجک مادر، موجک Rbio3.3 را انتخاب کرده است.

خروجی تبدیل موجک با توجه به نوع سیگنال ورودی می‌تواند دارای شباهت‌های رفتاری یکسان باشد به گونه‌ای که پرش سیگنال‌های متفاوت در سطحی از تبدیل موجک، مشابه هم باشد. در این صورت با استفاده از تبدیل موجک می‌توان پرش‌های هر سیگنال را شناسایی و حتی شمارش کرد. برای یافتن تشابه‌ها و تفاوت‌ها باید از انواع مختلف سیگنال‌های در دسترس تبدیل موجک گرفت و خروجی جزئیات را در کنار هم مقایسه و تحلیل نمود. به طور مثال در مرجع [۱۶] سیگنال جریان چندین مصرف‌کننده در کنار جریان خطای امپدانس بالا به همراه خروجی تبدیل موجک با موجک مادر 8 Sym مورد تحلیل قرار داده است. در شکل (۸-۳) جریان خطای امپدانس بالا و در شکل (۹-۳) کلید زنی بار در کنار خروجی جزئیات سطح ۱ تبدیل موجک آورده شده است.



شکل (۸-۳): جریان HIF و خروجی تبدیل موجک [۱۶].

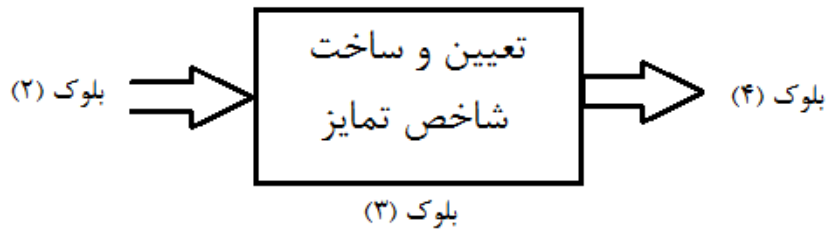
<sup>1</sup> Symlets



شکل (۹-۳): جریان کلید زنی و خروجی تبدیل موجک [۱۶].

### ۳-۳-۳- تعیین و ساخت شاخص تمایز

پس از تجزیه و تحلیل سیگنال اندازه گیری شده نوبت به استخراج ویژگی های تمایز بین حالت های کارکرد عادی شبکه و حالت های مختلف HIF می باشد.



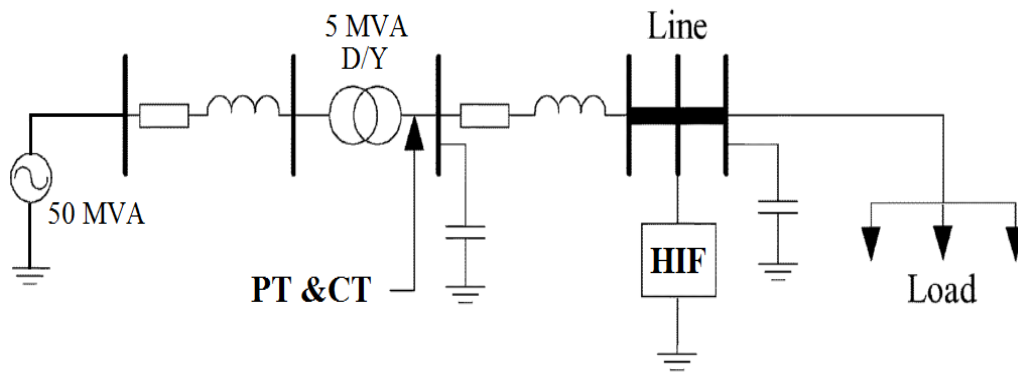
شکل (۱۰-۳): بلوک (۳) تعیین و ساخت شاخص تمایز.

یافتن وجه تمایز مابین حالت کار عادی و حالت وقوع خطای امپدانس بالا با چالش های ذیل مواجه است:

- به دلیل کوچک بودن جریان عبوری خطای امپدانس بالا تأثیر آن بر روی شبکه ( بر روی ولتاژ و جریان فیدر) بسیار کم است.
- به دلیل ماهیت غیرخطی و تصادفی خطای امپدانس بالا، ویژگی های نزدیک به بارهای الکتریکی غیرخطی از خود بروز می دهد.
- به دلیل تاثیر خطای امپدانس بالا بر روی طیف وسیعی از فرکانس، ویژگی های مشترک اجزا و رخداد های شبکه را از خود بروز می دهد.

از این رو فقط با دسترس بودن ولتاژ و جریان فیدر و بعضاً در خطوط چهار سیمه جریان سیم چهارم، باید شاخص و معیاری مناسب برای تفکیک پذیری خطای امپدانس بالا از کارکرد عادی شبکه انتخاب نمود.

بهترین کار برای یافتن شاخص مناسب، بررسی جریان و ولتاژ فیدر با وجود خطا و بدون وجود خطا در یک سیستم واقعی می‌باشد اما به دلیل اینکه نمی‌توان انواع خطای امپدانس بالا را بر روی شبکه آزمایش نمود باید به سراغ یک سیستم شبیه‌سازی شده رفت. عموم محققین برای شبیه‌سازی جریان هجومی و جریان خطای داخلی از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC و یا EMTD که نرم‌افزاری مناسب و قدرتمند برای بررسی پدیده‌های گذرا در سیستم قدرت است، استفاده می‌کنند. مسلماً بررسی و آزمایش روش تشخیص خطای امپدانس بالا در شبیه‌سازی، بسیار تأثیرگذار در دقت سیستم واقعی خواهد داشت. به طور مثال شکل (۳-۱۱) یک شبکه توزیع را نشان می‌دهد که دارای بار شش پالسه و بار غیرخطی در کنار مدل خطای امپدانس بالا می‌باشد.



شکل (۳-۱۱): شبکه توزیع نمونه مورد استفاده در مرجع [۸].

در شبیه‌سازی باید اجزای مختلف از قبیل تغییر توان بار الکتریکی، تغییر نسبت مصرف بارهای صنعتی و خانگی، کلید زنی بانک خازنی و ... وجود داشته باشد. به بیان دیگر برای بررسی هرچه دقیق‌تر سیگنال‌ها، باید سیگنال ولتاژ و جریان فیدر برای هر آنچه که در یک شبکه توزیع امکان رخ

دادن آن وجود دارد مورد تحلیل قرار گیرد. سپس به واسطه تفاوت‌ها بین رخدادهای عادی و خطای HIF، وجه تمایز باید تعیین گردد.

در رویکردهای مدرن شاخص‌های تشخیص می‌تواند همانند رویکردهای کلاسیک باشد با این تفاوت که ابزار استخراج متفاوت و یا نوع استفاده از الگوریتم دسته‌بندی مدرن باشد. به طور مثال استخراج هارمونیک‌ها می‌تواند از روش فیلترهای میان‌گذر و یا روش فیلتر کالمن و حتی تبدیل فوریه باشد. از این‌رو استفاده از هارمونیک‌ها در هر دو رویکرد کلاسیک و مدرن حائز اهمیت می‌باشد. در ادامه به شاخص‌های تشخیص مختص به رویکردهای مدرن اشاره می‌گردد.

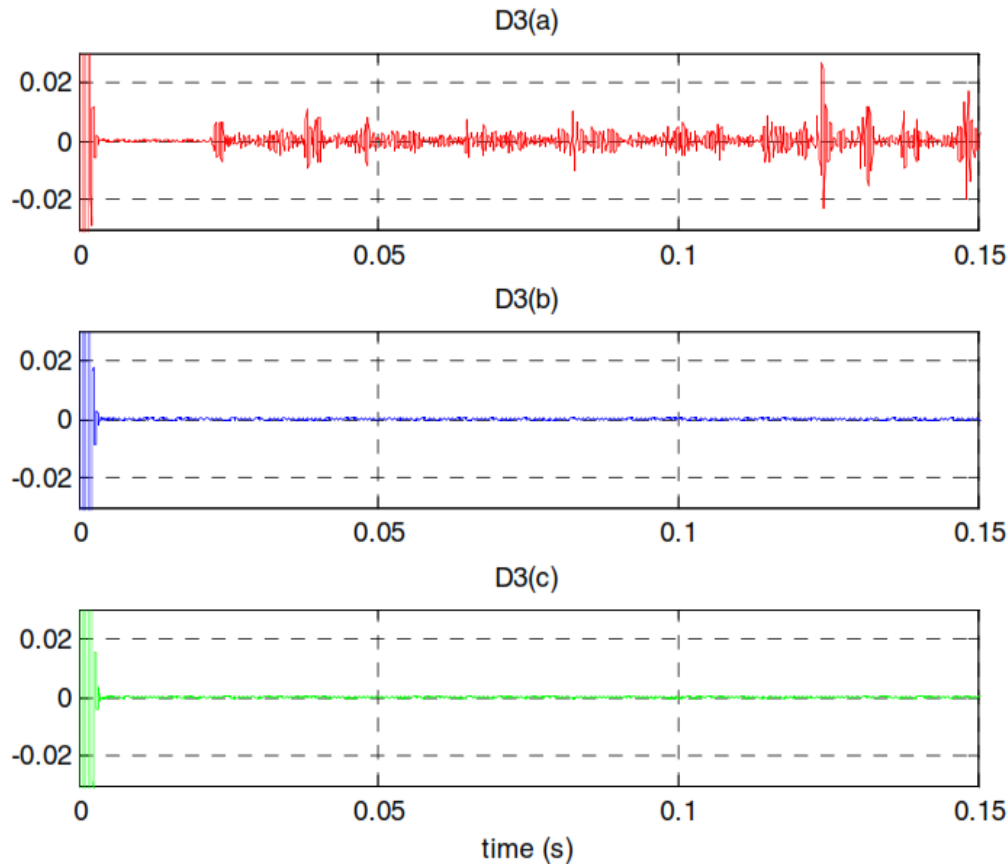
### ۳-۳-۳-۱ استفاده از مجموع قدر مطلق<sup>۱</sup> پنجره‌ای خروجی موجک

با گرفتن تبدیل موجک از سیگنال‌های فیدر و قرار دادن سطوح جزئیات خروجی در کنار هم، این نکته مشاهده می‌شود که در سطوح جزئیات خروجی بین حالت‌ها مختلف HIF و کارکردهای عادی شبکه تفاوت وجود دارد. از این تفاوت‌ها باید ویژگی را یافت که باعث تمایز خطای امپدانس بالا با کارکرد عادی شبکه شود. به طور مثال در [۳۵] خروجی جزئیات سطح ۳ (D3) از سیگنال جریان فیدر با موجک مادر Db14 را مورد بررسی قرار داده است. همان‌طور که در شکل (۳-۱۲) مشاهده می‌شود خروجی تبدیل موجک سیگنال در فاز a که وقوع خطای امپدانس بالا در آن می‌باشد دارای پرش‌های بیشتری نسبت به فاز سالم داراست. ممکن است تفاوت لحظه‌ای به خوبی تمایز را آشکار نکند، اما جمع قدرمطلق مقادارها در یک پنجره زمانی دید بهتری به یافتن تمایز دهد. مجموع قدرمطلق پنجره‌ای از رابطه (۳-۲) قابل محاسبه می‌باشد [۳۵].

---

<sup>1</sup> Absolute sum value





شکل (۳-۱۲): جزئیات D3 جریان سه فاز پس از HIF در فاز a [۳۵].

$$S[k] = \sum_{k-N+1}^k |D3[n]| \quad (۳-۳)$$

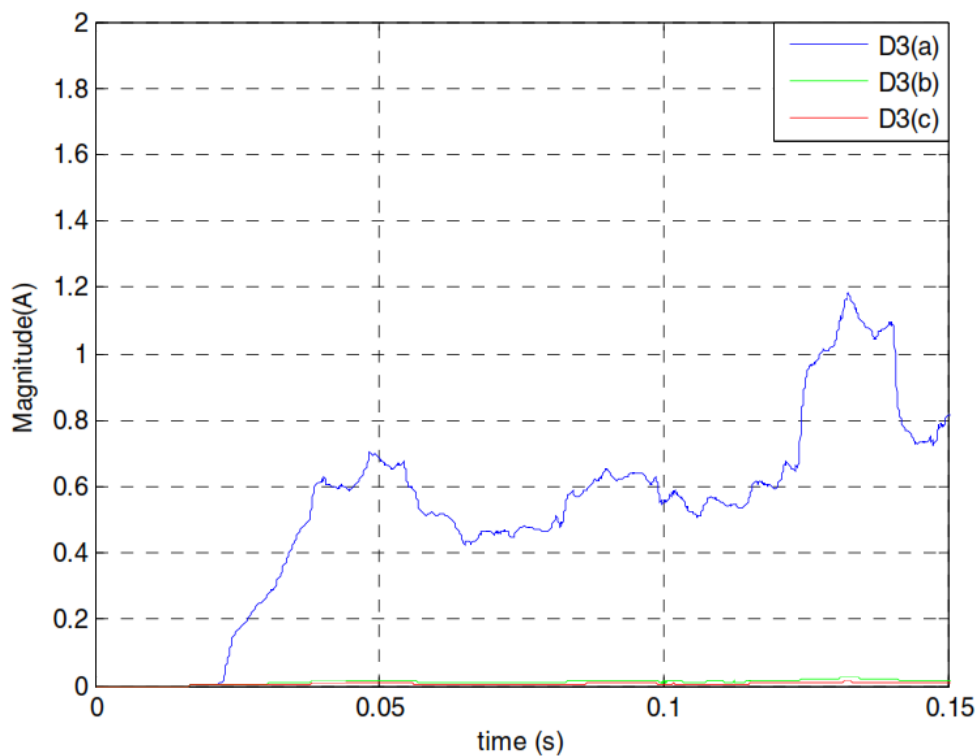
در این رابطه  $D3[n]$  خروجی جزئیات سطح سوم موجک و  $N$  طول بازه پنجره می‌باشد. در [۳۵] مجموع قدر مطلق پنجره‌ای با طول پنجره  $۱۶/۶۶$  میلی‌ثانیه انتخاب گردیده است که نتیجه آن برای جریان سه فاز در شکل (۳-۱۳) مشاهده می‌شود.

با مشاهده نتیجه مجموع قدر مطلق پنجره‌ای می‌توان گفت اندازه این شاخص در وقوع خطا از حالت عادی شبکه بیشتر می‌باشد. مقالات متعددی نیز از این تکنیک اما با موجک مادر متفاوت، سطح جزئیات متفاوت و بازه پنجره متفاوت به نتیجه مشابهی رسیده‌اند. به عنوان مثال مرجع [۴۳] از  $d1$  چندین موج مادر با طول پنجره ۶۳ نمونه استفاده کرده است و یا مرجع [۳۸] با طول پنجره ۲۰

میلی‌ثانیه جزئیات سطح سوم را جمع می‌کند. مرجع [۳۹-۴۰] در کنار استفاده از ولتاژ فازها از پنجره جزئیات ولتاژ و جزئیات جریان مطابق با رابطه (۳-۳) نیز بهره می‌برده‌اند.

$$S_a[k] = \sum_{k=2N+1}^k |D3_{Va}[n] \times D3_{Ia}[n]| \quad (۳-۳)$$

که در رابطه فوق  $D3_{Va}$  جزئیات سطح سوم خروجی موجک ولتاژ فاز  $a$ ،  $D3_{Ia}$  جزئیات سطح سوم خروجی موجک جریان فاز  $a$  و  $N$  طول بازه پنجره می‌باشد.



شکل (۳-۱۳): مجموع قدرمطلق پنجره‌ای از رابطه (۳-۲) [۳۵].

### ۳-۳-۳-۲ استفاده از مجموع قدر مطلق خروجی موجک

این نوع روش مشابه روش قبل می‌باشد با این تفاوت که بازه پنجره تمام زمان اندازه‌گیری شده می‌باشد و نتیجه آن به جای یک تابع گسسته یک عدد خواهد بود. مرجع [۲۶] با استفاده از موجک مادر  $Db4$  برای ولتاژ فازها مجموع قدر مطلق را محاسبه می‌کند. مرجع [۴۲] به جای قدر مطلق از

توان دو جزئیات استفاده کرده است و یا در مرجع [۴۴] از میانگین مجموع قدر مطلق دو سطح جزئیات خروجی موجک از ولتاژ برای تمایز بهره برده است.

### ۳-۳-۳-۳ استفاده از مقدار موثر<sup>۱</sup> خروجی موجک

در این روش ابتدا با انتخاب موجک مادر، از سیگنال اندازه‌گیری شده تا چندین سطح تبدیل موجک گسسته گرفته می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۴-۳) مقدار موثر هر سطح جزئیات محاسبه می‌شود. مقدار موثر کلی سیگنال نیز از مقدار موثرها از رابطه (۵-۳) محاسبه می‌گردد [۴۵-۴۶].

$$f_{d_j rms} = \sqrt{\frac{\sum_k d_j[k]^2}{L_{d_j}}} \quad (۴-۳)$$

$$rms_{signal} = [f_{c_0 rms} | f_{d_0 rms} | f_{d_1 rms} | \dots | f_{d_{j-2} rms} | f_{d_{j-1} rms}] \quad (۵-۳)$$

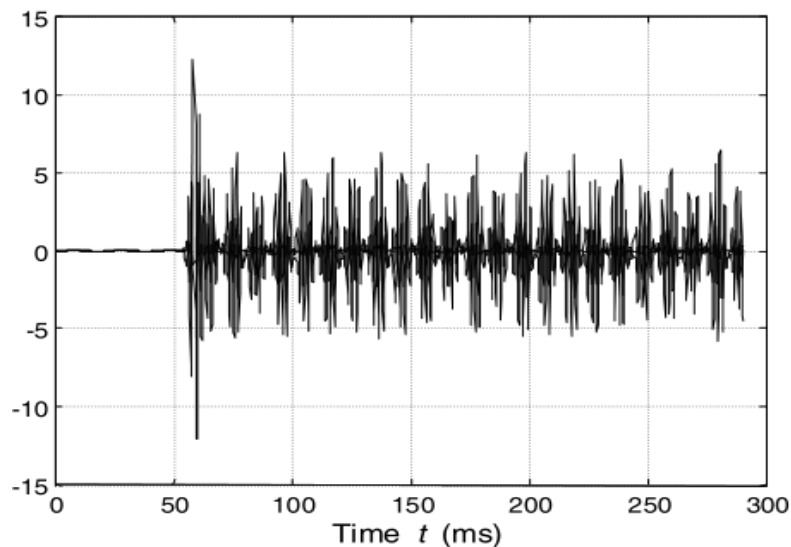
در دو رابطه فوق  $d_j[k]$  خروجی جزئیات سطح  $j$  ام موجک مادر سیگنال اندازه‌گیری شده،  $L_{d_j}$  نسبت ارزش سطح جزئیات  $j$  ام و  $f_{d_j rms}$  مقدار موثر سطح جزئیات  $j$  ام می‌باشد.

### ۳-۳-۳-۴ استفاده از شمارش خروجی موجک

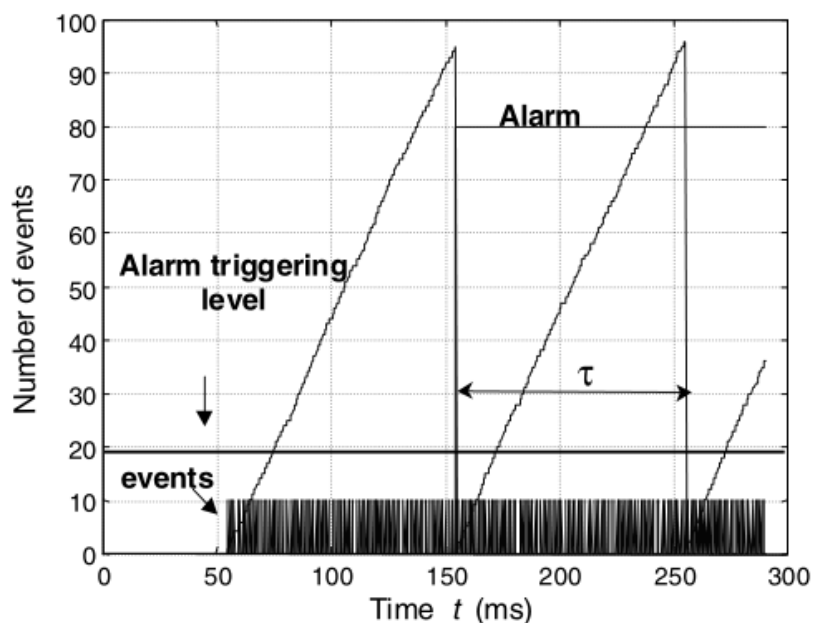
در این روش از خروجی سطوح جزئیات مانند حالات قبل استفاده نمی‌شود. بلکه در صورت بزرگتر شدن قدر مطلق هر داده از یک مقدار تعیین شده یک واحد به شمارنده افزوده می‌شود. سپس در صورت عبور شمارنده در یک مدت‌زمان تعیین شده، اعلام خطا می‌شود که مراجع [۱۵،۴۷] با در نظر گرفتن مجموع سه فاز ولتاژ و مجموع سه فاز جریان به عنوان ورودی تبدیل موجک از این تکنیک استفاده کرده‌اند.

---

<sup>۱</sup> Effective value



شکل (۳-۱۴): خروجی موجک از سیگنال [۱۵].



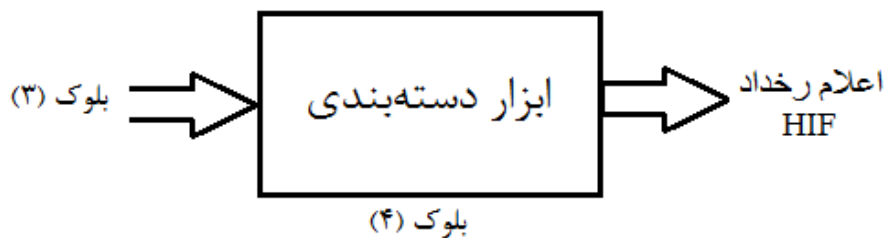
شکل (۳-۱۵): شمارش تعداد عبور رخداد از حد آستانه [۱۵].

### ۳-۳-۳-۵ - استفاده از شاخص‌های ترکیبی خروجی موجک

بعضی از محققین از چند نوع شاخص متفاوت برای تشخیص خطای امیدانس بالا استفاده می‌کنند. در مرجع [۴،۴۸] شاخص اول را ریشه میانگین مربع جزئیات اول، شاخص دوم را میانگین مربع جزئیات دوم و شاخص سوم را بزرگترین قدرمطلق جزئیات سوم در یک بازه زمانی اندازه‌گیری شده در نظر گرفته‌اند.

### ۳-۳-۴ - دسته‌بندی<sup>۱</sup> و اعلام رخداد HIF

پس از تعیین و ساخت شاخص‌های تمایز باید به شیوه‌ای این معیار شاخص‌ها را به اعلام وقوع خطا تبدیل نمود. همان طور که در بخش قبل بیان گردید شاخص‌های انتخاب شده به گونه‌های متفاوت و ویژگی‌های متفاوت به تمایز داشتن حالت کارکرد عادی و حالت خطای امپدانس بالا اشاره می‌کردند. در نتیجه روش دسته‌بندی برای هر نوع شاخص می‌تواند متفاوت باشد.



شکل (۳-۱۶): بلوک (۴) دسته‌بندی و اعلام رخداد HIF.

به طور مثال در مرجع [۴۹] در صورت افزایش نسبت هارمونیک‌ها از یک حد آستانه، خطای امپدانس بالا اعلام می‌گردد. یا در مقالاتی دیگر شاخص‌ها برای حالت کارکرد عادی شبکه و حالت خطای امپدانس بالا بدست آمده است و حال توسط این مقادیر باید سیستمی داشت که در صورت وقوع خطای امپدانس بالا با استفاده از آموخته‌های خود تشخیص خطای امپدانس بالا را انجام دهد. روش‌های موجود را می‌توان به دو دسته کلی الگوریتم‌های تصمیم حد مرزی و دسته‌بندی هوشمند تقسیم نمود. که در ادامه به شرح انواع دو دسته الگوریتم استفاده شده در مراجع برای تشخیص خطای امپدانس بالا پرداخت می‌گردد.

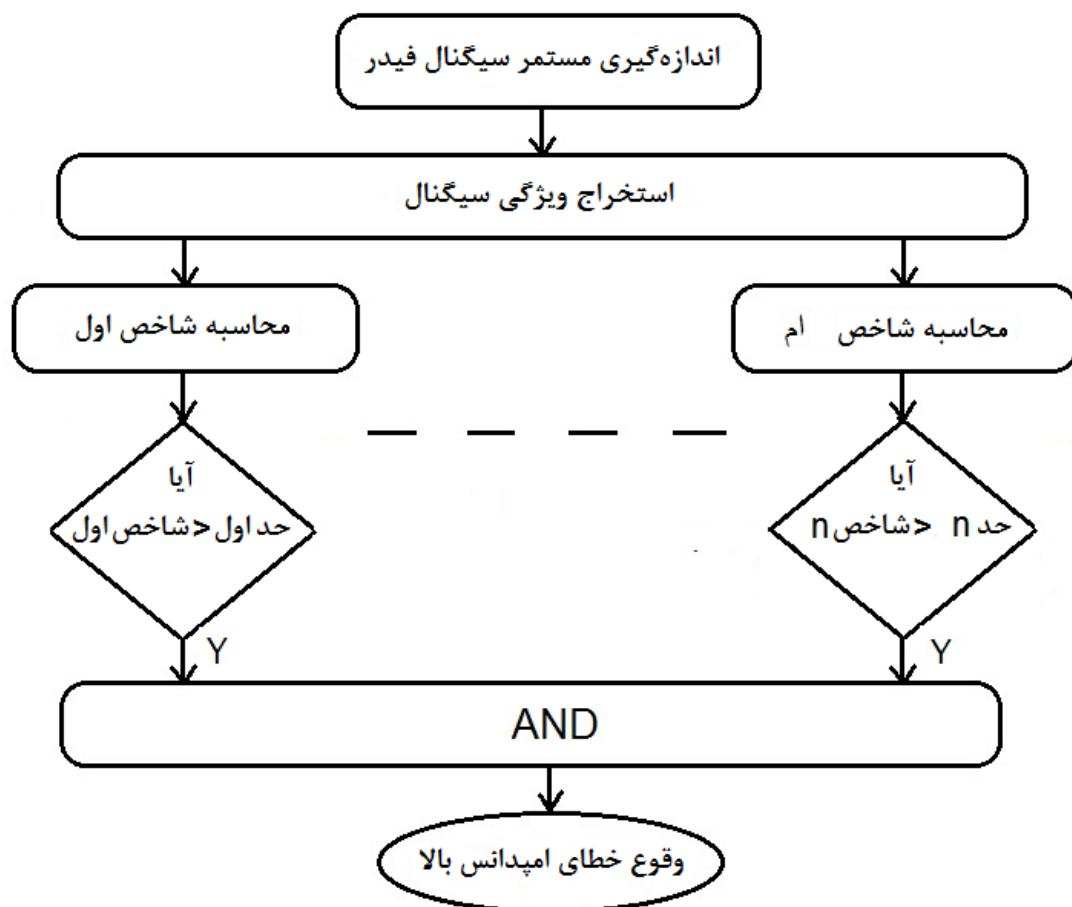
### ۳-۳-۴-۱ - الگوریتم تصمیم حد مرزی

الگوریتم تصمیم حد مرزی یک الگوریتم مرحله‌ای و محاسباتی با بررسی شرط برقراری حد مرزی می‌باشد. در هر الگوریتم ابتدا با اندازه‌گیری سیگنال فیدر شروع می‌شود. در هر لحظه سیگنال

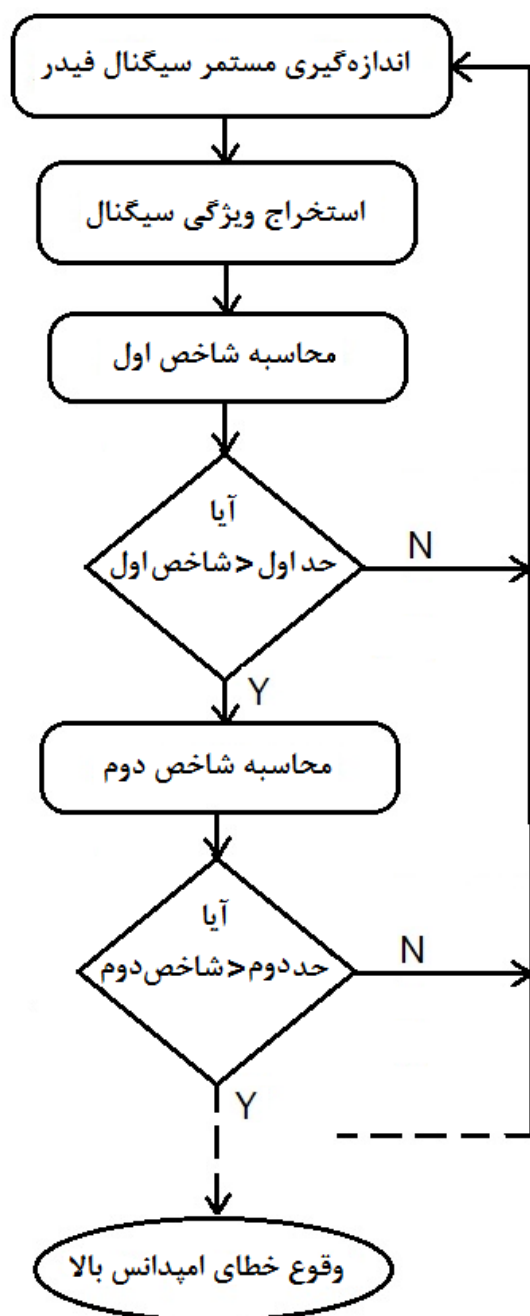
<sup>1</sup> Classification

اندازه‌گیری شده به واسطه ابزار استخراج ویژگی مورد تحلیل وقوع رخ داد غیرمعمول قرار می‌گیرد و هر هنگام که وقوع رخداد، غیرعادی تشخیص داده شد (از حد آستانه بیشتر شد) به مرحله بعد می‌رود. در مرحله بعد با محاسبه شاخص تشخیص دوم در صورت دارا بودن شرط حد مرزی به مرحله بعد و محاسبه شاخص بعدی می‌رود، در غیر این صورت حدس احتمال وقوع خطای امیدانس بالا مردود بوده و به مرحله اول باز می‌گردد.

با توجه به شاخص‌های مورد استفاده الگوریتم‌های متفاوتی برای دسته‌بندی خطا وجود دارد. مثلاً الگوریتم شکل (۳-۱۷) به صورت موازی به بررسی شاخص‌های تشخیص و برقراری حد آستانه می‌پردازد. اما الگوریتم شکل (۳-۱۸) به صورت ترتیبی و یک به یک به بررسی شاخص‌های تشخیص می‌پردازد و در صورت برقراری شرط حد آستانه به سراغ شاخص بعدی می‌رود.



شکل (۳-۱۷): الگوریتم تصمیم موازی



شکل (۳-۱۸): الگوریتم تصمیم‌گیری ترتیبی

مرجع [۴۳] از دو شاخص به طور متوالی برای تشخیص خطای امیدانس بالا بهره می‌برد. شاخص اول آن مجموع قدر مطلق جزئیات خروجی موجک می‌باشد که در صورت عبور از یک حد آستانه یک شماره به شمارنده شاخص دوم اضافه می‌کند. شاخص دوم مدت‌زمان باقی ماندن شاخص اول یا همان

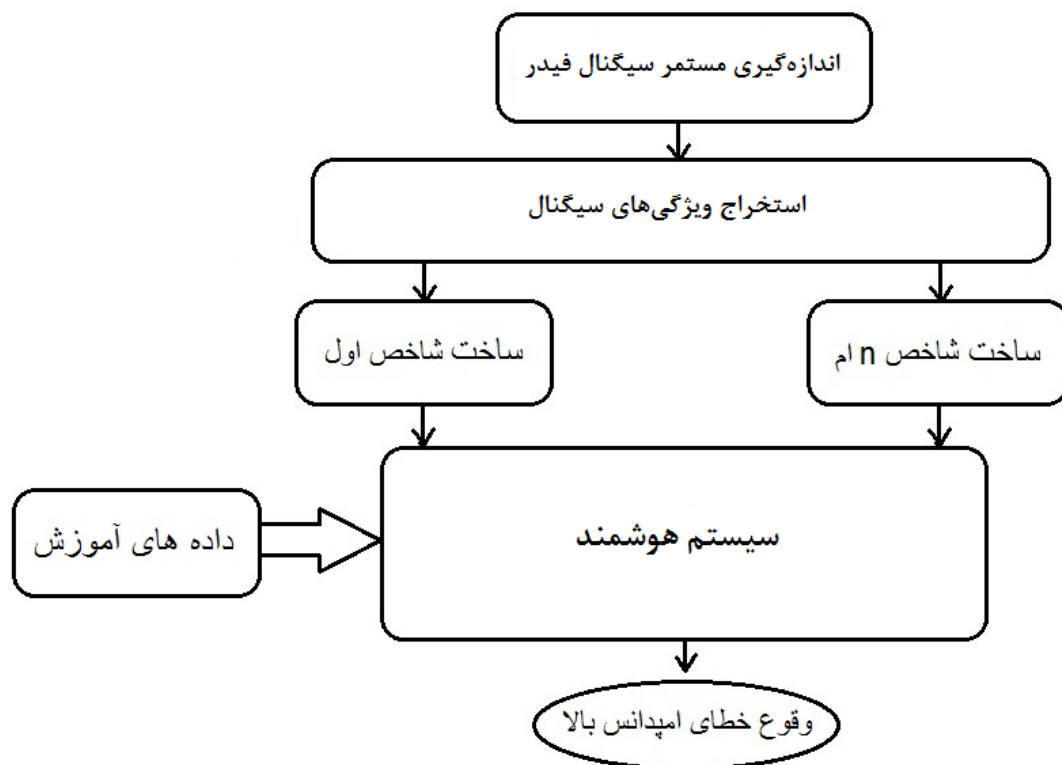
تداوم خطای امیدانس بالا می‌باشد که در صورت عبور از یک حد آستانه، الگوریتم وقوع HIF را اعلام می‌کند.

در الگوریتم مرجع [۴۰،۵۰] شاخص مجموع قدر مطلق جزئیات خروجی سطح سه موجک از جمع ولتاژ را با یک حد آستانه مقایسه می‌کند و در صورت عبور از این حد وقوع خطا را اعلام می‌کند. الگوریتم موجود در مرجع [۱۵،۴۷] از دو حد آستانه بهره می‌برد، شاخص اول شمارش خروجی موجک می‌باشد در صورت افزایش از حد آستانه اول به مرحله بعد الگوریتم می‌رود و در مرحله دوم در صورت مدت‌دار بودن شرط اول خطا را اعلام می‌کند. مرجع [۲۶] نیز در مرحله اول مجموع قدر مطلق خروجی موجک را با حد آستانه بررسی و در صورت تداوم خطا، وقوع HIF را اعلام می‌کند. الگوریتم‌های حد مرزی، از نظر تحلیلی و از نظر پیاده‌سازی الگوریتمی ساده به حساب می‌آیند. اما ایراد اصلی این نوع الگوریتم‌ها تعیین مقدار مناسب حد مرزی می‌باشد. این حدود مرزی موجود در الگوریتم‌ها با توجه به آزمایش‌های واقعی و شبیه‌سازی شده به صورت تجربی باید انتخاب گردد و یا بعضاً برای یافتن مقدار مناسب حد مرزی از روش‌های بهینه کمک گرفته می‌شود.

### ۳-۳-۴-۲- الگوریتم‌های هوشمند

همان‌گونه که در قسمت قبل بیان شد یکی از ایرادهای الگوریتم تصمیم حد مرزی، یافتن مقدار مناسب حد مرزی می‌باشد. حد مرزی در الگوریتم تصمیم حد مرزی به صورت آزمایش و مشاهده شاخص‌ها در دو حالت بدون خطا (انواع بارها خطی و غیرخطی، اینورترها، بانک خازنی و ...) و با خطا تعیین می‌گردد. در روش الگوریتم هوشمند با توجه به این داده‌های آزمایش، سیستم آموزش می‌بیند و در اجرا بسته به آموزش‌های دیده شده وقوع و یا عدم وقوع خطای امیدانس بالا را اعلام می‌نماید. شکل (۳-۱۹) الگوریتم کلی تشخیص خطای امیدانس بالا به کمک دسته‌بندی هوشمند را نشان می‌دهد.





شکل (۳-۱۹): الگوریتم تشخیص HIF بر اساس سیستم هوشمند.

همان طور که در شکل (۳-۱۹) مشاهده می‌شود تشخیص خطا دیگر به مقادیر مرزی بستگی ندارد بلکه کاملاً به داده‌های آموزش وابسته است و هر چقدر داده‌های آموزش بیشتر باشد سیستم هوشمند دقیق‌تر ولی پیچیده‌تر خواهد بود. در بعضی از مقالات یک حلقه تصمیم دیگر نیز به این الگوریتم اضافه می‌شود و شرط تداوم (مثلاً ۲ دقیقه ادامه داشته باشد) خطا را نیز بررسی می‌کند. چند مورد از سیستم‌های هوشمند استفاده شده برای تشخیص خطای امپدانس بالا در ادامه توضیح داده می‌شود.

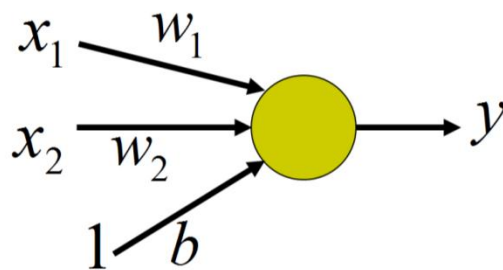
### ۳-۴-۳-۳ الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> (ANN) روشی عملی برای یادگیری توابع گوناگون نظیر توابع با مقادیر حقیقی، توابع با مقادیر گسسته و توابع با مقادیر برداری می‌باشد. یادگیری شبکه عصبی در برابر

<sup>۱</sup> Artificial neural network

خطاهای داده‌های آموزشی مصون بوده و این‌گونه شبکه‌ها با موفقیت به مسائلی نظیر شناسایی گفتار، تعبیر تصاویر و یادگیری‌های دیگر، اعمال شده است.

می‌توان این‌گونه بیان داشت که الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی روشی برای محاسبه می‌باشد که بر پایه به هم پیوسته چندین واحد پردازشی ساخته می‌شود. شبکه از تعداد دلخواهی سلول یا گره یا نرون<sup>۱</sup> تشکیل می‌شود که مجموعه ورودی را به خروجی ربط می‌دهند. شکل (۳-۲۰) یک نرون با دو ورودی را نشان می‌دهد که با انتخاب ضرایب وزنی مناسب می‌توان یک تابع خطی را با آن پیاده نمود و رابطه (۳-۶) این تابع را باز گو می‌کند.



شکل (۳-۲۰): یک نرون با ورودی.

$$\hat{y} = b + \sum_i x_i w_i \quad (۳-۶)$$

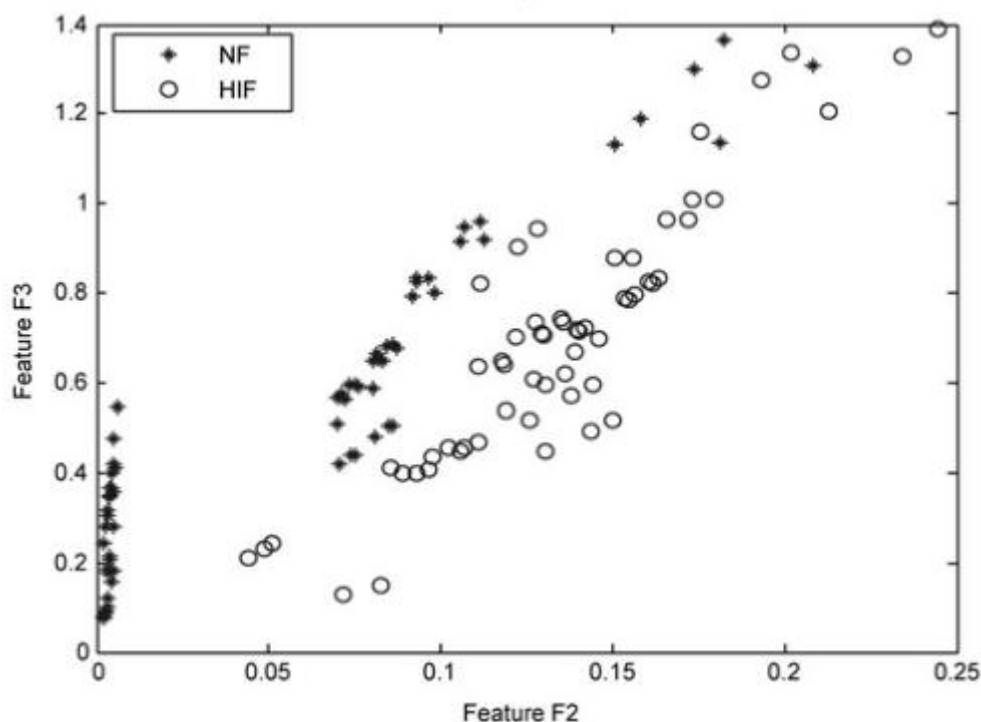
در رابطه بالا که بیانگر تابع معماری تک لایه می‌باشد  $x_i$  ورودی،  $w_i$  ضرایب وزنی،  $b$  مقدار بالانس و  $y$  تابع تقریب می‌باشد.

معماری تک لایه فقط می‌تواند توابع خطی را تقریب بزند اما معماری بیش از یک لایه این مشکل را حل می‌کند. عموماً معماری سه لایه می‌تواند برای بیشتر توابع سازی مورد استفاده قرار گیرد.

در روش‌های تشخیص خطای امیدانس بالا از قابلیت شبکه عصبی مصنوعی به عنوان تابع سازی شاخص‌های تمایز استفاده می‌شود. همان‌طور که بیان گردید برای نسبت دادن وزن‌های شبکه

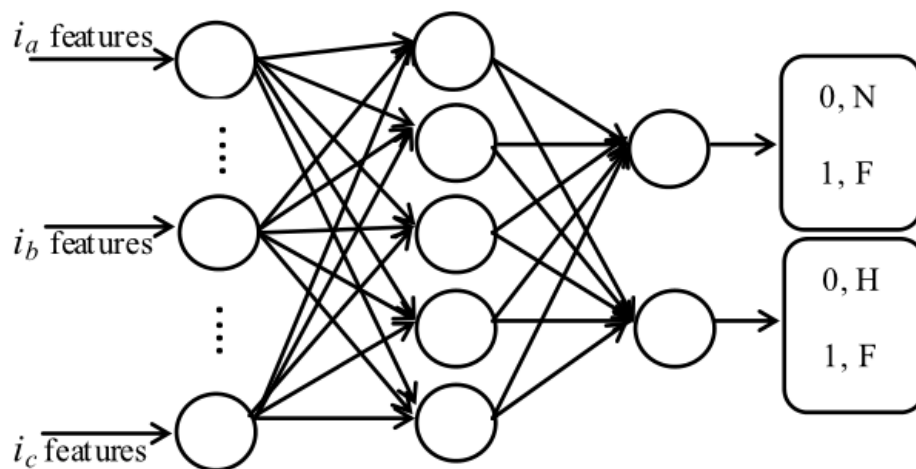
<sup>۱</sup> Neuron

عصبی مصنوعی باید از داده‌های نمونه استفاده کرد. این داده‌های نمونه شامل آزمایش‌های بسیار، چه از نظر آزمایش واقعی و چه از نظر شبیه‌سازی صورت می‌پذیرد. به صورتی که با هر چه در نظر گرفتن بیشتر حالت‌های خطا و غیر خطای مختلف برای شبکه، تعداد متنوع‌تری از داده‌های آموزش قابل ساخت می‌باشد و نتیجه بهتر در تشخیص خطای امیدانس بالا حاصل می‌گردد. عموم مقالات بسته به نوع تشخیص و شاخص و همچنین نوع شبکه این آزمایش‌ها را برای بدست آوردن داده‌های آموزش انجام می‌دهند. به طور مثال شکل (۳-۲۱) دو شاخص تشخیص را در مختصات دو بعدی نمایش می‌دهد. نقاط دایره‌ای وقوع خطا و نقاط ستاره حالت عادی شبکه اعم از کلید زنی بار، کلید زنی بانک خازنی، بار غیرخطی و ... را مشخص می‌کند. شبکه عصبی مصنوعی باید با توجه به این داده‌ها بعد سوم که پاسخ وقوع یا عدم وقوع خطا می‌باشد در خروجی تابع خود آموزش بدهد و سپس سیستم آموزش دیده برای داده جدید رخداد HIF را می‌تواند تشخیص دهد.



شکل (۳-۲۱): نسبت دو شاخص تمایز در مرجع [۳۳].

مرجع [۳۳] با استفاده از ۳۰۰ داده، شبکه عصبی را آموزش می‌دهد و ۲۰۰ داده را برای آزمودن آموزش بکار برده است. در این مقاله در حالت دو شاخص ورودی و همچنین چهار شاخص ورودی بهترین دقت ۹۸٪ بدست آمده است. مرجع [۲۸] در ادامه [۳۳] با تغییر شیوه آموزش دقت را به ۹۸/۸٪ نیز رسانده است. مرجع [۱۶] با ۱۰۰ داده آزمایش، با بررسی چندین موج مادر، بالاترین درصد دقت خود را ۹۹٪ اعلام کرده است. مرجع [۳۷] از شبکه عصبی متشکل از چهار ورودی برای هر شاخص اندازه‌گیری جریان فاز استفاده کرده است و توانسته است با دقت ۹۷ درصد خطای امپدانس بالا را تشخیص دهد. ساختار شبکه عصبی مصنوعی به کار رفته مرجع [۳۷] در شکل (۳-۲۲) آورده شده است. این ساختار متشکل از پنج نرون در لایه مخفی اول، چهار نرون در لایه مخفی دوم و چهار نرون در لایه خروجی خود می‌باشد که از چهار نرون خروجی یک نرون برای اعلام رخداد خطای امپدانس بالا در شبکه و سه نرون دیگر بیان گر رخداد فاز خطای امپدانس بالا می‌باشند.



شکل (۳-۲۲): ساختار شبکه عصبی مرجع [۳۷].

در مرجع [۳۶] تشخیص خطای امپدانس پایین را در کنار خطای امپدانس بالا در آموزش شبکه عصبی قرار داده شده است. علاوه بر این خروجی شبکه عصبی برای تشخیص HIF، تداوم خطا را نیز طی الگوریتم حد آستانه بررسی می‌کند.

تفاوت‌های استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مقالات مختلف، در تعداد نرون‌ها، در لایه‌ها و همچنین شیوه آموزش دادن سیستم می‌باشد و عملاً تمام روش‌ها استفاده از این ابزار را به عنوان یک تابع نویس آماری به کار می‌برند.

### ۳-۳-۴- الگوریتم سیستم فازی<sup>۱</sup>

سیستم‌های فازی، سیستم‌های مبتنی بر دانش یا قواعد می‌باشند. قلب سیستم فازی، پایگاه قواعد<sup>۲</sup> بوده که از قواعد اگر-آنگاه فازی تشکیل شده است. در الگوریتم‌های مختلف فازی روش‌های متفاوتی برای تعیین مناسب این پایگاه قواعد بکار گرفته می‌شود. مثلاً در روش فازی ممدانی اساس پایگاه قواعد بر پایه تجربه شخص خبره و سعی و خطا می‌باشد و در سیستم‌های که دانش فرد خبره وجود ندارد، دچار مشکل می‌شود. در روش‌های عددی، مانند روش خوشه‌سازی داده‌های ورودی-خروجی نزدیک به هم در یک خوشه یا قاعده قرار می‌گیرند [۵۱]. این روش در مدل کردن سیستم‌های غیرخطی توانایی بالایی دارد. همان‌گونه که در بخش شبکه عصبی مصنوعی بیان شد در تشخیص خطای امپدانس بالا به صورت هوشمند نیاز به ساخت تابعی از شاخص‌ها برای وقوع خطا می‌باشد که الگوریتم خوشه‌سازی فازی نیز با زوج‌های متشکل از ورودی-خروجی شاخص خطا، مورد آموزش قرار می‌گیرد. از این رو می‌تواند در دسته‌بندی مورد استفاده قرار گیرد. مرجع [۴۸،۵۲] از فازی پایگاه قواعد و مرجع [۵۳] از فازی خوشه‌سازی برای دسته‌بندی خطای امپدانس بالا استفاده کرده‌اند. قابل بیان است که می‌توان روش ترکیبی از فازی و شبکه عصبی نیز برای دسته‌بندی در تشخیص خطای امپدانس بالا نیز به کار برد. مرجع [۴۲] از الگوریتم فازی عصبی<sup>۳</sup> (ANFIS) در کنار تداوم وقوع خطا برای دسته‌بندی HIF استفاده کرده است.

---

<sup>1</sup> Fuzzy system

<sup>2</sup> Rule-base

<sup>3</sup> Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems

یکی از روش‌های موجود در حوزه روش‌های دسته‌بندی، روش ماشین بردار تکیه‌گاه<sup>۱</sup> (SVM) است. در این روش، هدف پیدا کردن مرز تصمیم‌گیری خطی مابین نمونه‌های متعلق به دسته‌های مختلف، با لحاظ نمودن بیشترین فاصله بین دسته‌های موجود است. مرجع [۳۱-۳۲] با ایجاد تابع هدف و قیدهای مربوطه مسئله بهینه‌سازی مقید از نوع درجه دو را برای یافتن بهترین بردار تکیه‌گاه حل می‌کند و سپس با استفاده از این مرز تفکیک، برای یک داده جدید تشخیص خطای امیدانس بالا را انجام می‌دهد.

### ۳-۴ - رویکردهای دیگر در خطای امیدانس بالا

علاوه بر رویکردهای بیان شده رویکردهایی متفاوت در مسئله خطای امیدانس بالا نیز وجود دارد. در مرجع [۵۴] با استفاده از شبکه عصبی به بررسی روشی برای یافتن محل وقوع خطای امیدانس بالا در یک شبکه نمونه پرداخته است. مرجع [۵۵] روشی برای تشخیص موقعیت خطای HIF در خطوط انتقال ۳۴۵ کیلوولت ارائه کرده است. مرجع [۵۶] با استفاده از تبدیل هیلبرت<sup>۲</sup> به بررسی موقعیت خطا می‌پردازد.

### ۳-۵ - جمع‌بندی

در این بخش به بررسی رویکردهای تشخیص خطای امیدانس بالا پرداخت شد. روش‌های بیان شده هر یک دارای مزایا و معایبی بودند و هر روش دارای دقت تشخیص متفاوت با توجه به مدل خطای بکار رفته و سیستم مورد آزمایش خود داشته‌اند. بعضی از محققین دقت تشخیص بالا حتی ۱۰۰ درصدی را اعلام کرده‌اند اما جامعه آزمایش آنها شامل انواع بارهای نمی‌شود و یا از یک مدل ساده خطای امیدانس بالا استفاده کرده‌اند و هیچ تضمینی به تشخیص درست در سیستم واقعی

---

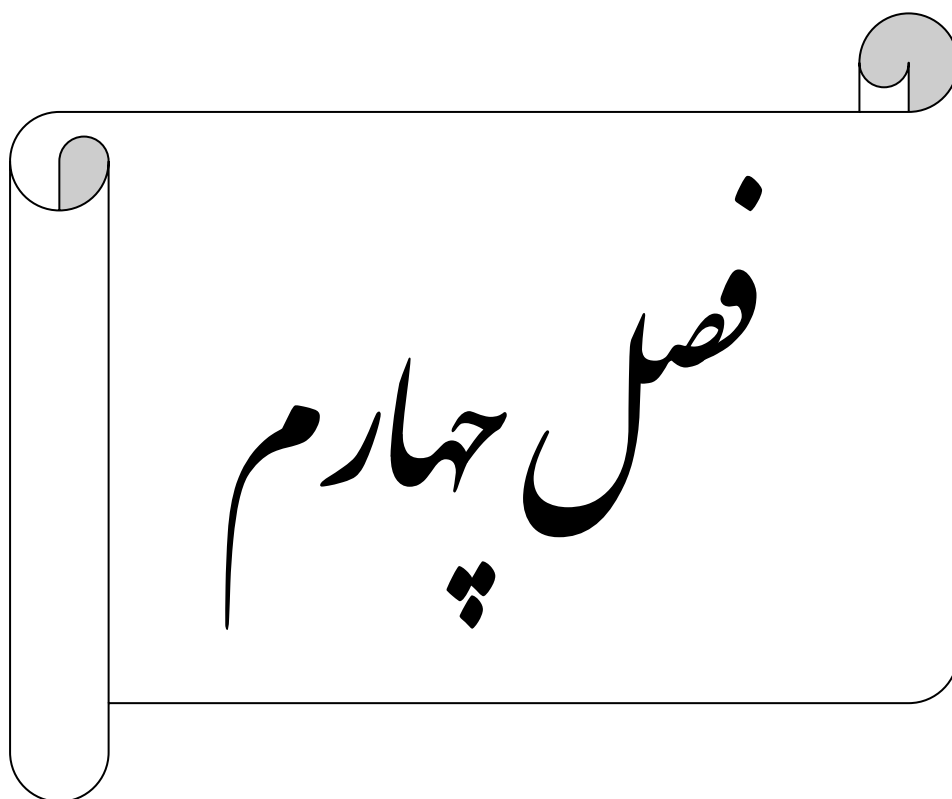
1 Support Vector Machine

2 Hilbert transform

نداده‌اند. به هر حال روشی را می‌توان بهتر دانست که علاوه بر دقت تشخیص بالا در نتایج شبیه‌سازی، باید مدل‌های شبیه‌سازی نیز به مدل‌های واقعی و رخداد‌های واقعی نزدیکتر باشد. در نتیجه مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در فصل بعد به مدل‌سازی شبکه مورد آزمایش در این پایان‌نامه پرداخته می‌شود.







مدل سازی شبکه مورد آزمایش

## فصل ۴ - مدل سازی شبکه مورد آزمایش

### ۴-۱- مقدمه

همان طور که بیان شد یکی از مهم ترین مسائل برای تشخیص خطای امپدانس بالا، یافتن وجه تمایز تاثیر وقوع خطا با تاثیر رخدادها و حالات کارکرد عادی شبکه بر روی سیگنال فیدر می باشد. به دلیل اینکه نمی توان انواع حالات خطای امپدانس بالا را در شبکه واقعی مورد آزمایش قرار داد باید با توجه به آزمایش های محدود انجام شده، مدل های HIF را در بستر نرم افزارهای شبیه سازی در کنار حالات متنوع شبکه مورد بررسی قرار داد.

در این پایان نامه شبیه سازی شبکه و مدل سازی اجزای شبکه و همچنین مدل سازی خطای امپدانس بالا در نرم افزار PSCAD/EMTDC صورت پذیرفته است که در ادامه چگونگی انجام این مسئله مورد توضیح و بررسی قرار می گیرد.

### ۴-۲- شبکه مورد آزمایش

هدف از شبیه سازی شبکه آزمایش، اندازه گیری ولتاژ و جریان فیدر برای بررسی سیگنال ها به کمک ابزار تجزیه می باشد. از این رو هر چه قدر شبکه مورد آزمایش در کنار اجزای تشکیل دهنده آن با مدل های واقعی تطابق بیشتری داشته باشد نتایج بدست آمده از روش تشخیص خطای امپدانس بالا قابل اعتمادتر می باشند. با توجه به اینکه شبیه سازی شبکه توزیع نمونه در این پایان نامه اهمیت زیادی دارد، مدل سازی شبکه مورد آزمایش در سه بخش بررسی می گردد:

- ساختار شبکه
- مدل سازی اجزای ساختار شبکه
- مدل سازی بار الکتریکی

در ادامه و در زیربخش‌های بعد به تفصیل در مورد سه قسمت فوق توضیحات لازم بیان می‌گردد.

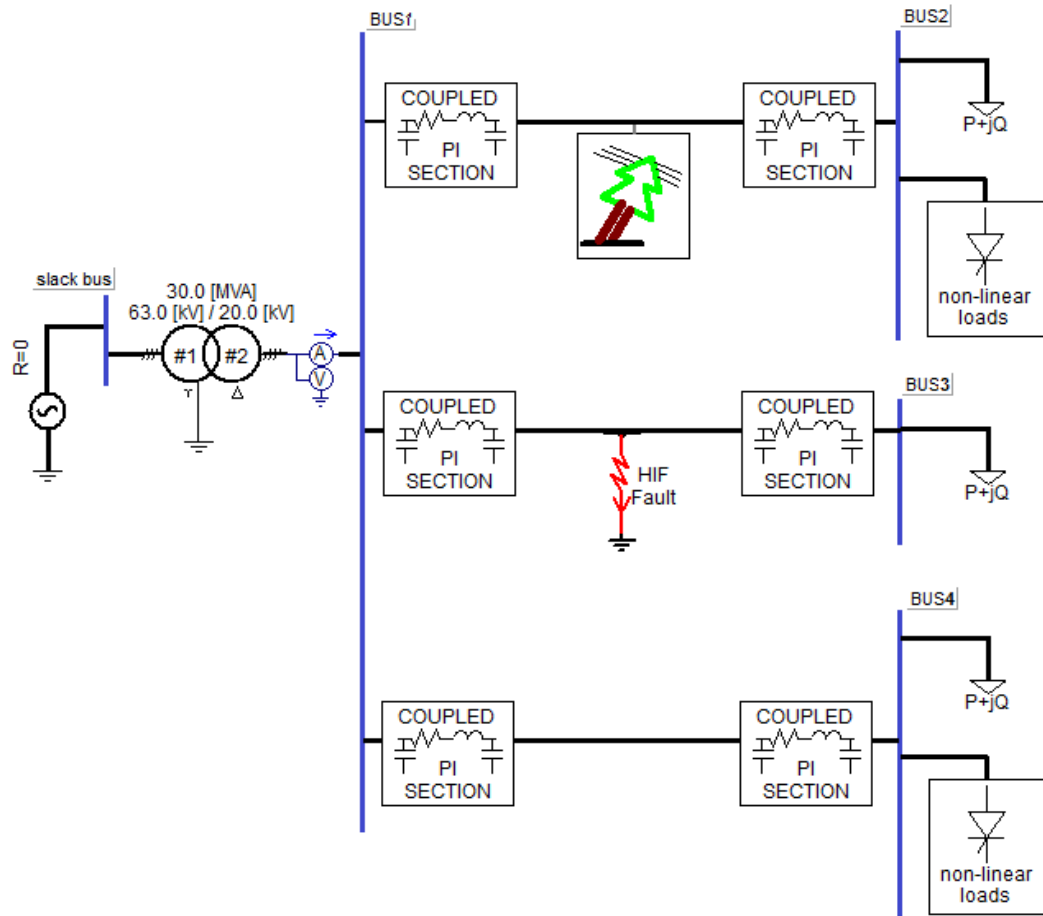
#### ۴-۲-۱- ساختار شبکه

مقالات مختلف، ساختارهای مختلفی را برای بررسی روش پیشنهاد شده خود به کار برده‌اند. بعضی از محققین از یک مدل ساده و بعضی از مدل‌های استاندارد بهره برده‌اند. به طور مثال مرجع [۵۷] از مدل سیزده گره IEEE استفاده کرده است و یا در مرجع [۴۵] از یک نمونه شبکه خطی و حتی مرجع [۸] از چند شبکه متفاوت استفاده کرده‌اند. مهم‌ترین مسئله در انتخاب مدل شبکه توزیع، کامل بودن و نزدیک بودن به یک شبکه واقعی می‌باشد. این در حالی است که تا حد امکان روش تشخیص خطای امپدانس بالا بهتر است به مدل شبکه وابستگی نداشته باشد. در این پایان‌نامه سعی شده است ساختار شبکه علاوه بر ساده بودن نزدیکی زیادی به ساختار واقعی داشته باشد. علاوه بر این برای بررسی بیشتر روش پیشنهادی از دو ساختار شعاعی و حلقوی برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

#### ۴-۲-۱-۱- ساختار شعاعی چند انشعاب

ساختار اول مورد آزمایش در شبیه‌سازی، یک شبکه توزیع شعاعی با سه انشعاب می‌باشد. در یک سمت این ساختار تولید و در سمت دیگر مصرف‌کنندگان قرار دارند. شبکه توزیع از یک باس بینهایت ۶۳ کیلوولت متصل به ترانسفورماتور ۶۳ به ۲۰ کیلوولت ۳۰ مگاواتی تغذیه می‌شود. طول هر خط انشعاب متفاوت و برابر با ۳۰، ۲۰ و ۱۰ کیلومتر می‌باشد.

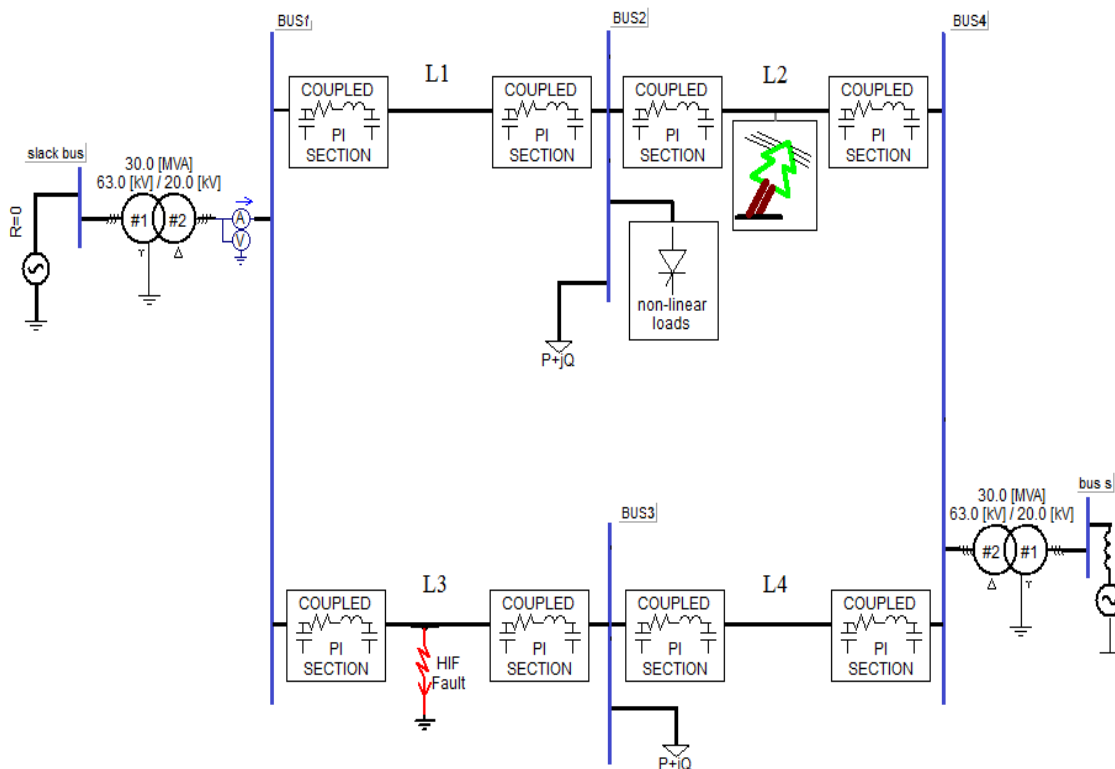
شکل (۴-۱) دیاگرام تک خطی شبکه توزیع شعاعی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC را نشان می‌دهد. در اول فیدر (بعد از ترانسفورماتور) اندازه‌گیری ولتاژ و جریان وجود دارد و در طی خطوط توزیع خطاهای امپدانس بالای متنوع رخ می‌دهد. همچنین در سمت باس مصرفی انواع بارهای مصرفی اعم از خطی و غیرخطی، ثابت و متغیر به میزان‌های متفاوت قابل قرار گرفت می‌باشد.



شکل (۴-۱): ساختار شبکه توزیع شعاعی چند انشعابی.

#### ۴-۲-۱-۲- ساختار حلقوی دو سو تغذیه

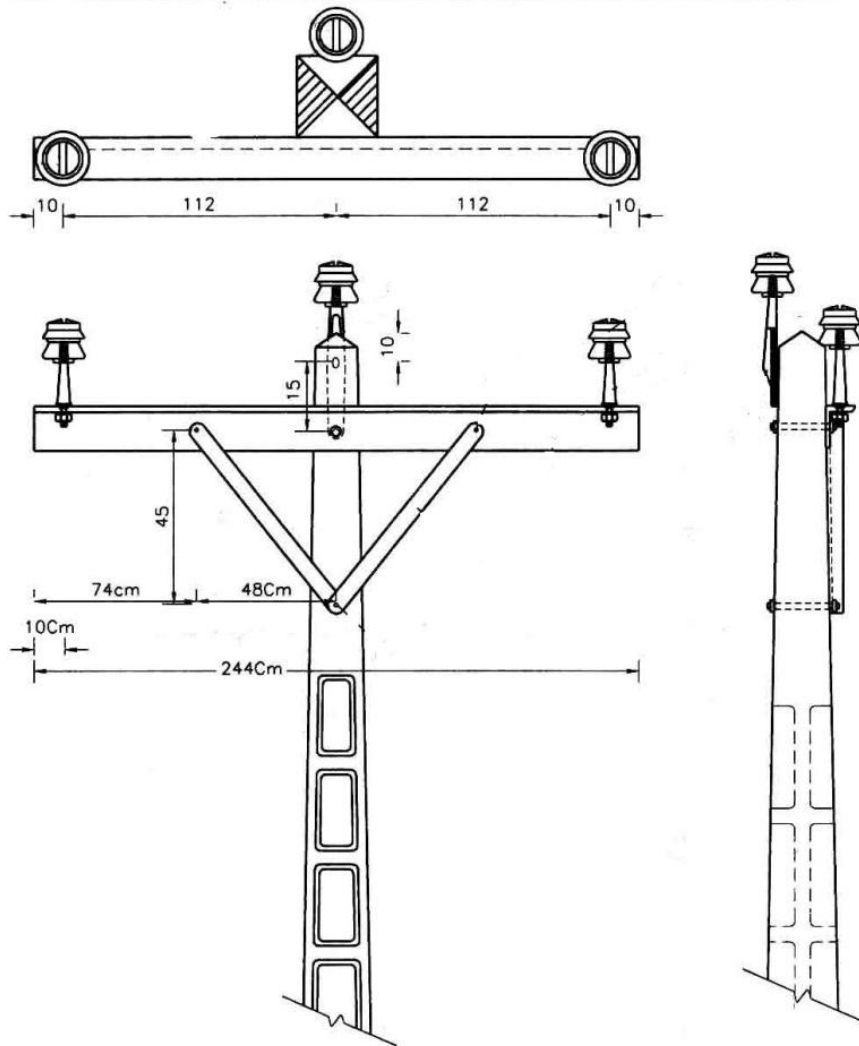
در این پایان نامه علاوه بر شبکه توزیع شعاعی، تشخیص خطای امپدانس بالا در یک شبکه توزیع حلقوی دو سو تغذیه نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شبکه حلقوی دارای چهار باس می‌باشد که دو باس اصلی آن توسط ترانسفورماتور ۶۳ به ۲۰ کیلوولت تغذیه می‌شود و دو باس دیگر دارای انواع بار الکتریکی می‌باشد. طول خطوط غیر یکسان و به ترتیب برابر با ۳۰، ۱۰، ۵ و ۲۰ کیلومتر می‌باشد. دیاگرام تک خطی شبکه توزیع حلقوی در شکل (۴-۲) آورده شده است.



شکل (۲-۴): مدل شبکه توزیع حلقوی دو سو تغذیه.

#### ۲-۲-۴- مدل خط توزیع

در این پایان نامه از مدل  $\pi$  برای خط کوتاه استفاده شده است. برای استفاده از مدل  $\pi$  در شبکه توزیع نیازمند به محاسبه سه پارامتر راکتانس سلفی  $X_L$ ، راکتانس خازنی  $X_C$  و مقاومت  $R_{ac}$  بر واحد طول می باشد. قبل از محاسبه این سه پارامتر باید مدل خط از نظر فیزیکی مشخص باشد تا مدل شبیه سازی شده تا حد امکان به مدل واقعی نزدیک باشد. در این پایان نامه از یک مدل خط متعارف در شبکه ۲۰ کیلوولت ایران مورد استفاده قرار گرفته است این مدل بر اساس یک پایه دیتیل TCL افقی با آرایش پایه بتونی میانی همراه با کراس آرم ۲/۴۴ و مقره های سوزنی ۲۰ کیلوولت می باشد. جزئیات بیشتر در مورد این نوع پایه ها در مرجع [۵۸] آمده است. شکل (۳-۴) ساختار پایه مدل استفاده شده را نشان می دهد.



شکل (۳-۴): ساختار دیتیل TCL با کراس آرم ۲/۴۴ [۵۸].

فاصله متوسط هندسی  $D_m$  با توجه به اندازه‌های شکل (۳-۴) برابر است با:

$$D_m = \sqrt[3]{114.76 \times 224 \times 114.76 \times 10^{-6}} = 1.4342m \quad (1-4)$$

قطر خارجی هادی هاینبا با توجه به مرجع [۵۸] برابر با ۱۴/۵۷ میلی‌متر می‌باشد. مقاومت dc در دمای ۲۰ درجه برابر با ۰/۲۷۱۲ اهم بر کیلومتر می‌باشد که پس از تبدیل به دمای ۶۵ درجه متعارف به ۰/۳۲۱۲ اهم بر کیلومتر می‌رسد. مقدار مقاومت ac در واحد طول کمی بزرگتر از مقاومت حالت  $\Gamma_{dc}$  برابر با ۰/۳۳ اهم بر کیلومتر در نظر گرفته شده است. راکتانس سلفی  $X_L$  در واحد طول برابر است با:

$$X_L = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_m}{e^{-0.25} \times r} = 0.34762 \Omega/Km \quad (2-4)$$

در رابطه بالا  $\omega$  فرکانس زاویه ای برابر با  $100\pi$  (رادیان بر ثانیه)،  $\mu$  ثابت مغناطیسی خلأ معادل  $(4\pi \times 10^{-4} \text{ H/Km})$  شعاع سیم هادی بر حسب متر می باشد.

همچنین محاسبه راکتانس خازنی  $X_C$  در واحد طول به صورت ذیل محاسبه می گردد:

$$X_C = \frac{\ln \frac{D_m}{r}}{\omega 2\pi \epsilon_0} = 302.249 \text{ M}\Omega/\text{m} \quad (3-4)$$

در رابطه بالا  $\epsilon_0$  ثابت الکتریکی خلأ معادل  $(8.85 \times 10^{-9} \text{ F/Km})$  می باشد.

پس از بدست آوردن مقادیر مقاومت ac، اندوکتانس سلفی و خازنی مدل  $\pi$  خط قابل تشکیل می باشد.

### ۴-۲-۳- مدل بار الکتریکی

استفاده از انواع مختلف بار باعث می شود که جریان و ولتاژ اندازه گیری شده دارای ویژگی های نزدیکتر به شرایط واقعی را داشته باشد. در این زیر بخش بیان انواع بارهای شبیه سازی شده در پایان نامه پرداخت می گردد.

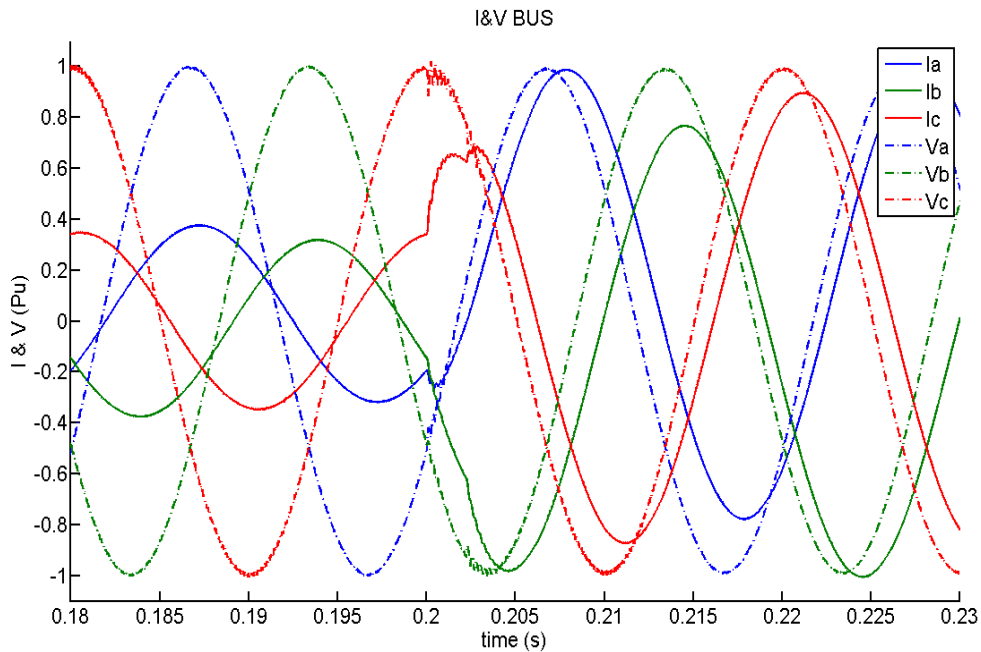
### ۴-۲-۳-۱- بار توان ثابت

در هر شبکه توزیع حجم بالایی از بار الکتریکی را بار توان ثابت در بر می گیرد. میزان مصرف این بار با دو مقدار توان اکتیو و توان راکتیو تعریف می شود. در این پایان نامه سعی شده است از انواع مقادیر توان اکتیو و راکتیو با کیفیت توان متفاوت در باس بار های شبکه استفاده گردد. بارهای ثابت علاوه بر استفاده به صورت تقارن سه فاز، می تواند در هر فاز نیز به صورت جدا وجود داشته باشد که این نوع از بار نیز در شبیه سازی به عنوان حالت عادی بار مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۴-۲-۳-۲- کلید زنی بار

بار ثابت به تنهایی ویژگی کاملاً خطی دارد اما کلید زنی بار به معنای تغییر وضعیت بار در یک لحظه کوتاه باعث ایجاد تغییرات فرکانسی در بازه های کوچک زمانی در شبکه می کند. به همین دلیل

این تغییر وضعیت در شبکه توزیع نیز باید مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. به طور مثال شکل (۴-۴) منحنی ولتاژ و جریان باس در حالت تغییر وضعیت از یک به دو مگاوات و ۰/۱ به ۰/۳ مگاوار در لحظه ۰.۲ ثانیه را نشان می‌دهد.

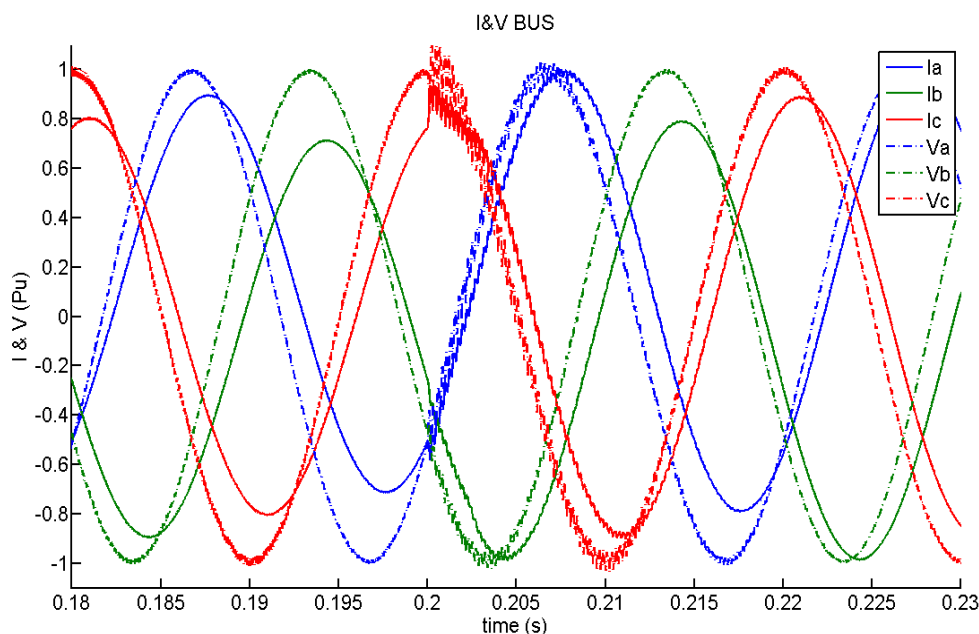


شکل (۴-۴): منحنی ولتاژ و جریان کلید زنی بار.

#### ۴-۲-۳-۳- کلید زنی بانک خازنی

بانک‌های خازنی وظیفه تأمین توان راکتیو مورد نیاز بارهای اهمی سلفی را دارند. به دلیل تغییر در میزان مصرف بار، نیاز به تأمین توان راکتیو نیز تغییر پیدا می‌کند. به همین دلیل بانک خازنی با ورود و خروج تعدادی از خازن‌ها به شبکه این تغییر را جبران می‌کند. کلید زنی بانک خازنی اعم از ورود یا خروج باعث ایجاد جریان‌های گذرای فرکانس بالا می‌شود. از این رو این پدیده بر روی شبکه نیز تأثیر دارد و باید مورد بررسی قرار گیرد. در این پایان‌نامه از چندین نوع کلید زنی بانک خازنی در زمان‌های مختلف با مقدار توان راکتیو متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است. به طور مثال شکل (۴-۵) منحنی ولتاژ و جریان باس در حالت ورود بانک خازنی ۰/۲ مگاوار به شبکه با بار دو مگاوات و ۰/۳ مگاوار در لحظه ۰.۲ ثانیه را نشان می‌دهد.





شکل (۴-۵): منحنی ولتاژ و جریان کلید زنی بانک خازنی.

#### ۴-۳-۲-۴ موتور القایی

در مدل سازی بار الکتریکی، موتور القایی یک نماینده مناسب برای بارهای موتوری می باشد. از این رو از موتور القایی با توان های مختلف به عنوان بار الکتریکی در باس ها استفاده شده است. همچنین برای داشتن ویژگی های کامل تر، در گشتاورهای ثابت، متغیر و حتی متغیر تصادفی نیز استفاده شده است.

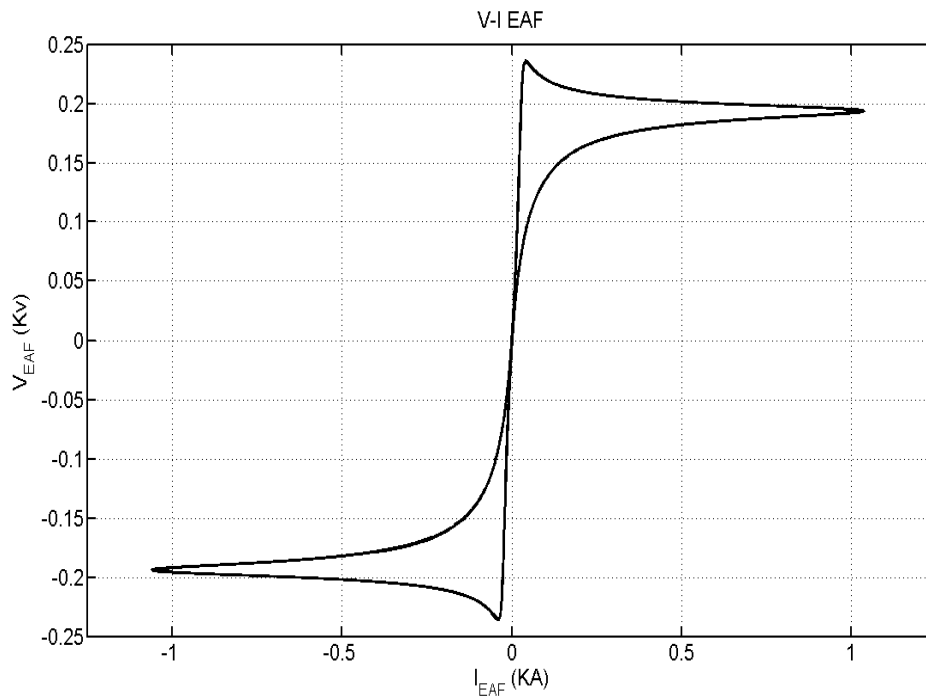
#### ۵-۳-۲-۴ کوره قوس الکتریکی

یکی از بارهای صنعتی که ویژگی نزدیک به خطای امپدانس بالا را دارد، کوره قوس الکتریکی می باشد. در شبکه مورد آزمایش از دو مدل کوره قوس الکتریکی تک فاز و سه فاز استفاده و مورد بررسی قرار گرفته است. مدل استفاده شده از مرجع [۵۹] اخذ گردیده است که روابط دینامیکی آن به صورت ذیل می باشد:

$$K_1 r^n + K_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{K_3}{r^{m+2}} i^2 \quad (۴-۴)$$

$$g = \frac{r^{m+2}}{K_3} \quad (۵-۴)$$

در روابط (۴-۴) و (۵-۴)  $i$  جریان عبوری قوس الکتریک (آمپر)،  $r$  شعاع قوس الکتریکی (متر)،  $g$  رسانایی قوس الکتریکی ( $\sigma$ ) می باشد.  $K_1, K_2$  و  $K_3$  ضرایب ثابت،  $n$  و  $m$  دو متغیر برای اعلام مرحله ذوب می باشد. به طور مثال در صورتی که  $m$  برابر با صفر و  $n$  برابر با دو باشد، کوره در حالت تصفیه<sup>۱</sup> ذوب است. شکل (۶-۴) منحنی ولتاژ-جریان یک نمونه از حالت تصفیه ذوب را نشان می دهد.



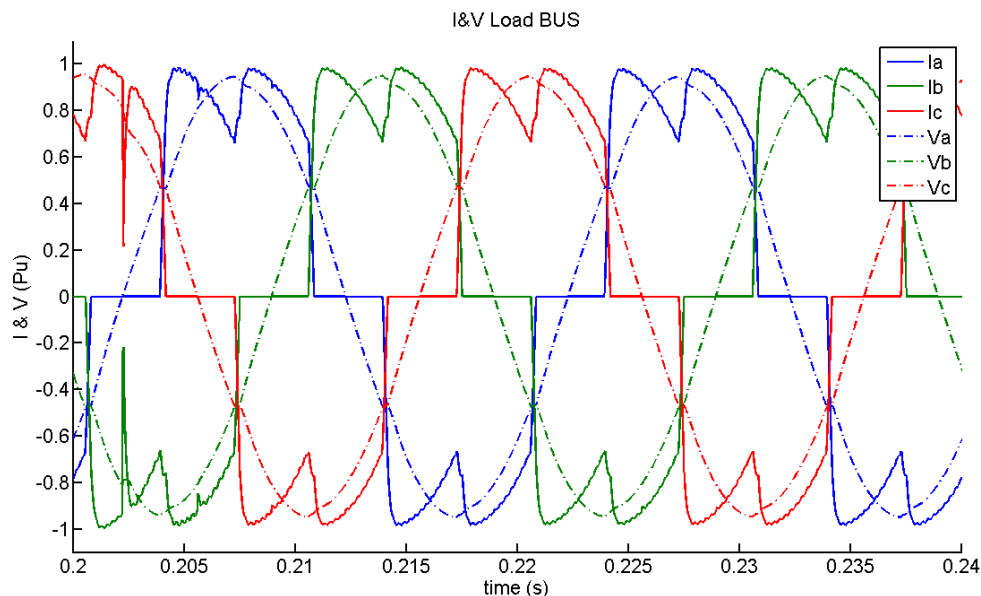
شکل (۶-۴): منحنی ولتاژ-جریان یک نمونه از کوره قوس الکتریکی.

#### ۶-۳-۲-۴ بار تریستوری

در مدل سازی بار الکتریکی، بار تریستوری یک نماینده مناسب برای بارهای غیرخطی می باشد. این مدل با در اختیار گذاشتن زاویه آتش و همچنین مصرف بار DC اعم از مقاومتی، سلفی و خازنی، تنوع زیادی از بارهای غیرخطی را در اختیار می گذارد. در این پایان نامه از بار تریستوری در توان های مختلف و تنوع بار خط DC و همچنین زاویه آتش های متفاوت و حتی تصادفی استفاده شده است.

<sup>1</sup> Refined

شکل (۷-۴) منحنی ولتاژ و جریان بار تریستوری با توان ۰/۷ مگاواتی با زاویه آتش ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۴): منحنی ولتاژ و جریان بار تریستوری.

#### ۷-۳-۲-۴ یکسو کننده تک فاز

یکسو کننده‌ها نیز یک نوع بار غیرخطی هستند که می‌تواند تنوع بسیاری از بار غیرخطی در شبکه را پوشش دهد. از این رو از یکسو کننده‌های تک فاز با بارهای مختلف به عنوان مدل بار مصرف کننده استفاده شده است.

#### ۸-۳-۲-۴ مدل سازی دیگر عوامل

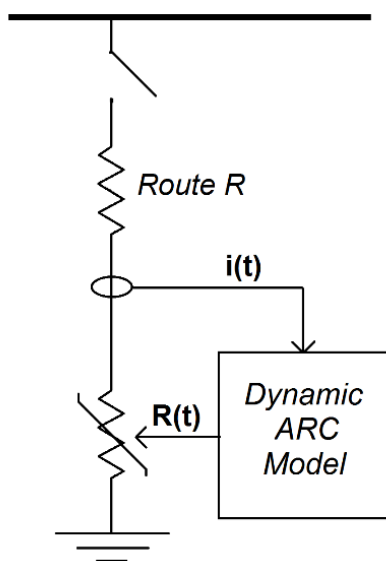
علاوه بر انواع بارها بیان شده، رخداد‌های دیگری نیز در شبکه رخ می‌دهد که باعث ایجاد تغییرات در سیگنال عادی ولتاژ و جریان می‌شود. یک نمونه از آن اشباع ترانسفورماتور می‌باشد که در این پایان نامه اشباع ترانسفورماتور ۲۰ کیلوولت به ۴۰۰ ولت بررسی شده است. علاوه بر اشباع ترانسفورماتور از تغییر تپ چنجر نیز به عنوان یک رخداد عادی در شبکه استفاده شده است.

### ۴-۳- مدل خطای امپدانس بالا

همان طور که در فصل ۲ بیان گردید مدل‌های مختلفی برای بیان رفتار خطای امپدانس بالا توسط محققین ارائه گردیده است که هر کدام به نوبه خود دارای مزایا و معایبی هستند. در این پایان‌نامه سعی شده است تا در کنار مزایای مدل‌های دیگر از معایب آن نیز کاسته شود. یکی از اساسی‌ترین معایب مدل‌ها، محدود بودن هر مدل برای بیان ویژگی‌های مختلف خطای امپدانس بالا می‌باشد. از این رو برای پوشش بیشتر ویژگی‌های خطای امپدانس بالا از چندین مدل خطای امپدانس بالا با مقادیر متفاوت استفاده شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

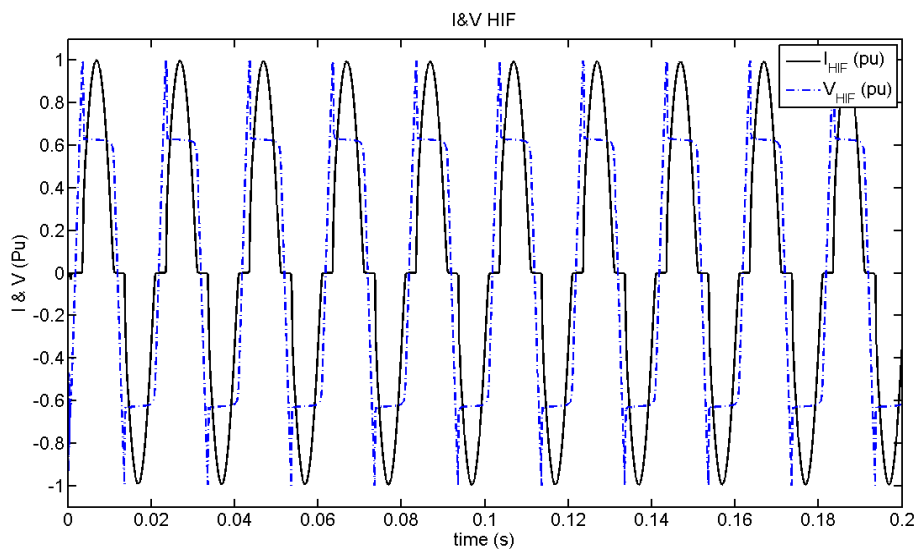
### ۴-۳-۱- مدل دینامیکی

مبنای مدل دینامیکی بر اساس رسانایی متغیری در اثر قوس الکتریک می‌باشد. این مدل با یک مقاومت متغیر با مقدار رسانایی رابطه دینامیکی مدل می‌شود. رابطه دینامیکی بیان شده (۲-۱) تا (۲-۴) با گرفتن جریان مسیر خطا و استفاده از پارامترهای تعریف شده برای مدل‌سازی قوس الکتریکی، مقدار رسانایی را محاسبه و به مقاومت  $R(t)$  موجود اعمال می‌کند. شکل (۴-۸) مدل دینامیکی استفاده شده در کنار مقاومت مسیر با کلید اتصال به خط را نشان می‌دهد.

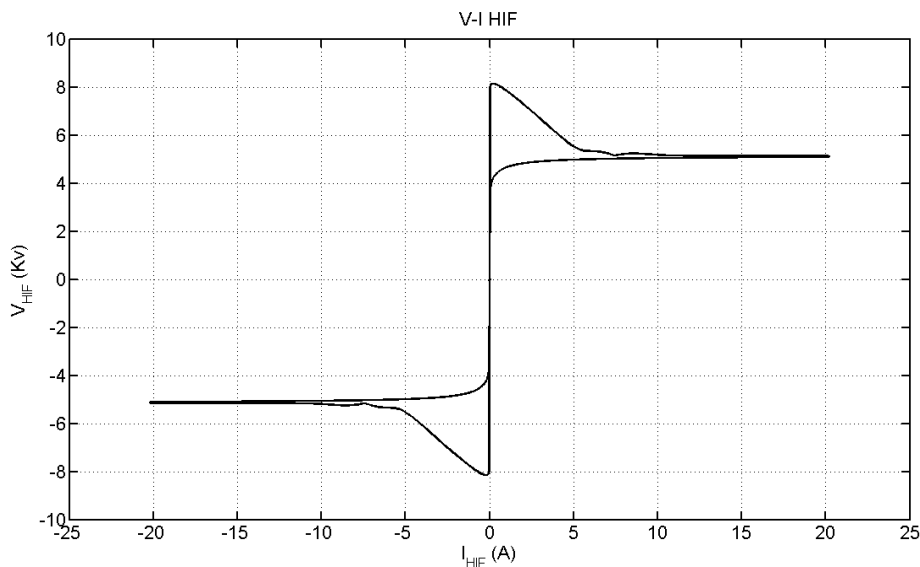


شکل (۴-۸): مدل دینامیکی HIF بکار رفته در پایان‌نامه.

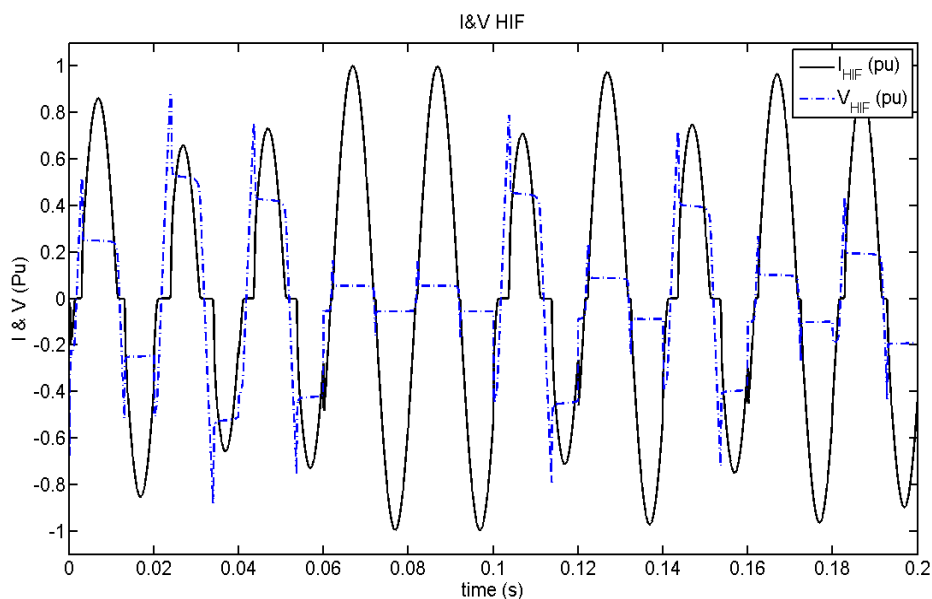
برای داشتن تغییرات ویژگی در این مدل از تغییر در پارامترهای ثابت زمانی  $\tau$ ، ثابت ولتاژ قوس  $u_0$ ، مقاومت طولی قوس و  $L$  طول قوس الکتریکی استفاده می‌گردد. شکل (۹-۴) یک نمونه از منحنی ولتاژ و منحنی جریان مدل دینامیکی خطای امیدانس بالا و شکل (۱۰-۴) یک نمونه از منحنی ولتاژ-جریان HIF را نشان می‌دهد. برای بوجود آوردن رفتار تصادفی در سیگنال خطای امیدانس بالا می‌توان پارامترهای در اختیار را به صورت تصادفی حول مقادیر ثابت تغییر داد. به طور مثال در شکل (۱۱-۴) پارامتر طول قوس الکتریکی به صورت تصادفی تغییر می‌کند.



شکل (۹-۴): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل دینامیکی HIF.



شکل (۱۰-۴): منحنی ولتاژ-جریان یک نمونه از مدل دینامیکی HIF.

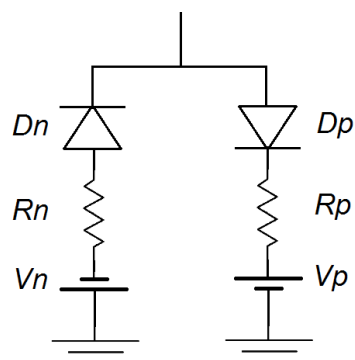


شکل (۱۱-۴): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل دینامیکی HIF.

یکی از نقص‌های مدل دینامیکی عدم پوشش ویژگی عدم تقارن دو نیم سیکل مثبت و منفی می‌باشد.

#### ۴-۳-۲- مدل الکتریکی

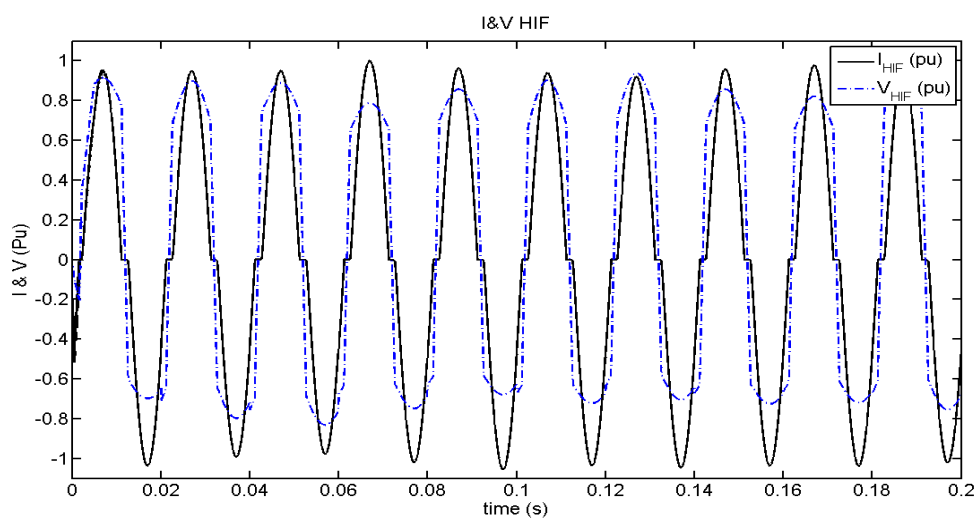
این مدل مطابق شکل (۱۲-۴) دارای دو مسیر دیودی موازی با المان‌های مقاومت و منبع ولتاژ به صورت معکوس می‌باشد.



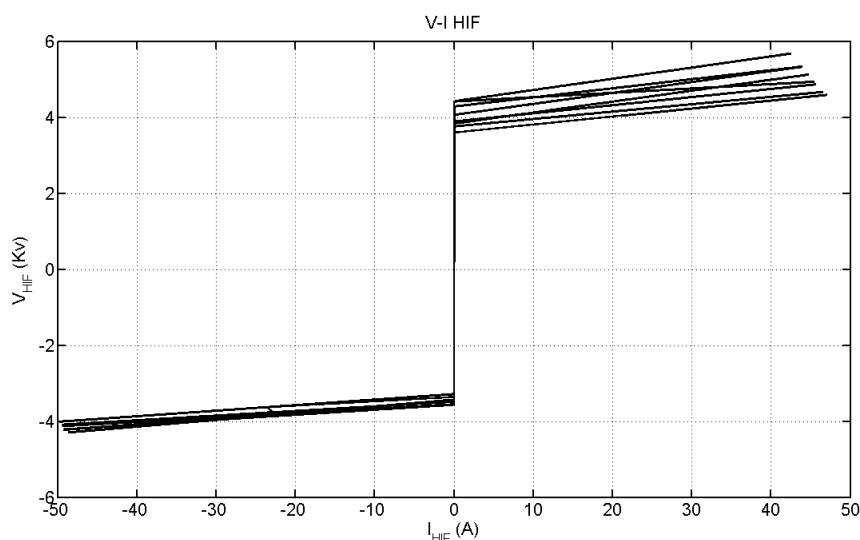
شکل (۱۲-۴): مدل الکتریکی HIF بکار رفته در پایان‌نامه.

در این مدل دیود شاخه مثبت در زمان بیشتر شدن ولتاژ خط از ولتاژ مستقیم مثبت شروع به هدایت کرده و با مقاومت مسیرش کنترل جریان می‌گردد و معکوس این روند در نیم سیکل منفی نیز

انجام می‌شود. از مزیت این مدل پوشش عدم تقارن نیم سیکل مثبت و منفی می‌باشد. همچنین برای پوشش ویژگی تصادفی بودن خطای امپدانس بالا می‌توان با تغییر تصادفی مقادیر پارامترهای  $R_p$ ،  $R_n$  و  $V_p$  به این ویژگی رسید. شکل (۴-۱۳) منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه الکتریکی از HIF با پارامترهای تصادفی را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۴-۱۴) منحنی ولتاژ-جریان HIF در حالت تصادفی و عدم تقارن نیم سیکل مثبت و منفی را نشان می‌دهد. یکی از نقص‌های مدل الکتریکی HIF فاصله گرفتن از ویژگی دینامیکی قوس الکتریکی می‌باشد.



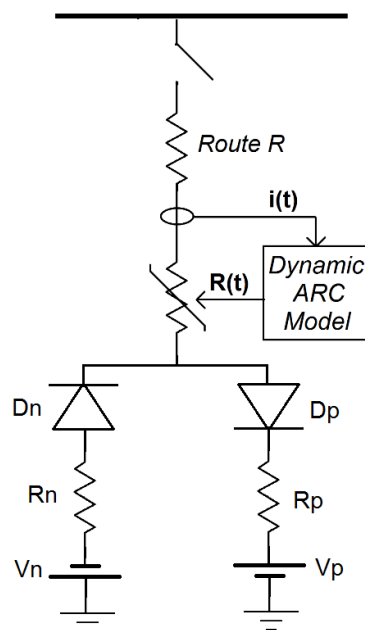
شکل (۴-۱۳): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل الکتریکی HIF.



شکل (۴-۱۴): منحنی ولتاژ-جریان یک نمونه از مدل الکتریکی HIF.

### ۴-۳-۳- مدل ترکیبی

این مدل یک مدل ترکیبی از روابط دینامیکی قوس الکتریکی در کنار مدل الکتریکی در HIF امتداد مقاومت مسیر می‌باشد. این مدل نه تنها مشکلات بیان شده دو مدل قبلی را ندارد بلکه دارای مزایای بیشتری نیز می‌باشد. شکل (۴-۱۵) چگونگی مدار برای اتصال به خط با کلید اتصال و مقاومت مسیر را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۵): مدل ترکیبی HIF.

این مدل می‌تواند ویژگی‌های متعددی از رفتار خطای امپدانس بالا را برآورده سازد. به طور مثال برای عدم تقارن نیم سیکل مثبت و منفی از تغییر در دو مسیر دیودی استفاده می‌شود و یا برای ویژگی تصادفی از تغییر پارامترهایی همچون مقاومت‌ها و منبع ولتاژ و حتی طول قوس الکتریکی استفاده می‌شود. با استفاده از پارامترهای در دسترس می‌توان مدل‌های بسیاری از خطای امپدانس بالا را شبیه‌سازی نمود. این تفاوت‌ها شامل موارد زیر می‌باشد:

- متفاوت بودن مقاومت مسیر خطا
- متفاوت بودن پارامترهای دینامیکی ( $l, r, u_0$ )



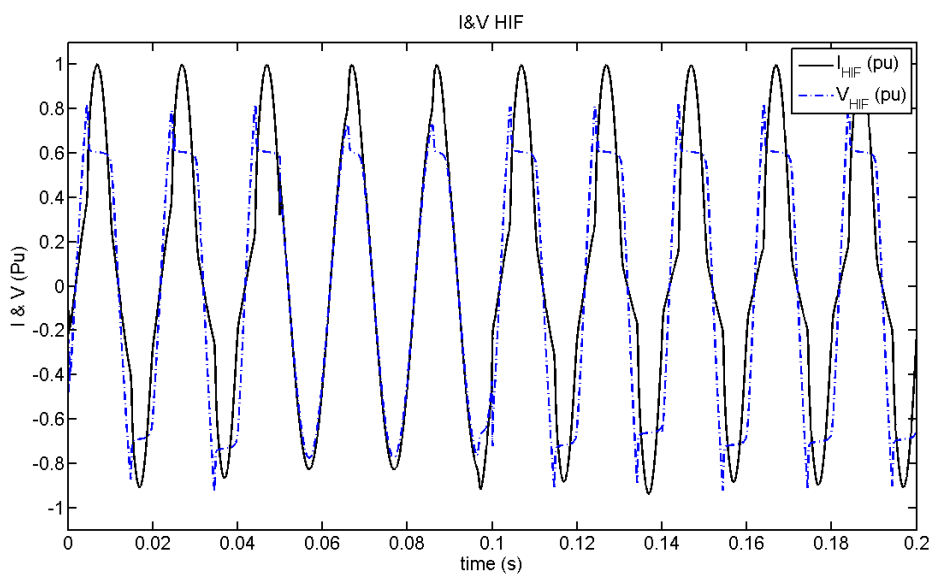
- تغییر تصادف پارامترهای دینامیکی حول مقادیر متفاوت  $(l, r, u_0)$

- متفاوت بودن مقاومت‌ها منبع DC شاخه‌های موازی

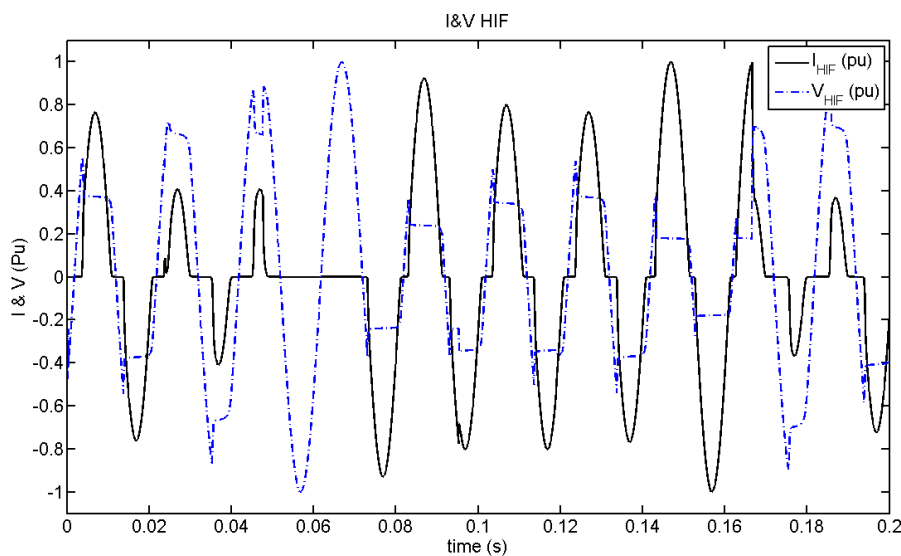
- تغییر تصادفی مقادیر شاخه‌های موازی حول مقادیر متفاوت  $(R_n, R_p, V_n, V_p)$

تغییرات گوناگون در پارامترهای مدل به دلیل بوجود آوردن ویژگی‌های گوناگون وقوع خطا در شرایط واقعی می‌باشد. شکل (۴-۱۶) و شکل (۴-۱۷) دو نمونه از منحنی ولتاژ و جریان گذرند از مدل

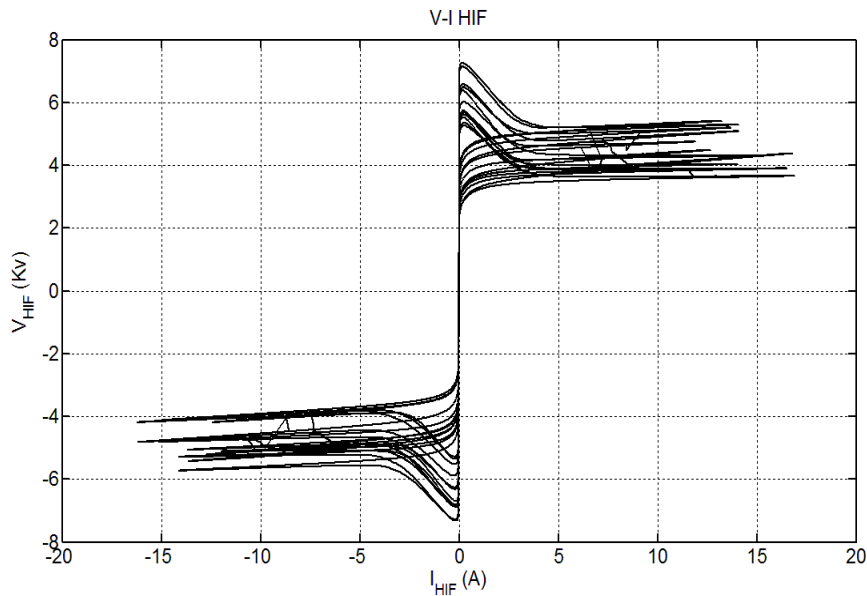
HIF ترکیبی و شکل (۴-۱۸) یک نمونه از منحنی ولتاژ-جریان می‌باشد.



شکل (۴-۱۶): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل ترکیبی HIF.



شکل (۴-۱۷): منحنی ولتاژ و جریان یک نمونه از مدل ترکیبی HIF.

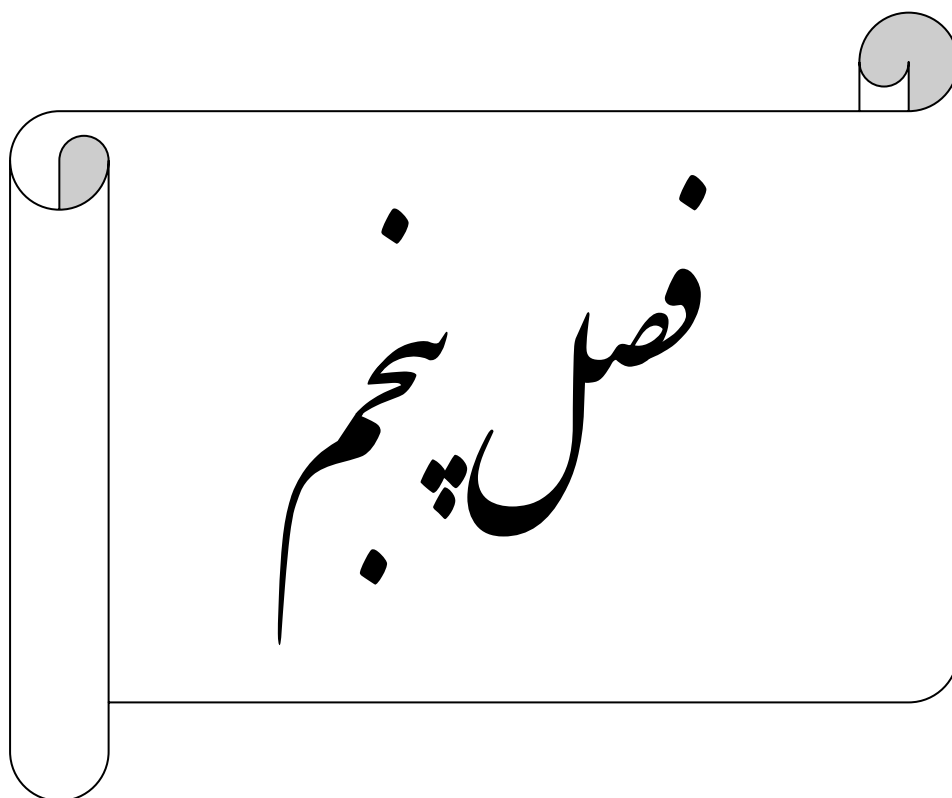


شکل (۴-۱۸): منحنی ولتاژ-جریان یک نمونه از مدل ترکیبی HIF.

#### ۴-۴- جمع بندی

در این فصل چگونگی ساختار و اجزای دو نوع شبکه توزیع مورد آزمایش در این پایان نامه بیان گردید. همچنین انواع مدل‌های بار الکتریکی خطی و غیرخطی استفاده شده در شبکه، مدل‌سازی و بررسی شد. در کنار تنوع بار الکتریکی سه دسته مدل الکتریکی، دینامیکی و ترکیبی خطای امپدانس بالا برای شبیه‌سازی در شبکه نمونه بررسی و ارزیابی شد.

پس از شبیه‌سازی کل اجزای شبکه توزیع نمونه، باید سیستم در حالت‌های متنوع بار مصرفی و خطای امپدانس بالا مورد اجرا گردد و سیگنال فیدر برای تحلیل و بررسی در روش تشخیص ذخیره گردد. این روند در فصل بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد.



بیان و شیوه سازی روش پیشنهادی

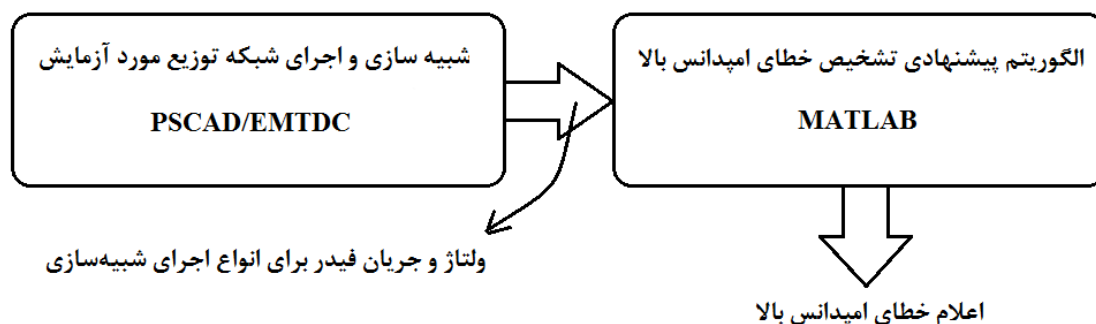
## فصل ۵- بیان و شبیه‌سازی روش پیشنهادی

### ۵-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا چگونگی انتقال داده‌های خروجی PSCAD به الگوریتم پیشنهادی بیان می‌شود. در بخش بعد کلیات الگوریتم روش پیشنهادی بیان می‌شود. سپس چگونگی استخراج شاخص تمایز به کمک تبدیل موجک بیان می‌گردد. در بخش بعدی چگونگی دسته‌بندی خطا به کمک روش فازی بیان می‌شود. در نهایت با بررسی شبیه‌سازی انواع حالات برای شاخص‌ها، بهترین شاخص برای داشتن بالاترین دقت تشخیص خطای امپدانس بالا و فاز رخداد خطا اعلام و الگوریتم نهایی ارائه می‌شود.

### ۵-۲- انتقال سیگنال ولتاژ و جریان به الگوریتم پیشنهادی

در فصل قبل شبیه‌سازی شبکه توزیع سیستم قدرت در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC انجام شد. مدت‌زمان اجرای هر شبیه‌سازی یک ثانیه با دوره نمونه‌گیری ۱۰ میکروثانیه می‌باشد. پس از اجرای هر شبیه‌سازی داده‌های سیگنال ولتاژ و جریان برای تجزیه و تحلیل و اجرای الگوریتم روش پیشنهادی به نرم‌افزار MATLAB انتقال داده می‌شود.



شکل (۵-۱): انتقال سیگنال ولتاژ و جریان به الگوریتم پیشنهادی.

تعداد تنوع اجرای شبکه آزمایش اول در نرم افزار PSCAD ۱۰۰ بار و شبکه آزمایش دوم ۱۰۰ بار می‌باشد. در شبکه آزمایش اول ۵۰ بار انواع حالت عادی کارکرد شبکه توزیع با انواع بارها و ۵۰ بار حالت رخ داد انواع خطاهای HIF را شامل می‌شود. در شبکه آزمایش دوم نیز ۵۰ بار حالت کارکرد

عادی و ۵۰ بار حالت وقوع HIF مورد اجرا قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی‌ها انواع بارها با مقادیر مختلف در باس‌های موجود استفاده شده است همچنین تنوع خطای امیدانس بالا در همه خطوط و فواصل و فازهای متفاوت انجام پذیرفته است.

### ۵-۳- بیان کلی الگوریتم پیشنهادی تشخیص HIF

الگوریتم روش پیشنهادی بر مبنای استفاده از پردازش سیگنال به کمک تبدیل موجک گسسته و دسته‌بندی به کمک تقریبگر تابع فازی<sup>۱</sup> می‌باشد. این الگوریتم به طور کلی از چهار بلوک ذیل تشکیل می‌گردد.

بلوک (۱) اندازه‌گیری سیگنال فیدر: این بلوک وظیفه اندازه‌گیری و ذخیره سیگنال ولتاژ و جریان فیدر با فرکانس نمونه‌گیری ۱۰۰ کیلوهرتز به مدت یک ثانیه در هر دوره را بر عهده دارد.

بلوک (۲) تبدیل موجک گسسته: این بلوک وظیفه پردازش سیگنال اندازه‌گیری و ذخیره شده از بلوک قبل را بر عهده دارد. این کار با انتخاب موجک مادر مناسب و سطح جزئیات مناسب صورت می‌گیرد.

بلوک (۳): ساخت شاخص تمایز: این بلوک وظیفه بسیار مهم ساخت شاخص تمایز به کمک سطوح جزئیات خروجی تبدیل موجک را بر عهده دارد.

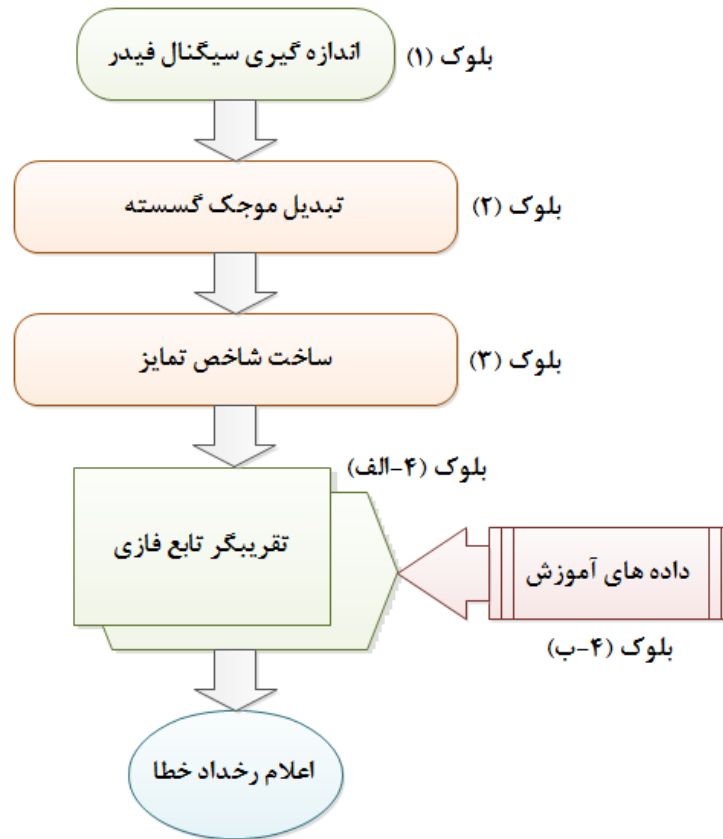
بلوک (۴): دسته‌بندی: پس از ساخت شاخص‌های تمایز باید با استفاده از معیارها دو حالت خطا و غیر خطا را از هم تفکیک نمود، این کار توسط روش تقریبگر تابع فازی (۴-الف) صورت گرفته است که با استفاده از داده‌های آموزش (۴-ب) این کار را انجام می‌دهد.

الگوریتم شکل (۵-۲) کلیت الگوریتم روش پیشنهادی را مطرح می‌کند. همچنین الگوریتمی مشابه با همین ساختار برای تشخیص فاز وقوع خطای امیدانس بالا به موازات این الگوریتم نیز وجود دارد.

---

<sup>۱</sup> Fuzzy function approximation

قابل توجه است که در الگوریتم کلی روش پیشنهادی، موجک مادر مناسب و سطح جزئیات مناسب در تبدیل موجک، ساخت شاخص از خروجی موجک و چگونگی دسته‌بندی تقریبگر تابع فازی مطرح نشده است. در ادامه به بررسی بخش‌های مختلف الگوریتم پرداخته می‌شود.



شکل (۲-۵): الگوریتم کلی روش پیشنهادی.

## ۵-۴- یافتن و ساختن شاخص تمایز به کمک خروجی موجک

برای انتخاب شاخص مناسب باید خروجی موجک سیگنال در انواع حالات کارکرد عادی شبکه و انواع حالات خطای امیدانس بالا مشاهده گردد. تاثیر در انتخاب انواع موجک مادر و سیگنال‌ها و حتی سطح جزئیات کاملاً متفاوت باشد. از این رو هر انتخاب باید هوشمندانه صورت پذیرد و برای تأیید مناسب بودن انتخاب باید نتیجه نهایی تشخیص نیز بهترین دقت را داشته باشد. اگر خواسته شود معیارهایی از تفاوت خروجی موجک در رخداد‌های مختلف بیان داشت، معیارهایی همچون میانگین دامنه خروجی، بازه تغییرات دامنه خروجی از حداقل تا حداکثر، متوالی

بودن مقادیر، فاصله مابین پرش‌ها را در نظر گرفت. این معیارها یک نوع بیان ساده از ظاهر سیگنال خروجی موجک می‌باشد و مورد استنتاج دقیقی نمی‌تواند واقع شود.

برای ساده‌تر شدن تحلیل خروجی موجک، از سطح جزئیات خروجی موجک به اندازه یک بازه مناسب مجموع قدر مطلق گرفته می‌شود. این کار با گرفتن مجموع قدر مطلق جزئیات<sup>1</sup> (SAD) از خروجی سطح‌های جزئیات انتخاب شده صورت می‌گیرد و از رابطه (۱-۵) محاسبه می‌شود.

$$SAD_{jx}[k] = \sum_{n=k-N+1}^k |D_{jx}[n]| \quad (1-5)$$

در رابطه فوق  $D_{jx}$  جزئیات خروجی تبدیل موجک گسسته در سطح  $j$  از سیگنال  $x$  فیدر می‌باشد و  $N$  پنجره بازه اندازه‌گیری است.

خروجی تبدیل موجک و مجموع قدر مطلق جزئیات، یک تابع گسسته متغیر می‌باشد که نمی‌تواند به صورت مستقیم به عنوان ورودی یک الگوریتم هوشمند و یا الگوریتم دسته‌بندی در نظر گرفته شود. از این رو باید شاخصی از خروجی موجک استخراج کرد که رفتار مورد نظر از سیگنال را بیان دارد. همچنین ویژگی تمایز یافت شده را باید به گونه‌ای به یک عدد و شاخص تبدیل نماید. برای تفاوت در اندازه دامنه از میانگین کل خروجی SAD و همچنین برای تفاوت در تغییرات SAD حول میانگین از واریانس استفاده شده است. از این رو با بررسی انجام شده دو ویژگی میانگین و واریانس از خروجی SAD به ترتیب  $F_{1jx}$  و  $F_{2jx}$  به عنوان دو شاخص تمایز انتخاب می‌شوند که از روابط زیر محاسبه می‌گردند.

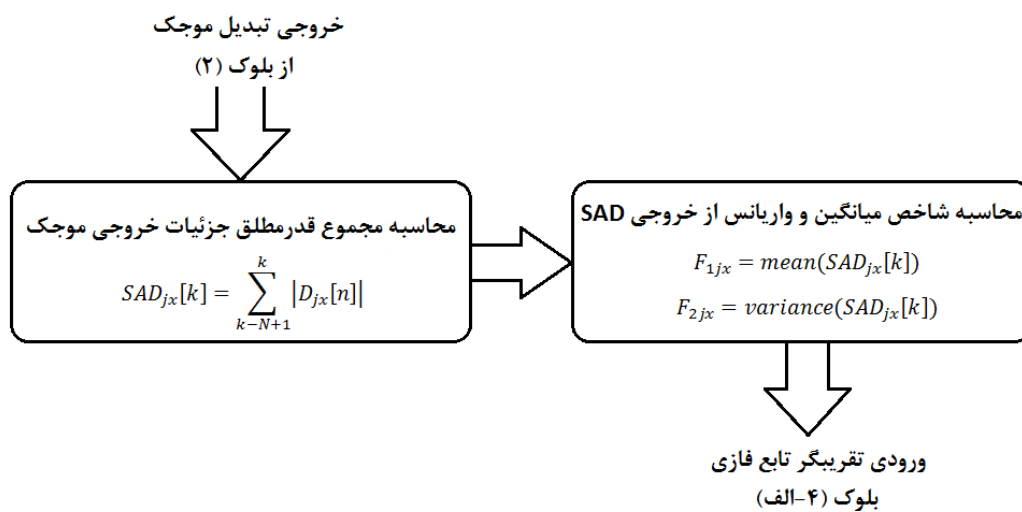
$$F_{1jx} = \text{mean}(SAD_{jx}[k]) \quad (2-5)$$

$$F_{2jx} = \text{variance}(SAD_{jx}[k]) \quad (3-5)$$

---

<sup>1</sup> Summation Absolute Details

قابل بیان است که دو شاخص تمایز محاسبه شده از (۲-۵) و (۳-۵)، می تواند برای انواع موجک مادر، سطوح مختلف جزئیات (j) و هر نوع سیگنال فیدر (x) ساخته شود، که هر کدام نسبت به دیگری دارای تفاوت می باشد و الزاماً انواع حالات ممکن به تشخیص درست منجر نمی شود. از این رو باید دو شاخص را نسبت به هم در مختصات دو بعدی برای حالت کار عادی شبکه و حالت رخداد HIF رسم نمود و سپس هوشمندانه حالات مناسب را تعیین نمود. روند بلوک (۳) از الگوریتم کلی پیشنهادی در شکل (۳-۵) آورده شده است.



شکل (۳-۵): روند بلوک (۳) از الگوریتم کلی روش پیشنهادی.

همانند روند انجام شده برای تشخیص خطای امپدانس بالا، این روند برای تشخیص فاز خطا نیز انجام می شود. یعنی سیگنال فیدر در هر سه فاز خطا اندازه گیری شده و خروجی موجک در سطوح مختلف مورد بررسی قرار گیرد. سپس به کمک SAD میانگین و واریانس آن محاسبه و در نهایت در مختصات دو بعدی برای فاز دارای خطا و فاز بدون خطا رسم می شود.

## ۵-۵- روش فازی به عنوان ابزار تقریبگر تابع خطا HIF

تابع تقریبگر فازی یک روش برای مدل کردن سیستم های غیرخطی می باشد. بعضی از انواع سیستم های فازی را می توان به شکل فرمول غیرخطی بسته نوشت. این فرمول های بسته محاسبات سیستم های فازی را ساده می کنند و از جهت دیگر کار با سیستم فازی را به عنوان یک تابع تقریب



فراهم می‌کند. در طراحی سیستم‌های فازی انتخاب تعداد قواعد مناسب، بسیار مهم است، چرا که انتخاب تعداد زیاد قواعد، باعث پیچیده‌تر شدن سیستم فازی شده که ممکن است برای مسئله ضرورت نباشد و یا انتخاب تعداد محدودی قواعد باعث عدم پاسخ صحیح گردد.

### ۵-۵-۱- تابع تقریبگر فازی

ایده اساسی روش سیستم فازی به عنوان تقریبگر تابع در زوج‌های ورودی-خروجی  $(x_i, y_i)$  می‌باشد [۵۱]. برای محاسبه تابع تقریبگر از رابطه (۴-۵) استفاده می‌شود.

$$F(x_1, \dots, x_m) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \times \prod_{j=1}^m e^{-\left(\frac{x_j - x_{ij}}{\sigma}\right)^2}}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m e^{-\left(\frac{x_j - x_{ij}}{\sigma}\right)^2}} \quad (۴-۵)$$

در رابطه (۴-۵)  $n$  تعداد زوج‌های ورودی-خروجی به عنوان داده آموزش،  $m$  تعداد متغیر ورودی و پارامتر  $\sigma$  انحراف معیار تابع فازی ساز از نوع گوسی می‌باشد.

در این رابطه با انتخاب مناسب  $\sigma$ ، سیستم فازی بیان شده،  $n$  زوج ورودی-خروجی را با هر دقت خواسته شده تطبیق می‌دهد.  $\sigma$  کوچک باعث می‌شود خطای تطبیقی کوچک شود و  $f(x)$  کمتر هموار گردد و اگر  $f(x)$  هموار نباشد برای نقاطی که در مجموعه آموزش قرار ندارد، ممکن است عمومیت نداشته باشد و مقدار  $\sigma$  بزرگتر خطای تطبیق بالاتری دارد. بنابراین  $\sigma$  باید به نحوی انتخاب شود که تعادلی را بین تطبیق و عمومیت بوجود آورد [۵۱].

رابطه (۴-۵) برای ساخت تابع دسته‌بندی وقوع و عدم وقوع خطای امیدانس بالا با دو ورودی  $F_1$  و  $F_2$  توسعه داده و رابطه (۵-۵) حاصل می‌شود.

$$F_{HIF,G}(F_1, F_2) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i * \exp\left(-\left(\frac{F_1 - F_{1i}}{\sigma_1}\right)^2\right) * \exp\left(-\left(\frac{F_2 - F_{2i}}{\sigma_2}\right)^2\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{F_1 - F_{1i}}{\sigma_1}\right)^2\right) * \exp\left(-\left(\frac{F_2 - F_{2i}}{\sigma_2}\right)^2\right)} \quad (۵-۵)$$

در رابطه (۵-۵)  $F_{HIF,G}$  تابع تقریب وقوع خطای امیدانس بالا در شبکه،  $F_1$  و  $F_2$  شاخص ورودی تابع برای داده جدید،  $n$  تعداد زوج های ورودی-خروجی آموزش،  $F_{1i}$  و  $F_{2i}$  داده آموزش شاخص ورودی و  $y_i$  خروجی داده آموزش متناظر با ورودی می باشد. در این رابطه  $y_i$  برای داده های آموزش خطای امیدانس بالا برابر با یک و برای داده های آموزش غیر خطا برابر با صفر است. بنابراین، در صورتی که نتیجه تابع  $F_{HIF,G}$  برای داده یک رخداد جدید برابر با یک شود، بیان کننده وقوع خطای امیدانس بالا در شبکه و در صورتی که برابر با صفر باشد، بیان کننده کارکرد عادی شبکه می باشد. همچنین رابطه مورد نیاز برای دسته بندی تشخیص فاز رخداد خطای امیدانس بالا به صورت زیر می باشد.

$$F_{HIF,Ph}(F_1, F_2) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i * \exp\left(-\left(\frac{(F_1 - F_{1i})^2}{\sigma_1^2}\right)\right) * \exp\left(-\left(\frac{(F_2 - F_{2i})^2}{\sigma_2^2}\right)\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{(F_1 - F_{1i})^2}{\sigma_1^2}\right)\right) * \exp\left(-\left(\frac{(F_2 - F_{2i})^2}{\sigma_2^2}\right)\right)} \quad (۶-۵)$$

در رابطه (۶-۵)  $F_{HIF,Ph}$  تابع تقریب فاز وقوع خطای امیدانس بالا در شبکه،  $F_1$  و  $F_2$  شاخص ورودی تابع برای داده جدید،  $n$  تعداد زوج های ورودی-خروجی آموزش،  $F_{1i}$  و  $F_{2i}$  داده آموزش شاخص ورودی و  $y_i$  خروجی داده آموزش متناظر با ورودی برای فاز وقوع خطا می باشد. در این رابطه  $y_i$  برای داده های آموزشی که مربوط به فاز خطا دار می باشد برابر با یک و برای داده های آموزش فاز بدون خطا برابر با صفر است. بنابراین در صورتی که نتیجه تابع برای داده جدید فاز برابر با یک شود، بیان کننده وقوع خطا در همان فاز می باشد.

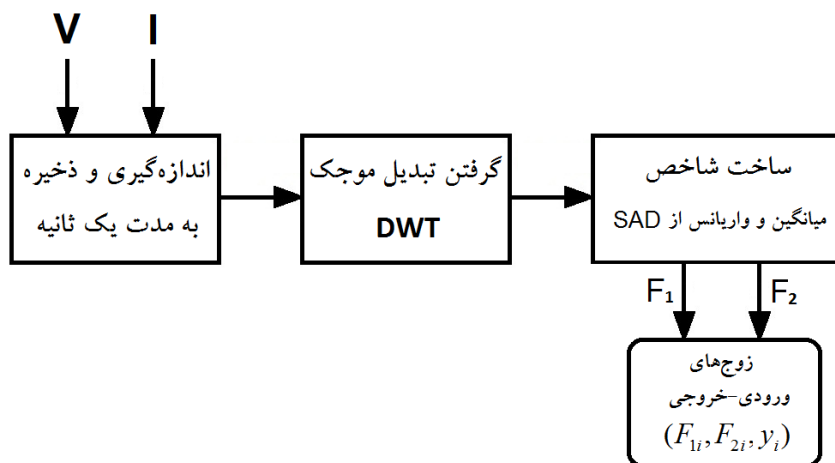
اما دو معادله (۵-۵) و (۶-۵) در صورتی نتیجه مطلوب دارند که داده های آموزش و مقدار  $\sigma$  به طور مناسب تعیین شده باشد. در دو زیر بخش بعد به بررسی این موضع پرداخته می شود.

## ۵-۵-۲- داده های آموزش

هر سیستم هوشمند بنا به یک سری قواعد و اطلاعاتی از قبل، اقدام به تصمیم گیری می کند. سیستم تقریبگر تابع فازی برای دسته بندی نیز از این موضوع مستثنی نیست. تقریبگر تابع فازی نیاز

به زوج‌های ورودی-خروجی دارد تا به عنوان داده‌های آموزش برای تقریب تابع مورد استفاده قرار گیرد.

برای ساخت زوج‌های ورودی-خروجی در ابتدا از سیگنال مورد نظر در فیدر اندازه‌گیری و ذخیره صورت می‌گیرد. در مرحله بعد با استفاده از تبدیل موجک گسسته سیگنال با موجک مادر مناسب تجزیه می‌شود و سپس توسط سطوح جزئیات خروجی موجک شاخص‌ها ساخته می‌شود. روند ساخت شاخص‌ها مطابق بر بخش ۴-۵- با استفاده از روابط (۲-۵) و (۳-۵) از خروجی SAD محاسبه می‌گردد. در مرحله آخر شاخص‌های محاسبه شده به عنوان زوج‌های ورودی-خروجی در کنار خروجی یک برای شاخص HIF و خروجی صفر برای کارکرد عادی شبکه ذخیره می‌گردد. این روند به تعداد مناسب داده آموزش تکرار و نتیجه در بلوک (۴-ب) به عنوان داده‌های آموزش در اختیار تابع تقریبگر فازی بلوک (۴-الف) شکل (۲-۵) قرار می‌گیرد. روند محاسبه و ذخیره داده‌های آموزش در شکل (۴-۵) آورده شده است.



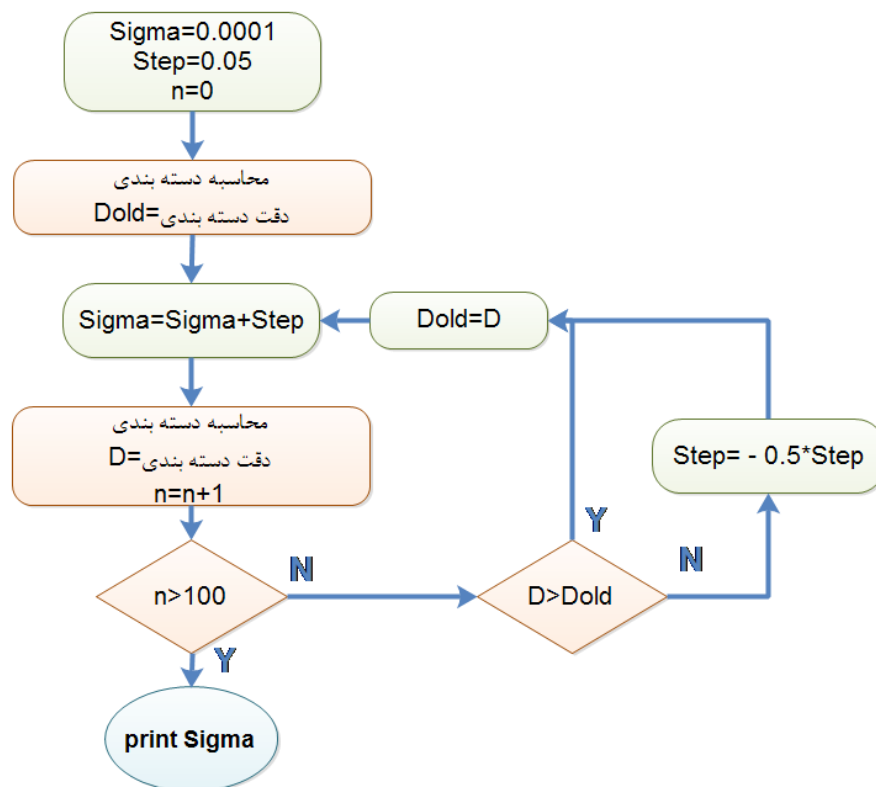
شکل (۴-۵): روند محاسبه و ذخیره داده‌های آموزش در الگوریتم پیشنهادی.

### ۳-۵-۵- یافتن انحراف معیار $\sigma$ مناسب

همان طور که در بخش ۵-۵-۱- بیان شد مقدار  $\sigma$  مناسب مقداری است که تطبیق و عمومیت تابع تقریب فازی را ایجاد کند. برای یافتن مقدار  $\sigma$  مناسب روش‌های مختلفی همچون حداقل مربعات

خطا ارائه شده است که این روش‌های بر اساس تطبیق و عمومیت، برای تعیین  $\sigma$  مناسب به کار می‌روند. اما در استفاده به عنوان ابزار دسته‌بندی، نیاز به حداقل خطای دسته‌بندی در کنار تطبیق و عمومیت می‌باشد. از این رو در این پایان‌نامه از الگوریتم ارائه شده در شکل (۵-۵) برای تعیین  $\sigma$  مناسب استفاده شده است.

این الگوریتم ابتدا با کوچکترین  $\sigma$  شروع می‌شود و در اولین مرحله دقت دسته‌بندی را با کوچکترین مقدار  $\sigma$  محاسبه و ذخیره می‌کند. در مرحله بعد  $\sigma$  را با یک مقدار افزایش می‌دهد و دوباره دقت دسته‌بندی را محاسبه می‌کند. در صورتی که دقت رو به افزایش است  $\sigma$  نیز افزایش می‌یابد. اما وقتی که دقت کاهش بیابد مقدار اضافه شده به  $\sigma$ ، برابر با منفی نیم مقدار قبل شده و الگوریتم تکرار می‌شود. این الگوریتم ۱۰۰ بار تکرار می‌شود. آنگاه می‌توان گفت  $\sigma$  انتخاب شده تقریباً مناسب است. به صورت خلاصه، این الگوریتم حداکثر محلی دقت دسته‌بندی با کوچکترین  $\sigma$  را یافت می‌کند و مقدار  $\sigma$  را در اختیار تقریبگر تابع فازی بلوک (۴-الف) قرار می‌دهد.



شکل (۵-۵): الگوریتم انتخاب  $\sigma$  مناسب در روش پیشنهادی.

## ۵-۶- شبیه‌سازی کلی الگوریتم پیشنهادی

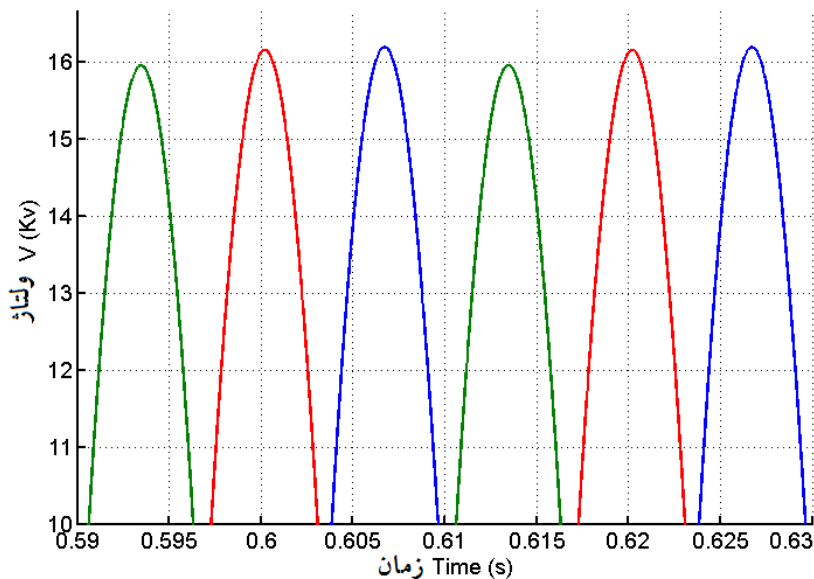
در این بخش به مشاهده و بررسی خروجی بلوک‌های الگوریتم کلی تشخیص HIF پیشنهادی

پرداخت می‌شود. این بخش‌ها عبارتند از:

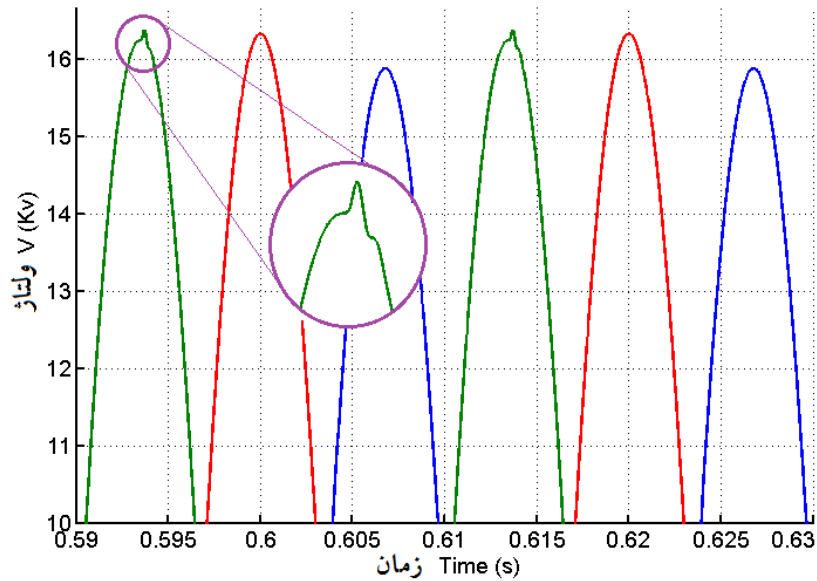
- خروجی اندازه‌گیری سیگنال فیدر
- خروجی تبدیل موجک
- ساخت شاخص تمایز از خروجی موجک

## ۵-۶-۱- خروجی اندازه‌گیری سیگنال فیدر

خروجی اندازه‌گیری سیگنال، ولتاژ و جریان عبوری از فیدر می‌باشد. دو نمونه از ولتاژ فیدر برای حالت عادی بار نامتقارن و حالت رخداد خطای امپدانس بالا در شکل (۵-۶) و شکل (۵-۷) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در حالت بار نامتقارن پیک ولتاژ سه فاز به مقدار ناچیز دارای تغییرات می‌باشد اما در حالت رخداد خطای امپدانس بالا، قله ولتاژ فاز رخداد خطا تخریب شده است.



شکل (۵-۶): ولتاژ سه فاز فیدر برای بار نامتقارن.



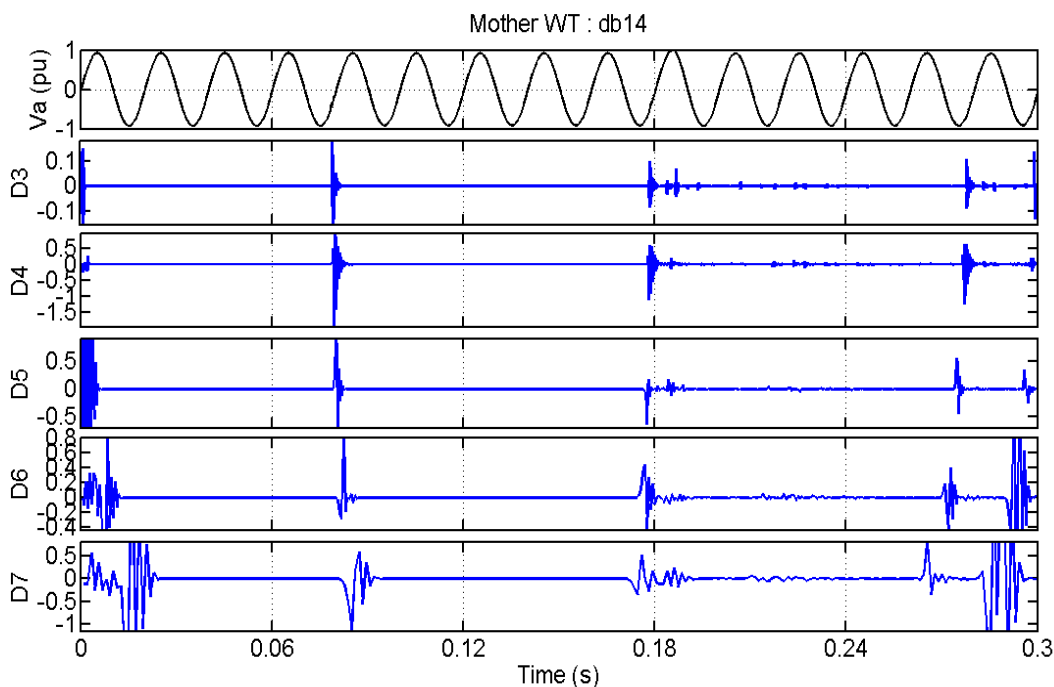
شکل (۷-۵): ولتاژ سه فاز فیدر برای وقوع HIF.

#### ۵-۶-۲- خروجی تبدیل موج گسسته

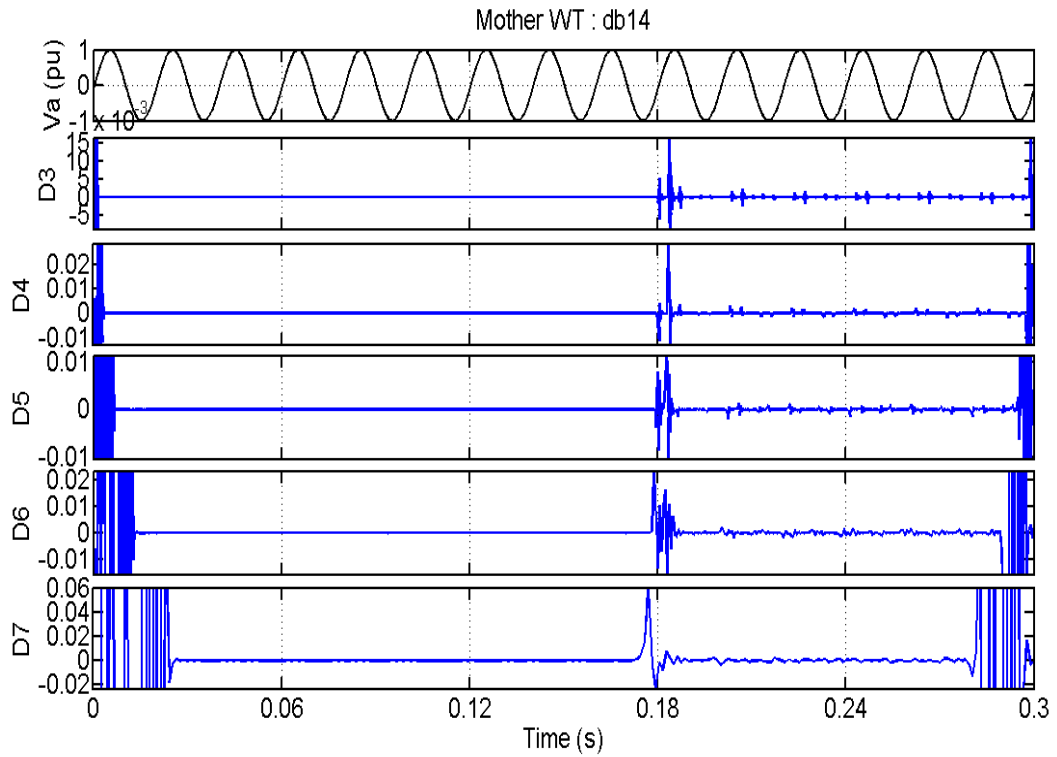
همانطور که بیان شد برای انتخاب شاخص مناسب باید خروجی موجک سیگنال در انواع حالات کارکرد عادی شبکه و انواع حالات خطای امپدانس بالا مشاهده گردد. در این بخش به بیان و بررسی چند نمونه از سطوح موجک‌های خروجی در حالات مختلف خطا و غیر خطا برای ولتاژ فاز a با موجک مادر Db14 پرداخت شده است.

شکل (۸-۵) خروجی موجک حالت کار عادی سیستم در لحظه کلید زنی بار می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود جزئیات خروجی تبدیل موجک در یک لحظه کوتاه و زودگذر دارای مقدار می‌باشد و در باقی صفر است یعنی فقط در لحظه تغییر وضعیت خروجی موجک در این سطوح به خود مقدار می‌گیرد. در شکل (۹-۵) که مربوط به حالت اشباع ترانسفورماتور می‌باشد خروجی سطوح جزئیات دارای مقادیر کوچک و متناوب می‌باشد به گونه‌ای که در بازه زمانی مشخص مقادیر عیناً تکرار می‌شود. خروجی سطح جزئیات قوس الکتریکی در سه سطح جزئیات سه، چهار و پنج دارای دامنه نسبتاً کوچک می‌باشد. ولی با توجه به شکل (۱۰-۵) در سطوح شش و هفت دامنه بزرگتری دارد و مقادیر دامنه در طول زمان بسیار نزدیک به هم می‌باشد. شکل (۱۱-۵) خروجی سطوح جزئیات

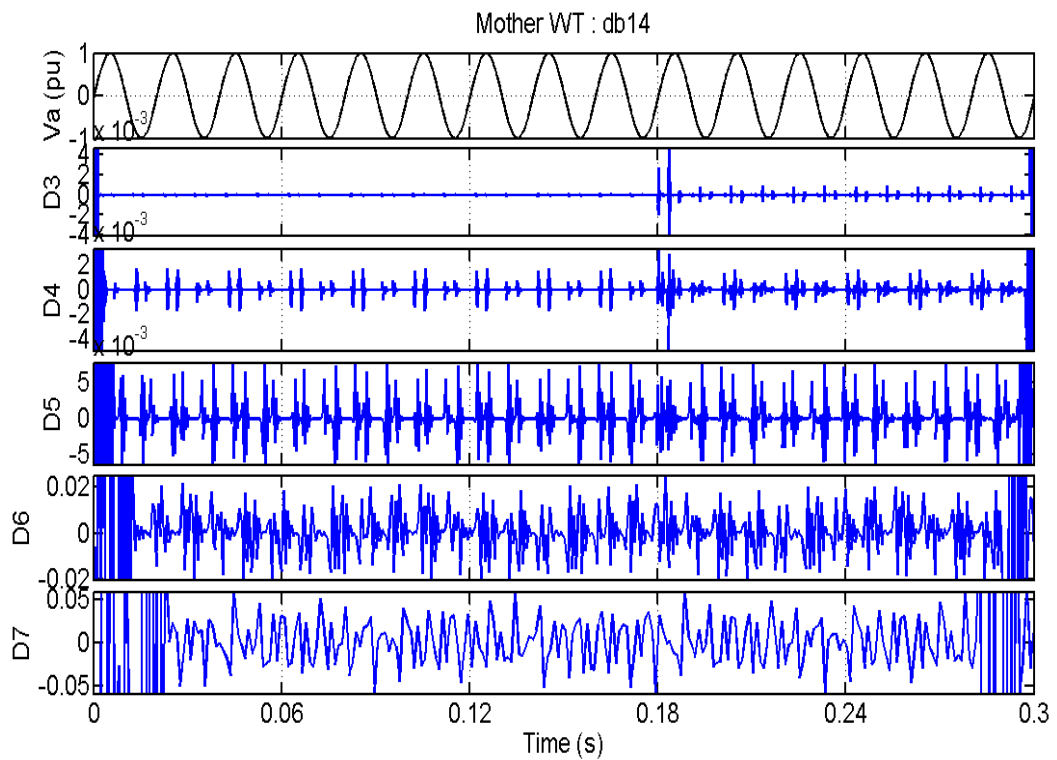
بار تریستوری با زاویه آتش صفر را نشان می‌دهد. در این نوع بار خروجی سطوح جزئیات موجک دارای مقادیر نسبتاً بزرگتر می‌باشد همچنین پرش‌ها بسیار به هم نزدیک و تقریباً تکرار شونده هستند. شکل (۵-۱۲) نیز خروجی موجک بار تریستوری را این بار با زاویه آتش متغیر نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشاهده می‌شود باز هم رفتار خروجی مشابه رفتار خروجی تریستوری با زاویه آتش صفر می‌باشد. شکل (۵-۱۳) خروجی موجک برای بار نامتقارن دیودی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خروجی در دو سطح جزئیات سه و چهار بسیار کوچک است و در سه سطح دیگر کمی بزرگتر و دارای الگوی تکرار شونده‌ای در پرش‌ها می‌باشد. دو شکل (۵-۱۴) و شکل (۵-۱۵) مربوط به خروجی موجک برای رخدادهای خطای امپدانس بالا می‌باشد. ویژگی تقریباً مشترک بین این دو شکل بزرگتر بودن دامنه خروجی، تناوب ضعیف، فاصله بین مقادیر پرش می‌باشد. این تفاوت‌ها به یافتن شاخص تمایز بین وقوع خطای امپدانس بالا و کارکرد عادی کمک می‌کند. اما با بررسی چند سیگنال به سرعت نمی‌توان نتیجه‌گیری کرد.



شکل (۵-۸): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد کلید زنی بار.

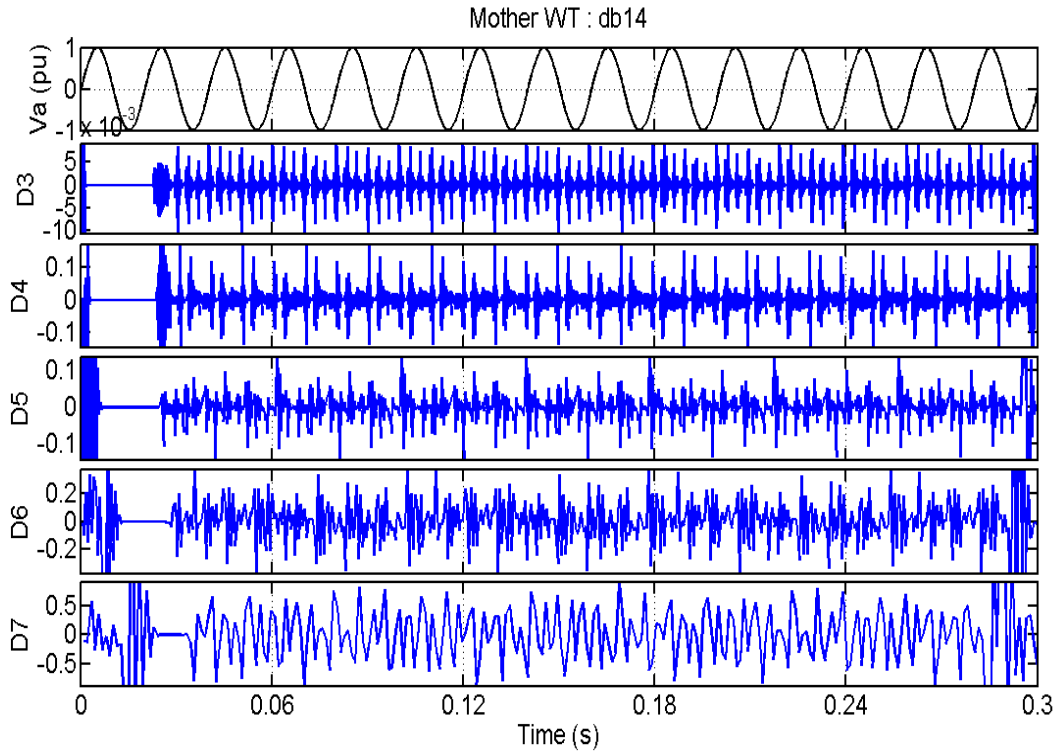


شکل (۹-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد اشباع ترانسفورماتور.

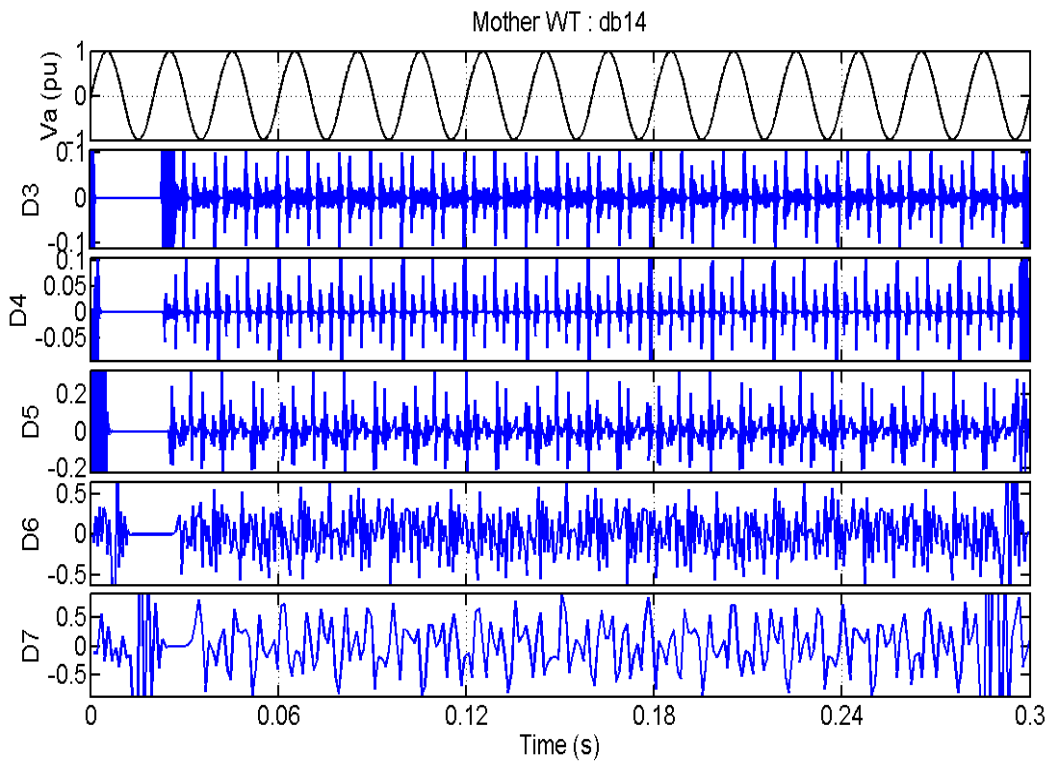


شکل (۱۰-۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد کوره قوس الکتریکی.

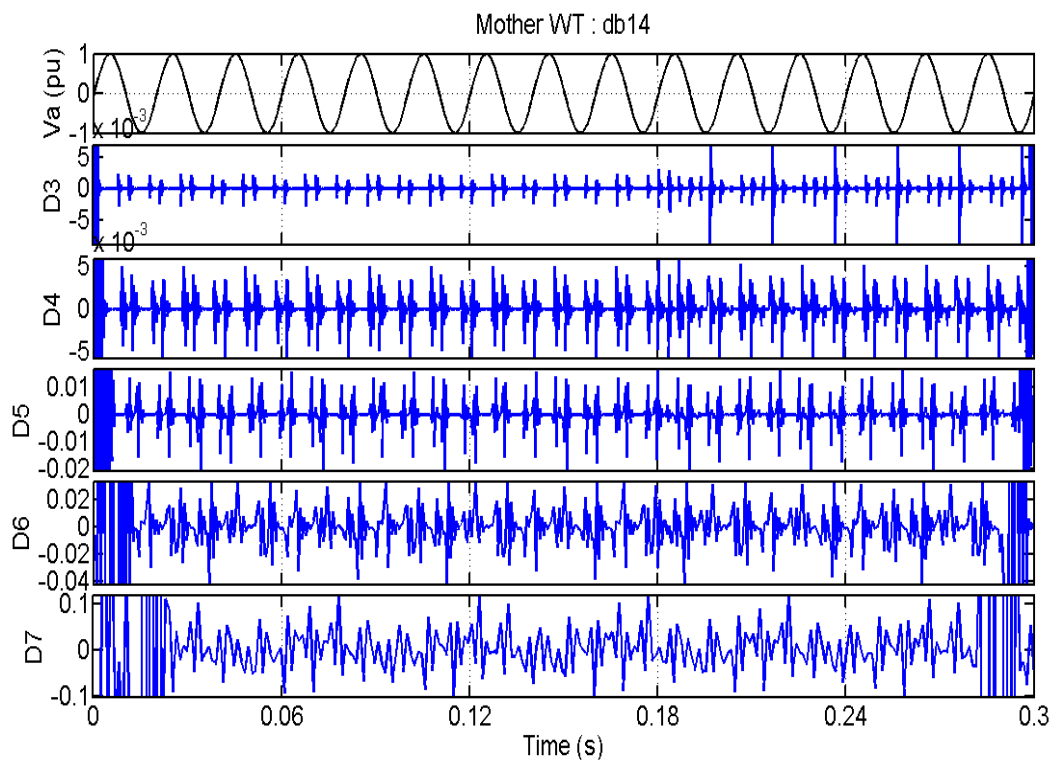




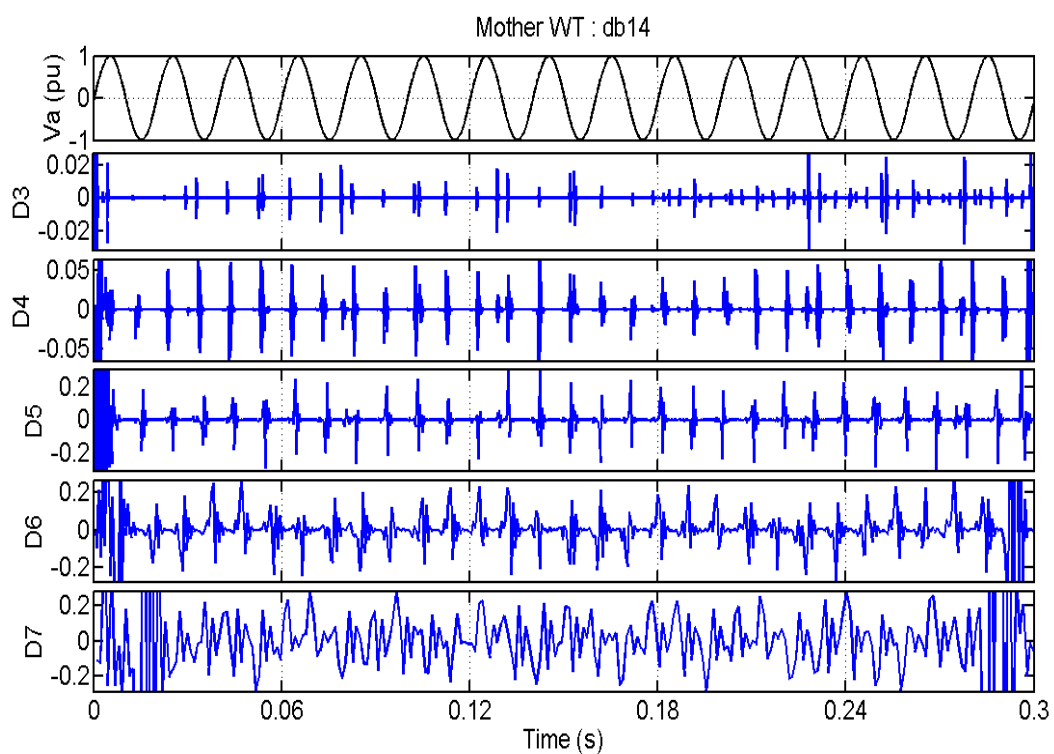
شکل (۵-۱۱): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با بار تریستوری زاویه آتش ثابت.



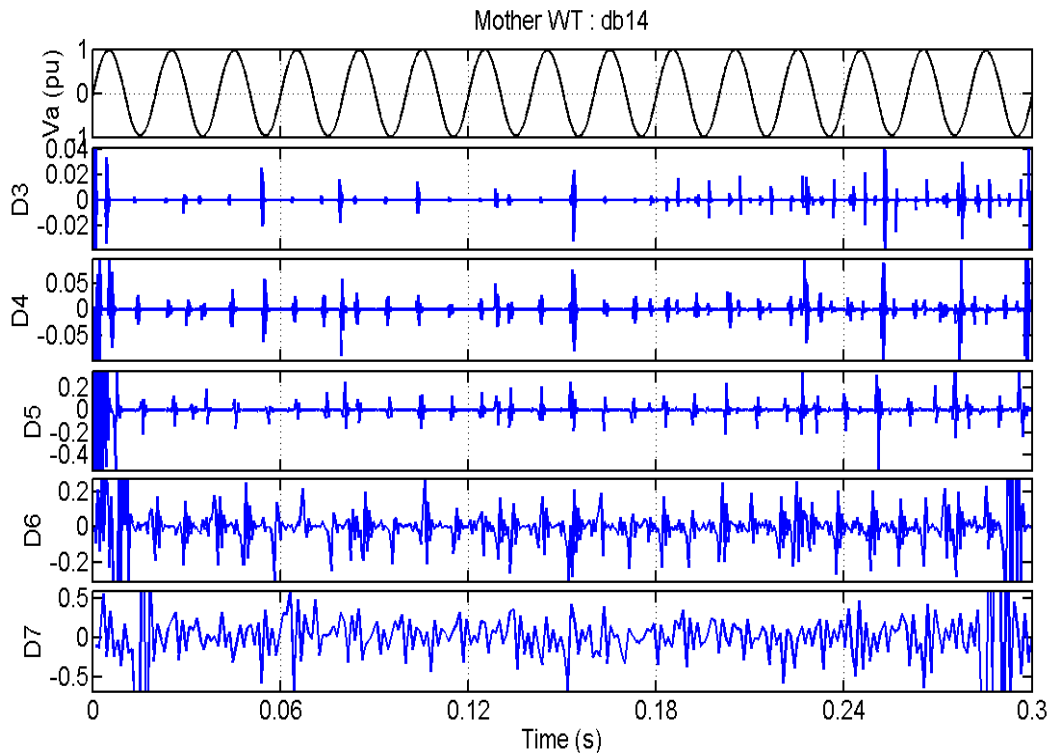
شکل (۵-۱۲): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با بار تریستوری زاویه آتش متغیر.



شکل (۵-۱۳): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با بار نامتعادل دیودی.



شکل (۵-۱۴): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد HIF.

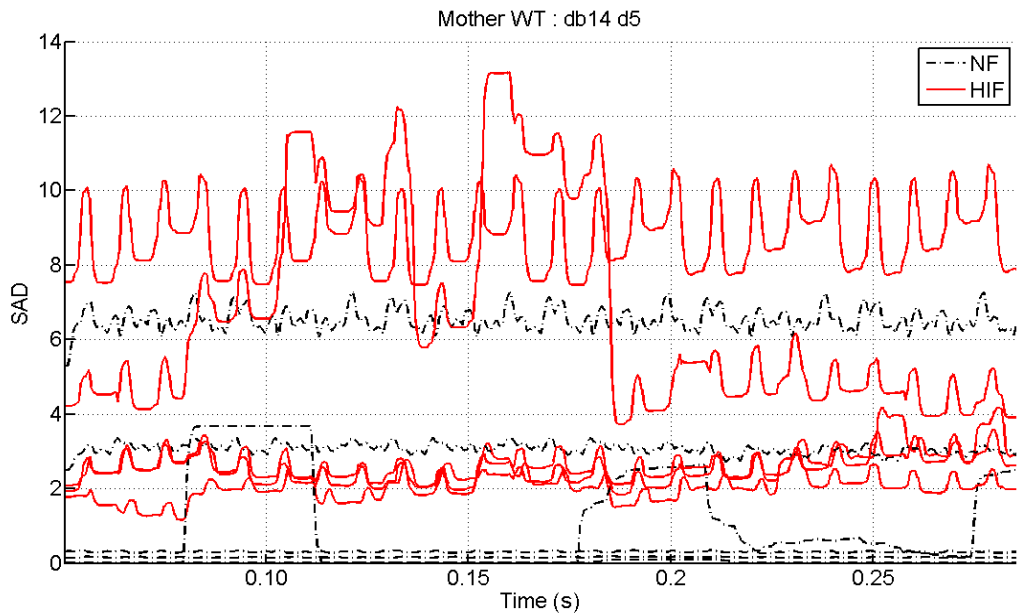


شکل (۵-۱۵): جزئیات موجک از ولتاژ فاز با رخداد HIF.

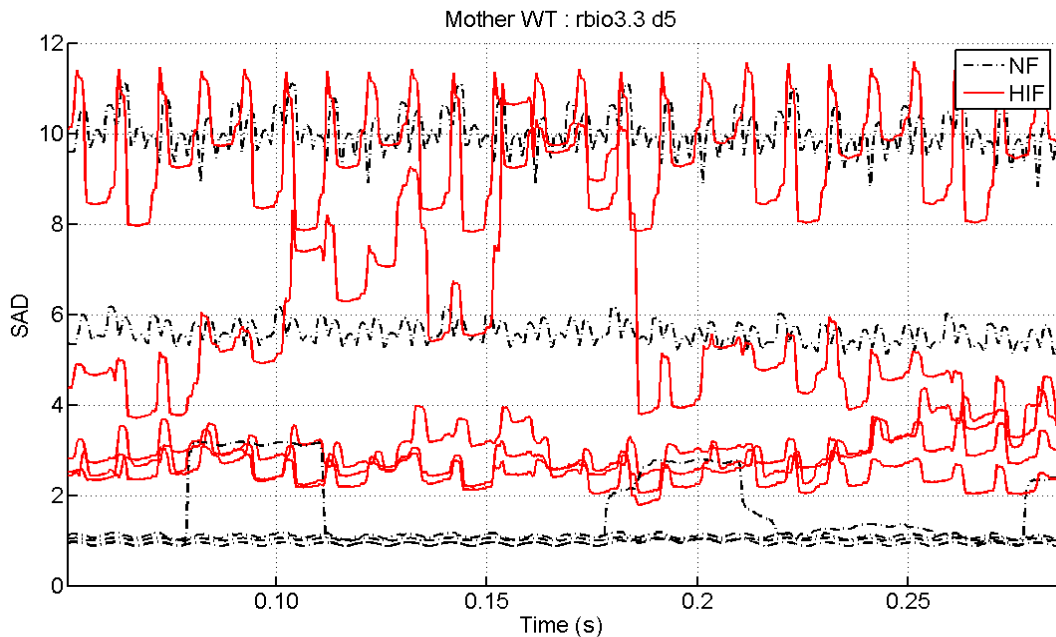
### ۵-۶-۲- ساخت شاخص تمایز به کمک خروجی موجک

در صورتی که از سطوح جزئیات خروجی تبدیل موجک، مجموع قدر مطلق جزئیات گرفته شود، تصمیمات بهتری از رفتار خروجی موجک رخدادها می‌توان داشت. به عنوان نمونه در صورتی که از سیگنال ولتاژ فاز a در سطح جزئیات پنجم با موجک مادر Db14 مجموع قدر مطلق جزئیات گرفته شود خروجی این محاسبات به صورت شکل (۵-۱۶) خواهد بود. این شکل شامل ۵ نوع رخداد عادی شبکه توزیع و ۵ نوع خطای امپدانس بالا می‌باشد. با توجه به خروجی مجموع قدر مطلق جزئیات می‌توان دو ویژگی تمایز قوی‌تر را بیان داشت. در حالت رخداد خطای امپدانس بالا مقدار SAD از حالت کار عادی شبکه بیشتر است اما همیشه این‌طور نیست. همچنین تغییرات مقدار SAD در وقوع خطای امپدانس بالا از حالت کار عادی بیشتر است اما برای انواع حالات این بیشتری مطلق نیست. باید بیان داشت که در صورت تغییر موجک مادر و سطح جزئیات انتخاب شده و حتی تغییر سیگنال فیدر ممکن است تمایز حالت رخداد خطا و کارکرد عادی به این‌گونه نباشد. شکل (۵-۱۷) محاسبه

SAD با موجک مادر Rbio3.3 در سطح جزئیات پنج برای همان ده حالت قبلی را نشان می‌دهد. در این شکل نیز دو ویژگی میانگین و تغییرات SAD برای HIF و غیر HIF دارای تفاوت می‌باشد.



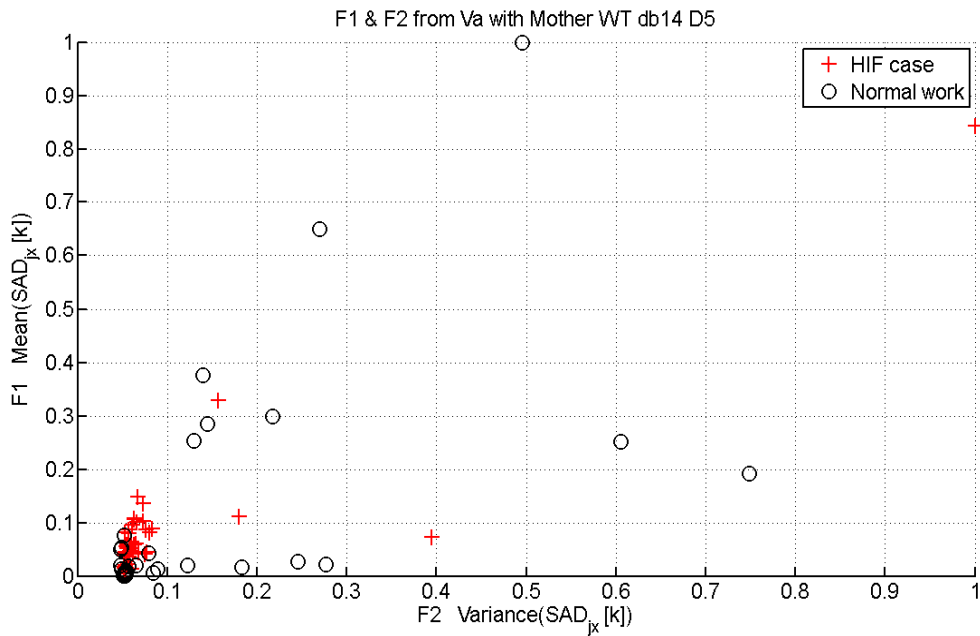
شکل (۵-۱۶): مجموع قدر مطلق جزئیات از ولتاژ موجک مادر Db14 سطح پنج.



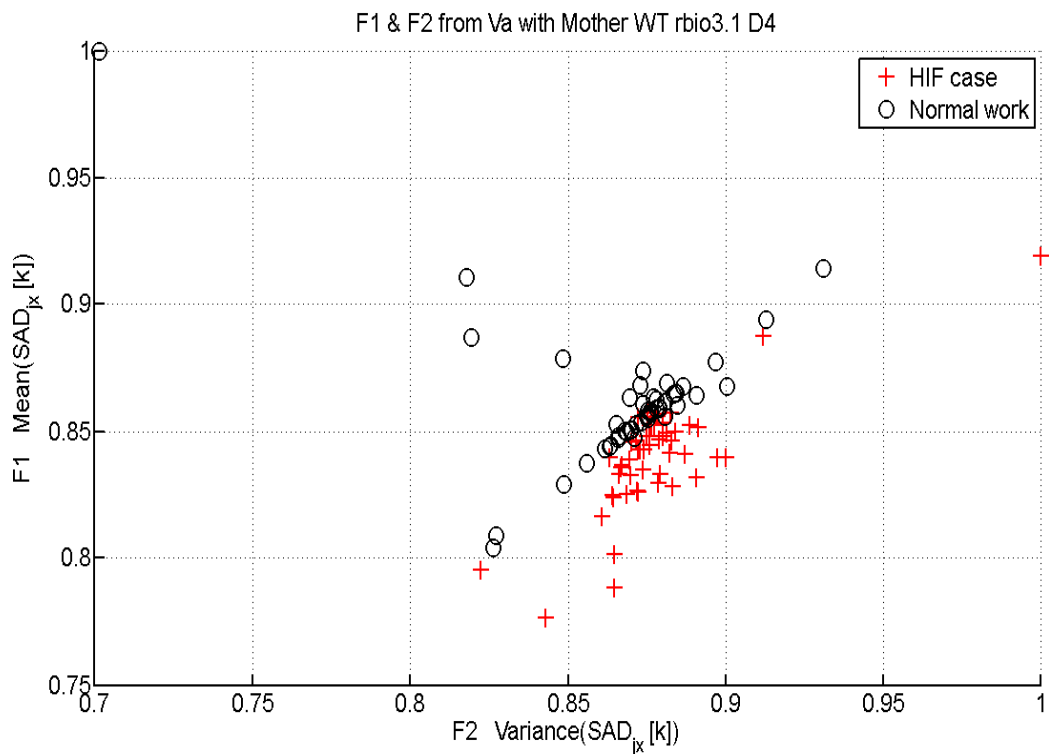
شکل (۵-۱۷): مجموع قدر مطلق جزئیات از ولتاژ موجک مادر Rbio3.3 سطح پنج.

همانطور که بیان شد برای اعمال ویژگی تمایز به تقریبگر تابع فازی، به شاخص عددی که بیان‌گر ویژگی سیگنال گسسته باشد نیاز است. از این رو دو شاخص  $F_1$  و  $F_2$  از (۵-۲) و (۵-۳) محاسبه

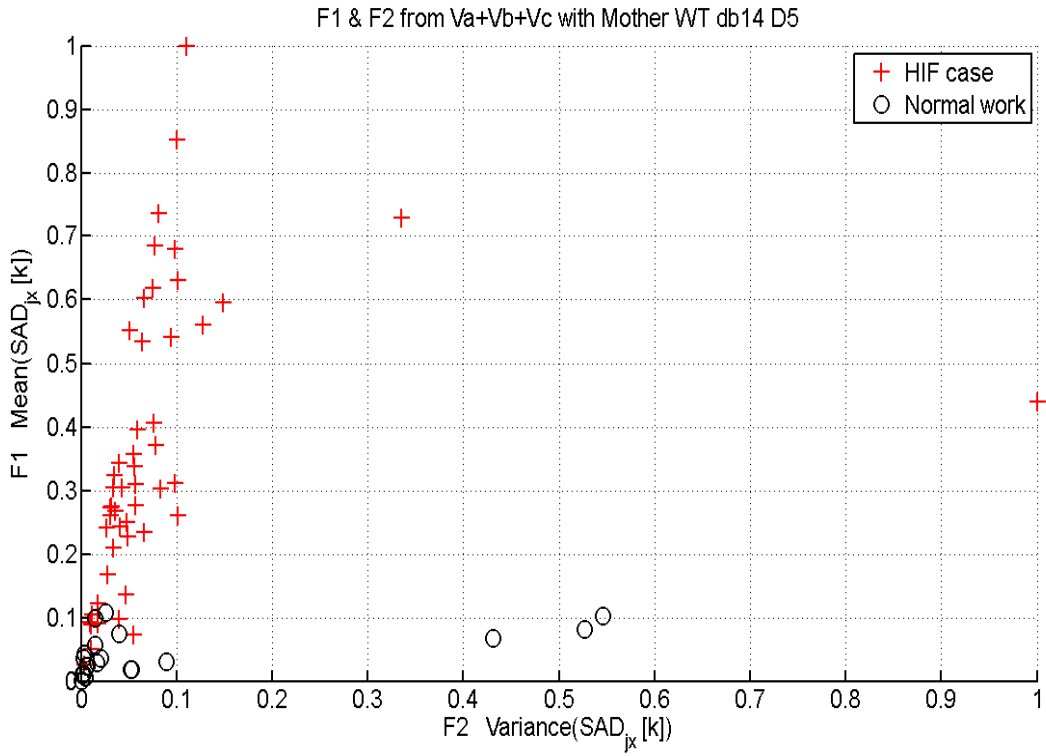
می‌گردد. شکل (۵-۱۸) تا شکل (۵-۲۲) نمونه‌های چند از انواع حالات از دو شاخص نسبت به هم در مختصات دو بعدی را نشان می‌دهد.



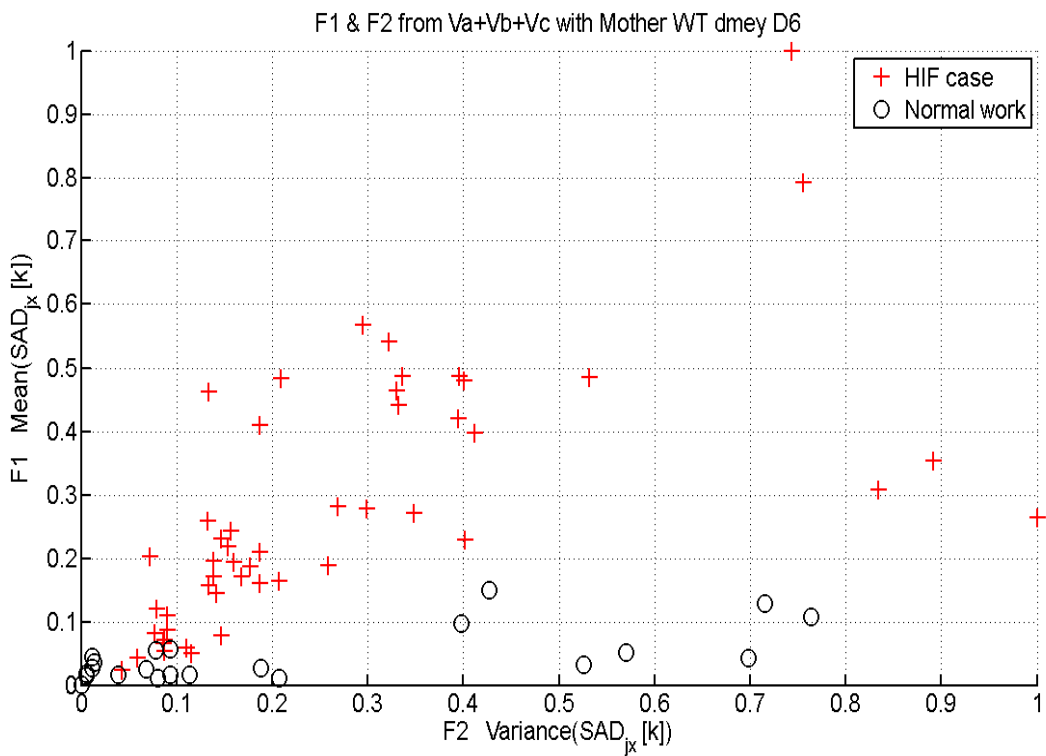
شکل (۵-۱۸): شاخص اول و دوم. ولتاژ فاز، موجک مادر **Db14**. جزئیات پنج.



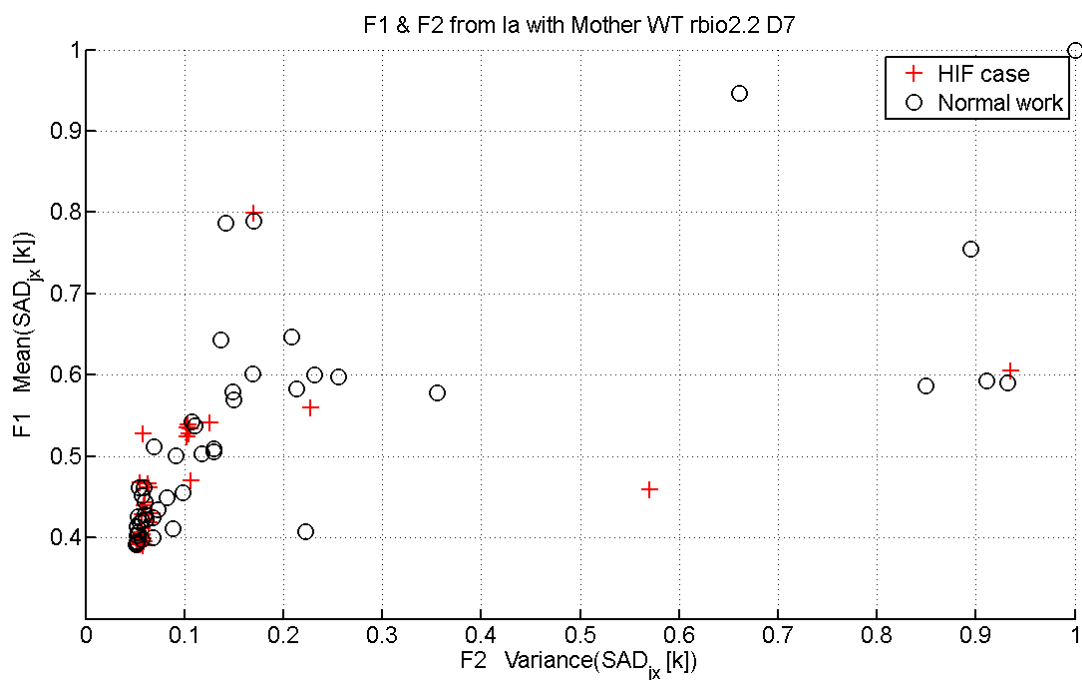
شکل (۵-۱۹): شاخص اول و دوم. ولتاژ فاز، موجک مادر **Rbio3.1**. جزئیات چهار.



شکل (۲۰-۵): شاخص اول و دوم. ولتاژ فاز، موجک مادر db14، جزئیات پنج.



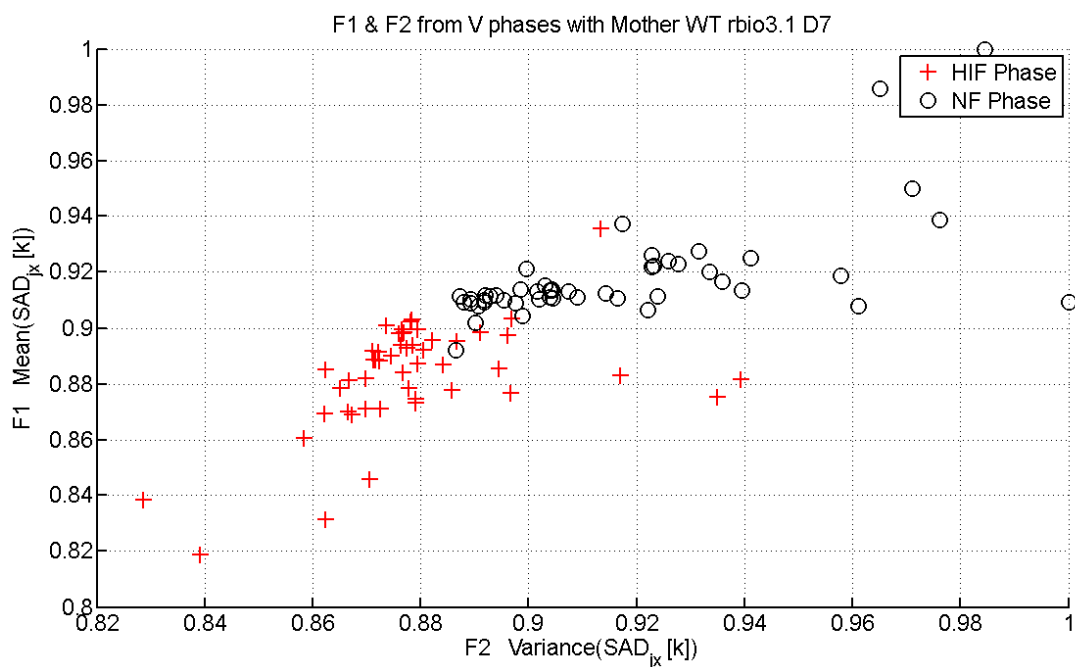
شکل (۲۱-۵): شاخص اول و دوم. جمع ولتاژ فاز، موجک مادر Dmev، جزئیات شش.



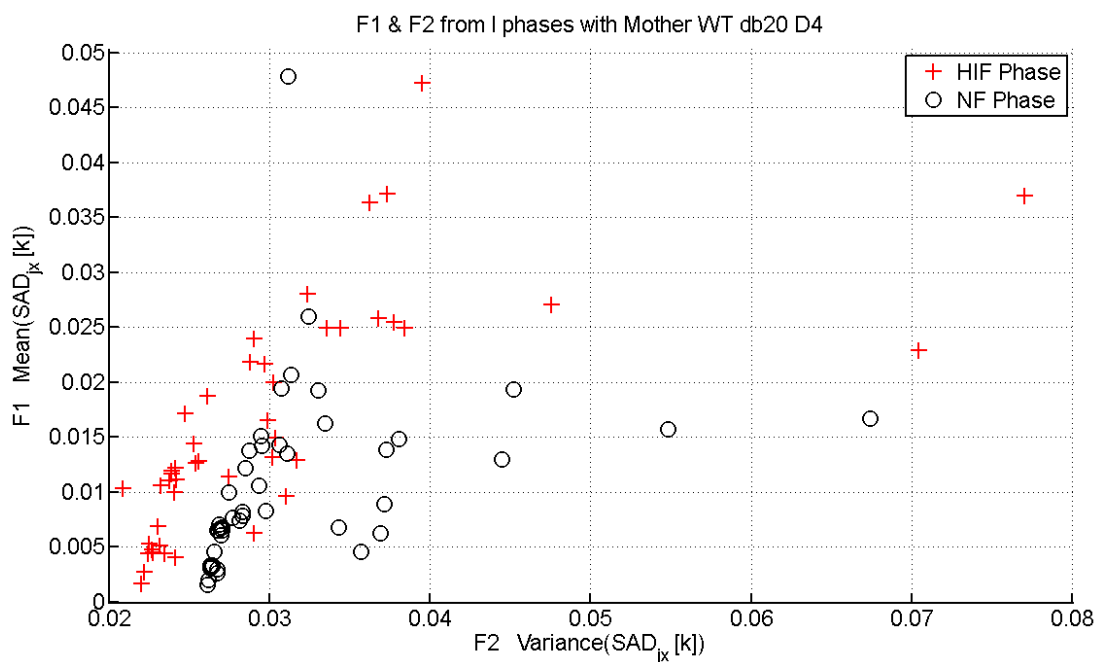
شکل (۲۲-۵): شاخص اول و دوم. جریان فاز، موجک مادر **Rbio2.2**. جزئیات هفت.

همچنین دو نمونه از رسم شاخص‌ها نسبت به هم برای فاز رخداد خطا و غیر خطا در شکل

(۲۳-۵) و شکل (۲۴-۵) آورده شده است.



شکل (۲۳-۵): شاخص اول و دوم نسبت به هم. ولتاژ فاز، موجک مادر **Rbio3.1**. جزئیات هفت.



شکل (۵-۲۴): شاخص اول و دوم نسبت به هم. جریان فاز، موجک مادر Db20، جزئیات چهار.

در شکل‌های آورده شده شاخص‌ها نسبت به هم مشاهده می‌شود که بسته به نوع انتخاب موجک مادر سطح جزئیات و حتی سیگنال فیدر، نسبت دو شاخص می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. به طور کلی هرچه قدر بتوان دو دستگی بهتری بین دو حالت داشت، آن انتخاب شاخص بهتری خواهد بود.

### ۵-۷- نتایج الگوریتم تشخیص HIF روش پیشنهادی

در این پایان‌نامه، برای یافتن بهترین حالت دو دستگی بین وقوع خطای امیدانس بالا با حالت کارکرد عادی شبکه، انواع مختلف موجک مادر شامل ۱۷ نوع ('Db2', 'Db4', 'Db5', 'Db8', 'Db14', 'Db20', 'Sym5', 'Sym8', 'Coif4', 'Bior2.6', 'Bior5.5', 'Bior6.8', 'Rbio2.2', 'Rbio3.1', 'Rbio3.3', 'Rbio4.4', 'Dmey')، در ۷ سطح جزئیات، برای ولتاژ، جریان و جمع ولتاژ سه فاز فیدر مورد بررسی قرار گرفته است. که تعداد حالات در مجموع ۸۳۳ حالت می‌شود. همچنین برای یافتن بهترین حالت دسته‌بندی فاز وقوع خطا از همان ۱۷ نوع موجک مادر در ۷ سطح جزئیات اما برای ولتاژ و جریان فاز مورد بررسی قرار گرفت. که تعداد ۲۳۸ حالت را شامل می‌شود. این تعداد حالات



باید هر یک به طور جدا در سیستم دسته‌بندی مورد بررسی قرار گیرد و بهترین درصد صحت تشخیص، بهترین شاخص خواهد بود.

برای اجرا و بررسی صحت الگوریتم پیشنهادی تشخیص وقوع خطای امپدانس بالا و فاز خطا، در هر اجرای الگوریتم ۸۰ درصد از تعداد اجرای شبیه‌سازی شبکه برای داده‌های آموزش و ۲۰ درصد باقی برای آزمودن الگوریتم تشخیص در نظر گرفته شده است. انتخاب داده‌ها به صورت تصادفی می‌باشد و این امر دوهزار مرتبه تکرار می‌شود و از نتیجه میانگین گرفته می‌شود.

### ۵-۷-۱- به کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای شبکه نمونه اول و تحلیل نتایج

در شبکه نمونه اول ۱۰۰ اجرا از شبیه‌سازی PSCAD موجود است که ۵۰ اجرای آن برای انواع بارهای خطی و غیرخطی و همچنین رخ داده‌های عادی شبکه و ۵۰ اجرای دیگر شامل انواع مدل و حالات خطای امپدانس بالا در مکان‌های مختلف خط و فاز می‌باشد. به صورت تصادفی ۸۰ داده برای داده‌های آموزش و ۲۰ داده برای بررسی صحت تشخیص در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم بیان شده شکل (۵-۲) برای انواع موجک مادر، سطوح مختلف و سیگنال‌های فیدر به صورت جدا از هم در مجموع ۸۳۳ حالت اجرا شد و چندین دسته‌بندی با دقت تشخیص صحیح بالا در جدول (۵-۱) آورده شده است.

جدول (۵-۱): حالات برتر تشخیص در شبکه نمونه اول.

ردیف	سیگنال اندازه‌گیری	موجک مادر	سطح جزئیات	درصد صحت
۱	Va+Vb+Vc	Dmey	D6	94.19
۲	Va+Vb+Vc	Rbio3.3	D4	93.93
۳	Va+Vb+Vc	Sym5	D5	93.16
۴	Va+Vb+Vc	Bior5.5	D5	92.97
۵	Va+Vb+Vc	Coif4	D5	92.85
۶	Va+Vb+Vc	Bior6.8	D5	92.83
۷	Va+Vb+Vc	Sym8	D5	92.80
۸	Va+Vb+Vc	Dmey	D5	92.73
۹	Va+Vb+Vc	Bior2.6	D4	92.64
۱۰	Va+Vb+Vc	Db14	D5	92.40
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

۳۹	Vx	Rbio2.2	D7	89.87
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
۱۰۳	Ix	Db5	D5	83.51
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
۸۳۳	Vx	Db8	D1	52.79

با بررسی الگوریتم تشخیص فاز رخداد خطا برای انواع حالات، ده حالت برتر در جدول (۲-۵) آورده شده است. بهترین درصد تشخیص فاز رخداد خطا ۹۴/۴ درصد می‌باشد که با اندازه‌گیری ولتاژ فازها و استفاده از موجک مادر 'Rbio3.1' در سطح جزئیات 'D6' حاصل شده است. استفاده از جریان فازها در بهترین حالت برابر با ۸۸/۳٪ می‌باشد که با موجک مادر 'Db20' و سطح جزئیات 'D6' بدست آمده است.

جدول (۲-۵): ده حالت برتر تشخیص فاز خطا در شبکه نمونه اول.

درصد صحت	سطح جزئیات	موجک مادر	سیگنال اندازه‌گیری
94.4	D6	Rbio3.1	ولتاژ فاز
93.6	D7	Rbio3.1	ولتاژ فاز
92.7	D4	Rbio3.1	ولتاژ فاز
91.9	D5	Rbio3.1	ولتاژ فاز
91.4	D1	Rbio3.1	ولتاژ فاز
90.2	D2	Rbio3.1	ولتاژ فاز
89.5	D3	Rbio3.1	ولتاژ فاز
88.4	D5	Rbio2.2	ولتاژ فاز
88.3	D6	Db20	جریان فاز
87.8	D5	Coif4	جریان فاز

### ۵-۷-۲- به کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای شبکه نمونه دوم و تحلیل نتایج

در شبکه نمونه دوم ۱۰۰ اجرا از شبیه‌سازی PSCAD موجود است که ۵۰ اجرای سیستم برای انواع بارهای خطی و غیرخطی و همچنین رخ دادهای عادی شبکه و ۵۰ اجرای دیگر شامل انواع مدل و حالات خطای امپدانس بالا در مکان‌های مختلف خط و فاز می‌باشد. به صورت تصادفی ۸۰ داده برای داده‌های آموزش و ۲۰ داده برای بررسی صحت تشخیص در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم بیان شده شکل (۲-۵) اجرا شد و ده حالت برتر از این تشخیص در جدول (۱-۵) آورده شده است.

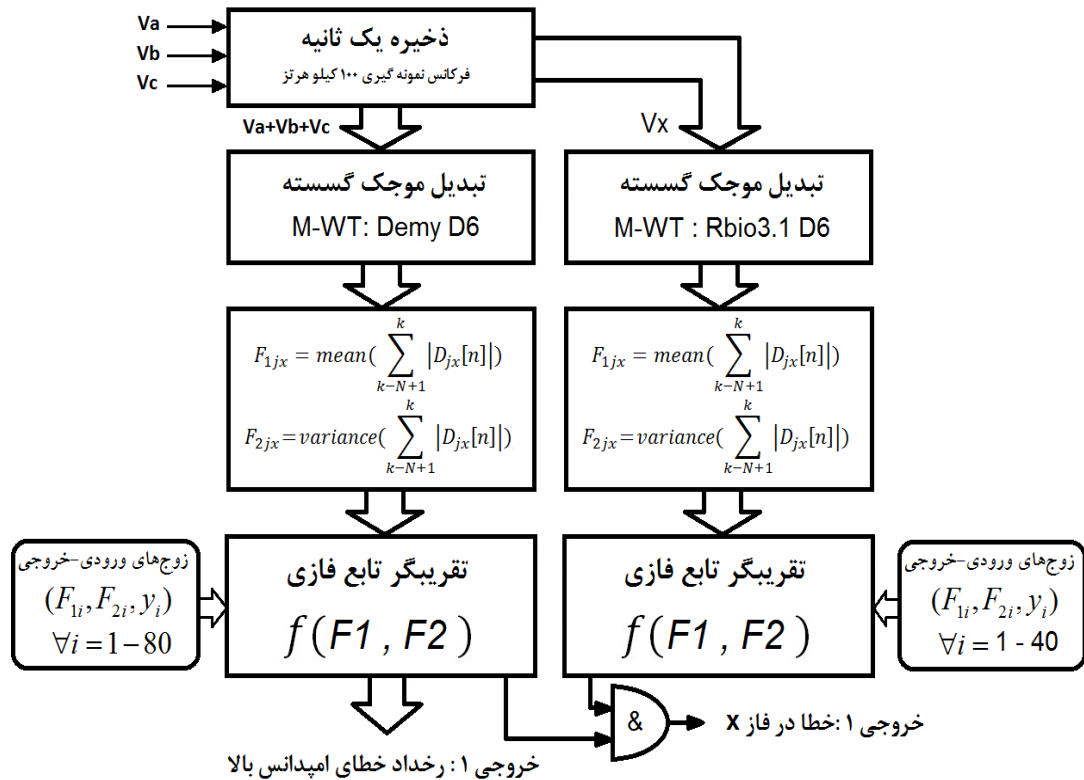
جدول (۵-۳): ده حالت برتر تشخیص در شبکه نمونه دوم

درصد صحت	سطح جزئیات	موجک مادر	سیگنال اندازه گیری
90.78	D6	dmey	Va+Vb+Vc
90.19	D5	Db2	Va+Vb+Vc
89.72	D5	Db5	Va+Vb+Vc
89.59	D5	Sym5	Va+Vb+Vc
89.57	D5	Bior6.8	Va+Vb+Vc
89.54	D5	Rbio3.3	Va+Vb+Vc
89.51	D5	Coif4	Va+Vb+Vc
89.50	D5	Dmey	Va+Vb+Vc
89.42	D5	Db20	Va+Vb+Vc
89.09	D5	Bior2.6	Va+Vb+Vc

با توجه به نتایج مشاهده می شود که، بهترین دسته بندی دارای دقت ۹۰/۷۸ درصد در تشخیص درست است. در بهترین دسته بندی همانند شبکه نمونه اول از جمع ولتاژ سه فاز، موجک مادر 'Demy' و جزئیات 'D6' استفاده شده است. همچنین نتایج نشان می دهد که استفاده از ولتاژ فاز دارای دقت کمتری نسبت به استفاده از جمع ولتاژ سه فاز می باشد. استفاده از ولتاژ فازها در بهترین دقت ۸۸/۰۲٪ می باشد. استفاده از جریان فاز دارای دقت کمتر از ۸۰ درصد می باشد. با مقایسه نتایج شبکه نمونه اول و دوم این نکته قابل دریافت است که دقت روش تشخیص به شبکه تحت بررسی وابسته می باشد. همچنین نوع موجک مادر نیز می تواند با تغییر شبکه تغییر کند.

### ۵-۷-۳- الگوریتم پیشنهادی تشخیص خطای امپدانس بالا و فاز خطا

با توجه به مشخص شدن شاخص های مناسب برای بهترین دقت تشخیص وقوع خطای امپدانس بالا و فاز خطا، الگوریتم کامل روش پیشنهادی می تواند بیان گردد. شکل (۵-۲۵) الگوریتم تشخیص خطا و فاز خطا را نشان می دهد. در این الگوریتم  $V_x$  به معنی ولتاژ هر یکی از سه فاز می باشد و قرارگیری ولتاژ هر فاز نتیجه رخداد HIF در همان فاز را بیان می کند.



شکل (۵-۲۵): الگوریتم تشخیص خطا و فاز خطا.

### ۵-۷-۴- الگوریتم تشخیص بر اساس تعدد شاخص

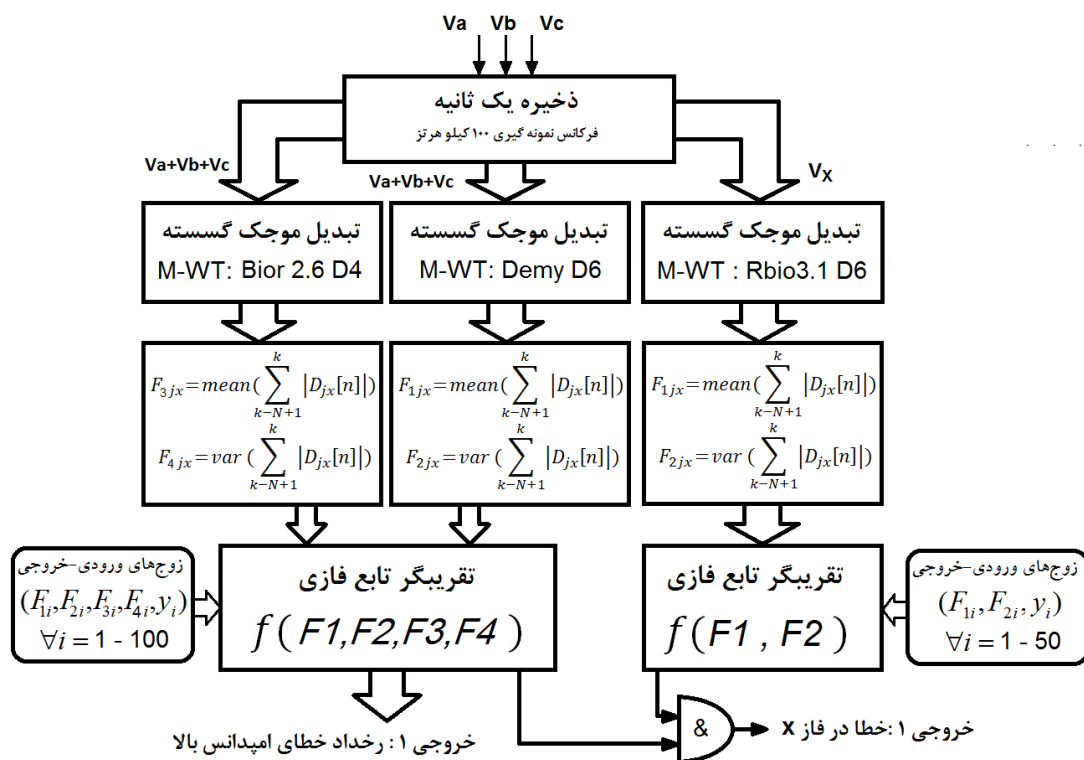
در الگوریتم قبلی از دو شاخص به واسطه تجزیه و تحلیل یک سیگنال برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده شد. اما محدودیتی در افزایش تعداد شاخص وجود ندارد به طوری که ترکیبی از چند دسته شاخص می تواند به سیستم دسته بندی داده شود. مسلماً تعداد بیشتر شاخص امکان بالا رفتن دقت در تشخیص را به وجود می آورد. اما انتخاب تعداد بیشتر شاخص مناسب، بررسی بیشتری نیاز دارد. در این پایان نامه ترکیب دو دسته شاخص یعنی چهار شاخص به عنوان ورودی تقریبگر تابع فازی مورد بررسی اجمالی قرار گرفت. برای انتخاب چهار شاخص مناسب ترکیبی از دسته شاخص های برتر در جداول بیان شده دو به دو مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بهتری حاصل شد. در جدول (۵-۴) حالات برتر که نتیجه صحت بالای ۹۵٪ را حاصل کرده است آورده شده است. در بهترین حالت با استفاده از جمع ولتاژ فازها به عنوان سیگنال فیدر و موجک مادر 'Dmey' با سطح جزئیات 'D6' در کنار 'Bior2.6' با سطح جزئیات 'D4' توانست دقت تشخیص درست ۹۶/۱۸ درصدی را میسر سازد.

جدول (۴-۵): حالات برتر در تشخیص HIF شبکه نمونه اول.

درصد	جزئیات	موجک مادر	سیگنال	جزئیات	موجک	سیگنال
صحت	دوم	دوم	اندازه‌گیری دوم	اول	مادر اول	اندازه‌گیری اول
96.18	D4	Bior2.6	Va+Vb+Vc	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
96.15	D5	Dmey	Va+Vb+Vc	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
96.14	D5	Coif4	Va+Vb+Vc	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
96.07	D5	Bior6.8	Va+Vb+Vc	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
95.88	D4	Rbio3.3	Va+Vb+Vc	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
95.88	D5	Db8	Va+Vb+Vc	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
95.87	D5	Sym8	Va+Vb+Vc	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
95.87	D5	Sym5	Va+Vb+Vc	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
95.81	D5	Bior5.5	Va+Vb+Vc	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
95.73	D5	Rbio3.1	V	D6	Dmey	Va+Vb+Vc
95.17	D4	Rbio3.1	V	D6	Dmey	Va+Vb+Vc

#### ۵-۸- الگوریتم نهایی پیشنهادی تشخیص HIF و فاز خطا

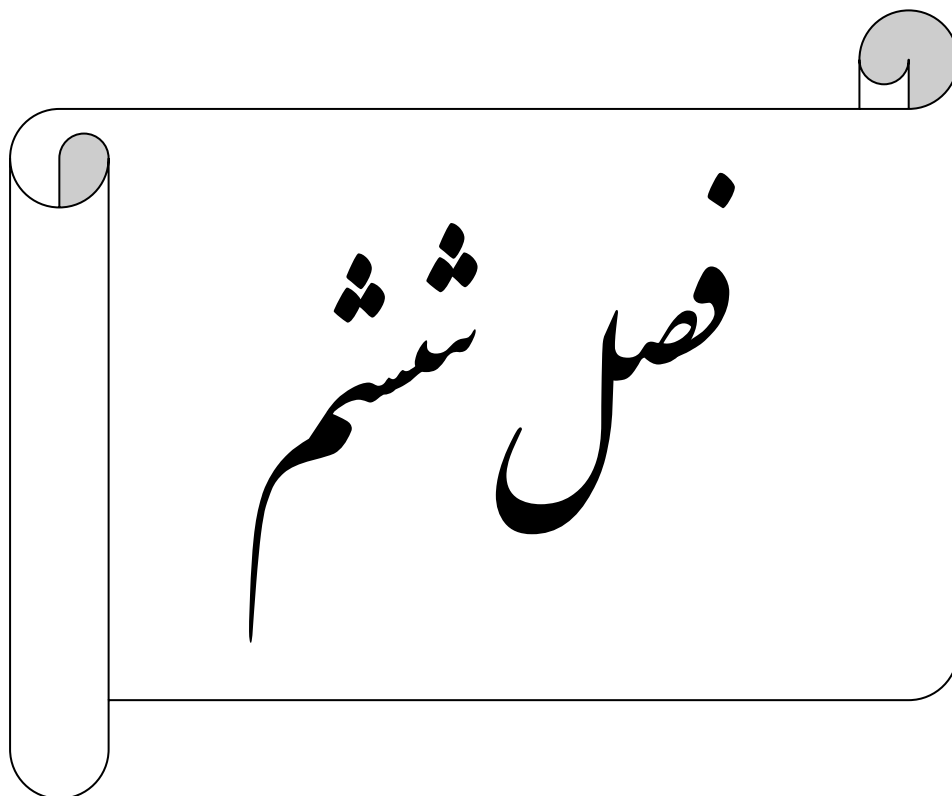
پس از بررسی ۱۷ نوع موجک مادر در ۷ سطح جزئیات برای ولتاژ و جریان فیدر این نتیجه حاصل شد که بهترین حالت برای ساخت شاخص تشخیص خطا، استفاده از جمع ولتاژ فازها با موجک مادر 'Demy' و جزئیات 'D6' با دارا بودن دقت تشخیص ۹۴/۴۵ درصد می‌باشد. اما با قرار دادن دو شاخص دیگر در کنار شاخص میانگین و واریانس حاصل از 'Demy' و 'D6' الگوریتم با این دو شاخص جدید میانگین و واریانس 'Bior2.6' و جزئیات 'D4' توانست دقت تشخیص خود را به ۹۶/۱۸ درصد برساند. برای تشخیص فاز خطا که با اندازه‌گیری ولتاژ فازها و استفاده از موجک مادر 'Rbio3.1' در سطح جزئیات 'D6' استفاده می‌شود دقت ۹۴/۴ درصد حاصل گشت. در نتیجه الگوریتم نهایی تشخیص خطای امپدانس بالا با تشخیص فاز رخداد خطا به صورت شکل (۵-۲۶) خواهد بود.



شکل (۵-۲۶): الگوریتم نهایی تشخیص خطا و فاز خطا.

## ۵-۹- جمع‌بندی

در این فصل خروجی موجک سیگنال‌های فیدر با انواع موجک مادر و سطوح جزئیات مختلف برای حالات خطا و غیر خطا مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از مجموع قدر مطلق جزئیات و خروجی موجک شاخص تمایز ساخته شد. مناسب‌ترین شاخص پس از بررسی نتیجه تشخیص به عنوان بهترین شاخص انتخاب شد. در نهایت الگوریتم پیشنهادی نهایی ارائه گردید.



نتیجہ گیری و پیشہادات

## فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۶-۱- نتیجه‌گیری

یکی از اصلی‌ترین رخدادهایی که باعث کاهش امنیت شبکه توزیع می‌گردد وقوع حوادث ناگوار همچون آتش‌سوزی و مرگ بر اثر رخ داد خطای امپدانس بالا است. از این رو باید در هنگام رخداد به سرعت تشخیص و اقدام به رفع آن نمود. محققین بسیاری در این زمینه تشخیص خطای امپدانس بالا گام برداشته‌اند. اما به دلیل جریان عبور کم خطا و همچنین ویژگی‌های نزدیک به بارهای شبکه، یافتن روشی که بتواند تمام حالات رخداد خطا از شبه خطا را تمیز دهد هنوز میسر نگردیده است. از این رو در این پایان‌نامه سعی شد که پس از بررسی روش‌های گذشته محققین، روشی ارائه گردد که دقت مناسبی را در تشخیص خطای امپدانس بالا داشته باشد.

روش پیشنهاد شده در این پایان‌نامه یک روش از ترکیب تبدیل موجک گسسته و تقریبگر تابع فازی برای تشخیص خطای امپدانس بالا در شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت است. این روش در ابتدا سیگنال فیدر را اندازه‌گیری و به مدت یک ثانیه ذخیره می‌کند. سپس سیگنال اندازه‌گیری شده توسط تبدیل موجک گسسته تجزیه می‌شود. در مرحله بعد با بررسی ۱۷ نوع موجک مادر و ۷ سطح جزئیات سیگنال‌های فیدر از خروجی تبدیل موجک، بهترین حالت انتخاب شد. سپس شاخص‌های مناسب از بهترین حالت ساخته شد. شاخص‌های ساخته شده به عنوان ورودی تقریبگر تابع فازی مورد استفاده قرار گرفت. تقریبگر تابع فازی به عنوان یک سیستم هوشمند دسته‌بندی به کار گرفته شد. این سیستم با استفاده از داده‌های آموزش خود توانست با دقت مطلوب تابعی از شاخص‌ها را تقریب بزند سپس با گرفتن شاخص جدید، رخداد یا عدم رخداد خطای امپدانس بالا را اعلام نماید. همچنین در این پایان‌نامه از دو شبکه آزمایش توزیع شعاعی و حلقوی برای شبیه‌سازی استفاده شد و برای مدل کردن خطای امپدانس بالا از سه نوع مدل الکتریکی، دینامیکی و ترکیبی با حالات مختلف بکار گرفته



شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی با دقت بالا می‌تواند حالت کار عادی شبکه و رخداد خطای امیدانس بالا را از هم تمیز دهد. همچنین مستقل بودن شبکه از عملکرد روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت الگوریتم نهایی برای تشخیص خطای امیدانس بالا و اعلام فاز رخداد خطا ارائه شد.

## ۶-۲- پیشنهادات

پیشنهادات زیر به منظور ادامه تحقیقات و بهبود روش تشخیص خطای امیدانس بالا ارائه می‌گردد:

۱- به دلیل اهمیت بالا در مدل‌سازی شبکه مورد آزمایش استفاده از مدل‌های دقیق‌تر برای عناصر شبکه پیشنهاد می‌گردد.

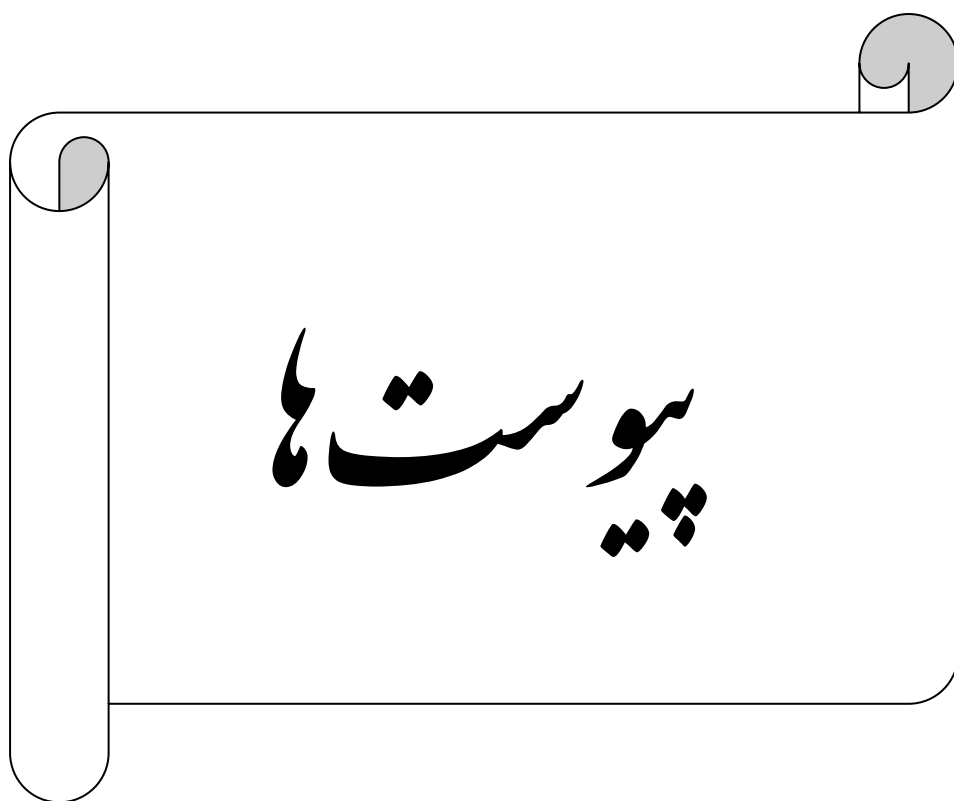
۲- با توجه به اینکه هیچ داده‌ای از یک شبکه واقعی در دسترس نبوده است پیشنهاد می‌شود که این الگوریتم عیناً برای دسته‌ای از داده‌های واقعی مورد بررسی قرار گیرد.

۳- بررسی و اجرای الگوریتم پیشنهادی بر چند نمونه شبکه توزیع دیگر پیشنهاد می‌شود.

۴- شاخص‌های ساخته شده بر اساس مجموع ۱۰۰ نمونه قدر مطلق جزئیات خروجی انجام شد. بررسی تغییر مجموع نمونه قدر مطلق جزئیات خروجی برای انتخاب بهترین تعداد نمونه توصیه می‌شود.

۵- استفاده از شاخص‌های آماری همچون حداکثر، حداقل، چولگی و ... به عنوان شاخص‌های ورودی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.





## پیوست ۱: تبدیل موجک گسسته

### پ ۱-۱- مقدمه

تجزیه سیگنال یک امر مهم در مسائل عملی می‌باشد که به نوعی سیگنال با توزیع غیریکنواخت انرژی را مورد تحلیل و بررسی قرار می‌دهد. در سال‌های اخیر استفاده از ابزارهای پردازش سیگنال در زمینه مسائل سیستم قدرت توسعه یافته است. ابزارهای متنوعی برای پردازش سیگنال وجود دارد که با توجه به نوع سیگنال و هدف از تجزیه و تحلیل سیگنال ابزار انتخابی می‌تواند متفاوت باشد. معروف‌ترین ابزار تبدیل فوریه برای تحلیل فرکانسی و استخراج شدت و دامنه مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال می‌باشد. این تبدیل نمی‌تواند بیان دارد که یک مشخصه فرکانسی خاصی از سیگنال در چه زمانی واقع شده است. به عبارت دیگر این تبدیل بیان کننده مشخصه زمانی سیگنال نیست. این تبدیل مشخصه‌های حوزه زمانی سیگنال را از دست می‌دهد. البته این مسئله برای سیگنال‌های ایستا با مشخصه ثابت آماری با زمان مهم نیست، ولی مشخص است که برای سیگنال‌های گذرا با مشخصه زمانی متغیر، این ویژگی مورد نیاز است. همچنین استفاده از فوریه برای تحلیل سیگنال‌های گذرا، کاملاً مناسب نیست چون این تحلیل بر اساس توابع سینوسی می‌باشد و این توابع گذرا نیستند. از این رو تبدیل فوریه قادر به بررسی دقیق در طیف‌های فرکانسی مربوط به زمان‌های کوچک و گذرا نیست.

برای حل مشکل از دست رفتن زمان در تبدیل فوریه، روشی بر اساس تکنیک پنجره‌بندی انجام می‌گیرد. این روش یک پنجره با طول ثابت را روی تابع زمان حرکت می‌دهد و محتوای فرکانسی آن سیگنال را در آن فاصله زمانی استخراج می‌کند. این تکنیک تبدیل فوریه زمان-کوتاه نامیده می‌شود. مشکل تبدیل فوریه زمان-کوتاه آن است که پنجره ثابت آن، با یک باند فرکانسی ثابت همراه است بنابراین فقط اجازه یک تجزیه زمان-فرکانسی ثابت را می‌دهد. درحالی که بسیاری از سیگنال‌ها نیاز به

تقریب‌های قابل انعطاف‌تری دارند. به‌طوری‌که گاهی تغییر اندازه پنجره زمانی بسیار کوچک برای بدست آوردن مشخصه‌های زمان-فرکانسی دقیق‌تر لازم می‌باشد.

## پ ۱-۲- معرفی تبدیل موجک

تبدیل موجک به عنوان روشی جایگزین بر تبدیل فوریه زمان-کوتاه ارائه گردید و هدف آن، فائق آمدن بر مشکلات مربوط به تفکیک پذیری در تبدیل فوریه زمان-کوتاه است. تحلیل موجک، سیگنال را در حوزه زمان-فرکانسی، ولی با استفاده از طول پنجره‌بندی مختلف نشان می‌دهد. به‌طوری‌که از پنجره‌های زمانی بزرگ در هنگام نیاز به اطلاعات دقیق در فرکانس‌های پایین و پنجره‌های زمانی کوچک در هنگام نیاز به اطلاعات فرکانسی بالا استفاده می‌شود. این تبدیل قابلیت آشکارسازی مفاهیمی همچون تمایل، نقاط شکست، نقاط انفصال و ... را در سیگنال دارا می‌باشد.

تحلیل موجک از توابع کوچکی که موجک نامیده می‌شوند استفاده می‌کند. واژه‌ی موجک به معنای موج کوچک است. دلیل استفاده از واژه‌ی کوچک، محدود بودن و کوتاه بودن تابع پنجره می‌باشد و علت استفاده از واژه موج نیز به دلیل ماهیت نوسانی این تابع است. یک موجک تابعی با مقدار متوسط صفر است، که به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۴].

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(t) dt = 0 \quad (\text{پ ۱-۱})$$

که تابع موجک نرمال شده به صورت زیر خواهد بود [۳۴]:

$$g_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-b}{s}\right) \quad (\text{پ ۱-۲})$$

که در آن مقیاس دهی تابع موجک با پارامتر  $s$  و انتقال آن توسط  $b$  ایجاد می‌شود. تبدیل موجک پیوسته به صورت جمع حاصل ضرب سیگنال زمانی در تابع موجک نرمال شده و به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۴]:

$$WT(a, b)(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot g\left(\frac{t-b}{s}\right) dt \quad (\text{پ ۱-۳})$$

که  $x(t)$  سیگنال تحت آنالیز می‌باشد و  $g(t)$  تابع موجک مادر خوانده می‌شود. واژه مادر به این منظور به کار برده می‌شود که تمامی نسخه‌های انتقال یافته و مقیاس شده، از روی یک تابع اولیه بدست می‌آیند. در تبدیل موجک مفهوم انتقال مشابه با مفهوم انتقال زمانی در تبدیل فوریه زمان-کوتاه می‌باشد که میزان جابجایی پنجره زمانی را معلوم می‌کند. بر خلاف تبدیل فوریه در تبدیل موجک به طور مستقیم پارامتر فرکانس وجود ندارد و پارامتر مقیاس که به طور معکوس با فرکانس ارتباط دارد، منظور می‌شود.

### پ ۱-۳- تبدیل موجک گسسته

با توجه به نقش رایانه‌ها در انجام محاسبات امروزی، باید در کنار مطرح کردن ایده‌های پردازشی، به نوعی آنها را درخور محاسبه توسط رایانه نیز درآورد. ساده‌ترین روش در گسسته کردن تبدیل موجک، نمونه‌برداری از صفحه زمان-فرکانس در نقاط مختلف آن است. نمونه‌برداری یکنواخت، ساده‌ترین روش انجام این کار خواهد بود. البته در مورد تبدیل موجک، با تغییر مقیاس می‌توان نرخ نمونه‌برداری را کاهش داد. بنابراین با فرض این که نرخ نمونه‌برداری در مقیاس  $S_1$  برابر با  $N_1$  باشد، نمونه‌برداری در مقیاس  $S_2$  بزرگتر از  $S_1$  با نرخ  $N_2$  کوچکتر از  $N_1$  صورت خواهد پذیرفت. رابطه دقیق بین این دو نرخ را می‌توان چنین بیان نمود:

$$N_2 = \frac{S_1}{S_2} N_1 = \frac{f_2}{f_1} N_1 \quad (\text{پ ۱-۴})$$

بنابراین می‌توان در فرکانس‌های پائین، نرخ نمونه‌برداری را کاهش داد تا بتوان در زمان محاسبات به میزان قابل توجهی صرفه جویی نمود. به منظور گسسته کردن تبدیل موجک، ابتدا پارامتر مقیاس  $S$  بر حسب یک درجه‌بندی لگاریتمی، گسسته می‌شود. پس از آن، متغیر زمان با توجه به پارامتر مقیاس می‌شود به نحوی که برای هر مقیاس، یک نرخ نمونه‌برداری جداگانه استفاده شود.

اما این روش گسسته سازی در حقیقت یک تبدیل گسسته نیست بلکه نسخه گسسته شده تبدیل موجک، یک سری موجک است که از تبدیل موجک پیوسته نمونه گرفته است. لذا اطلاعات موجود در آن بسیار زائد و اضافی است که منجر به افزایش بی دلیل بار محاسباتی می شود. لذا از تبدیل موجک گسسته استفاده می شود که از لحاظ پیاده سازی بسیار ساده تر و بهینه تر است.

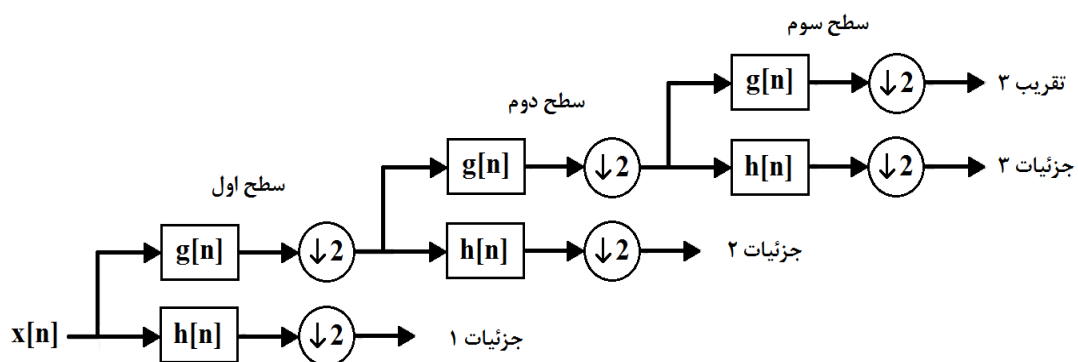
ایده اصلی این روش نیز مشابه تبدیل موجک پیوسته است که در آن نوعی توصیف زمان-مقیاس از سیگنال گسسته با استفاده از فیلترهای دیجیتال ارائه می گردد. برای حالت گسسته، فیلترهایی با فرکانس قطع های مختلف برای تحلیل سیگنال در مقیاس های متفاوت به کار برده می شود. در این حالت، تفکیک پذیری سیگنال توسط عملکردهای فیلترها کنترل و مقیاس از طریق نمونه گیری بالا و پایین تغییر می کند.

پردازش با تبدیل موجک گسسته در ابتدا سیگنال از یک فیلتر دیجیتال پائین گذر نیم باند  $h[n]$  عبور می کند که نتیجه خروجی برابر با کانولوشن ورودی و پاسخ ضربه فیلتر می باشد. این عمل تمام مؤلفه های فرکانسی که بیشتر از نصف بزرگترین فرکانس موجود در سیگنال است را حذف می کند. از آنجا که بیشترین فرکانس موجود در سیگنال خروجی فیلتر برابر با  $\pi/2$  رادیان است، نیمی از نمونه ها قابل حذف اند. از این رو طول سیگنال نصف خواهد شد بدون اینکه اطلاعاتی را از دست برود. روند مشابهی نیز با استفاده از یک فیلتر دیجیتال بالا گذر نیم باند با پاسخ ضربه  $g[n]$  انجام می پذیرد. در نتیجه در خروجی اولین مرحله از اعمال تبدیل موجک، دو نسخه، یکی بالا گذر و دیگری پائین گذر، با طول کاهش یافته (نصف شده) از سیگنال اولیه به فرم زیر بدست می آیند [۳۴]:

$$y_{high}[k] = \sum_n x[n]g[2k - n] \quad (\text{پ ۱-۵})$$

$$y_{low}[k] = \sum_n x[n]h[2k - n] \quad (\text{پ ۱-۶})$$

با این عمل، تفکیک پذیری زمانی نصف شده و در مقابل تفکیک پذیری فرکانسی دو برابر می‌شود. این روند را می‌توان مجدداً بر روی نسخه پائین گذر شده اعمال نمود و در هر مرحله، با کاهش تفکیک پذیری زمانی به میزان نصف مرحله قبل، تفکیک پذیری فرکانسی را دو برابر نمود. این ایده برای محاسبه تبدیل موجک گسسته، به روش بانک فیلتر مشهور است که در شکل (پ ۱-۱) این مراحل برای سه سطح نشان داده شده است. ضرایب خروجی فیلتر پائین گذر، شکل اولیه سیگنال را دنبال می‌کنند، از این رو به این ضرایب، تقریب<sup>۱</sup> گفته می‌شود. همچنین ضرایب خروجی فیلتر بالا گذر، جزئیات فرکانس بالای سیگنال را دربر دارند، به همین دلیل به این ضرایب، جزئیات<sup>۲</sup> گفته می‌شود. با افزایش تعداد مراحل تبدیل، میزان جزئیات نیز کاهش می‌یابد. باید دقت داشت که تعداد مراحل مورد نیاز برای تبدیل موجک گسسته، به خصوصیات فرکانسی سیگنال مورد تحلیل بستگی دارد.



شکل (پ ۱-۱): مراحل فیلتر کردن سیگنال در تبدیل موجک گسسته.

نهایتاً تبدیل موجک گسسته سیگنال از کنار یکدیگر قرار دادن خروجی‌های فیلترها، از مرحله‌ی اول اعمال فیلترسازی بدست می‌آید. از این رو، تعداد ضرایب تبدیل موجک با تعداد نمونه‌های سیگنال گسسته ورودی برابر خواهد بود. اطلاعات جامع‌تر در مرجع [۳۴] موجود است.

1 Approximation

2 Detail



## پیوست ۲: تابع تقریبگر فازی

### پ ۱-۲- مقدمه

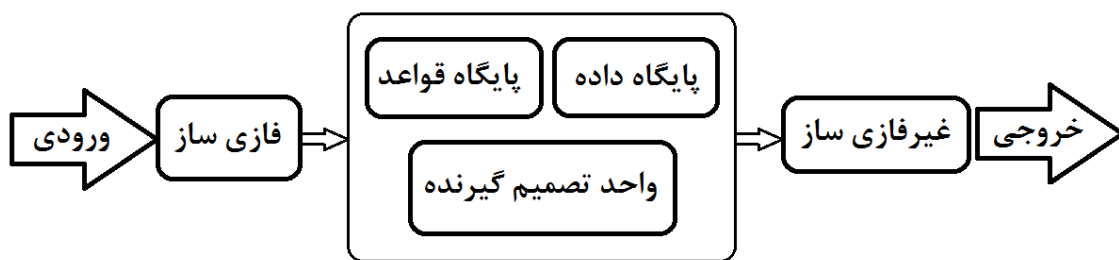
ریاضیات فازی یک فرا مجموعه از منطق بولی می‌باشد که بر مفهوم درستی نسبی، دلالت می‌کند. منطق کلاسیک هر چیزی را بر اساس یک سیستم دو مقدار نشان می‌دهد. ولی منطق فازی درست هر چیزی را با یک عدد که مقدار آن بین صفر و یک است نشان می‌دهد. از این رو منطق فازی نظام کاملاً انعطاف پذیری را در اختیار قرار می‌دهد.

دانش مورد نیاز برای بسیاری از مسائل مورد مطالعه به دو صورت دانش خودآگاه و دانش ناخودآگاه تقسیم می‌شود. در دانش خودآگاه، دانش به صورت ساختار یافته، جهت‌دار و متفکرانه می‌باشد در حالی که دانش ناخودآگاه دانشی بر اساس مشاهدات می‌باشد. از آن جا که در عمل هر دو نوع دانش مورد نیاز است منطق فازی می‌کوشد آن‌ها را به صورتی منظم، منطقی و ریاضیاتی با یکدیگر هماهنگ گرداند.

### پ ۲-۲- سیستم فازی

سیستم‌های فازی، سیستم‌های مبتنی بر دانش با قواعد می‌باشد. هسته اصلی سیستم فازی، مجموعه دانش آن است که از قواعد اگر-آنگاه فازی تشکیل می‌شود. یک قاعده اگر-آنگاه فازی یک عبارت اگر آنگاه بوده که بعضی کلمات آن به وسیله توابع تعلق پیوسته مشخص شده‌اند. در الگوریتم‌های مختلف فازی روش‌های متفاوتی برای تعیین مناسب این پایگاه قواعد بکار گرفته می‌شود. سیستم فازی را می‌توان در مواردی همچون کنترل کنندگی و مدل کردن توابع غیرخطی مورد استفاده قرار داد. ساختار سیستم‌های فازی را می‌توان همانند شکل (پ ۲-۱) به سه بخش تقسیم نمود.

بخش اول که فازی ساز نام دارد متغیرهای معین ورودی به سیستم استنتاج فازی را با توجه به توابع عضویت واقع در پایگاه داده‌ها به درجه عضویت مناسب یا به عبارتی متغیرهای فازی تبدیل می‌کند. بخش دوم که استنتاج فازی نام دارد از توابع عضویت و قوانین فازی جهت تصمیم‌گیری استفاده می‌نماید و خود از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول پایگاه قواعد می‌باشد که شامل تعدادی قواعد فازی به صورت اگر-آنگاه می‌باشد. این قواعد از تجربه افراد خبره یا زوج‌های ورودی-خروجی حاصل از تجربه‌های عملی بدست می‌آید. قسمت دوم پایگاه داده می‌باشد که توابع عضویت مورد استفاده در پایگاه قوانین را مشخص می‌سازد. قسمت سوم واحد تصمیم‌گیرنده و اصلی‌ترین بخش استنتاج می‌باشد. این قسمت با توجه به متغیرهای فازی ورودی به سیستم استنتاج فازی و قواعد فازی موجود در پایگاه قوانین، متغیر فازی خروجی مشخص می‌گردد. بخش سوم که غیرفازی ساز نام دارد و متغیرهای فازی خروجی را به یک متغیر معین قابل فهم تبدیل می‌کند.



شکل (پ ۲-۱): ساختار سیستم فازی.

یک دستگاه فازی با توجه به تنوع انتخاب انواع اجزا می‌تواند تنوع‌های مختلفی داشته باشد به طور مثال سه نوع فازی ساز به نام‌های منفرد، گوسی و مثلثی وجود دارد. همچنین سه نوع غیر فازی ساز و ۲۴ نوع استنتاج وجود دارد که در مجموع ۲۱۶ حالت سیستم فازی خواهیم داشت.

### پ ۲-۳ - سیستم فازی به عنوان تقریگر تابع

طبق تعریف یک سیستم فازی چندورودی-چندخروجی، یک نگاشت از مجموعه‌های فازی  $U \in R^I$  به مجموعه‌های فازی  $V \in R^n$  بر مبنای قوانین اگر-آنگاه فازی می‌باشد. خروجی یک

سیستم فازی چندورودی-چندخروجی با فازی ساز منفرد، موتور استنتاج ضرب و غیرفازی ساز میانگین مراکز بصورت رابطه (پ ۱-۲) می‌باشد [۵۱].

$$f_j = \frac{\sum_{l=1}^L \bar{y}_j^l \times \prod_{i=1}^I \mu_{A_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^L \prod_{i=1}^I \mu_{A_i^l}(x_i)}, j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{پ ۱-۲})$$

در رابطه بالا  $A_i^l$  و  $B_j^l$  متغیرهای زبانی در زیر فضاها فازی  $U_i$  و  $V_j$  هستند که با توابع تعلق  $\mu_{A_i^l}(x_i)$  و  $\mu_{B_j^l}(y_j)$  تعریف شده‌اند و  $\bar{y}_j^l$  مراکز توابع تعلق خروجی  $B_j^l$  می‌باشد.  $L$  تعداد قوانین فازی و  $I$  تعداد ورودی‌های تابع فازی و  $n$  تعداد خروجی است.

ایده اساسی روش سیستم فازی به عنوان تقریبگر تابع در زوج‌های ورودی-خروجی  $(x_i, y_i)$  می‌باشد. در حالتی که توابع تعلق به صورت گوسی انتخاب گردد رابطه (پ ۱-۲) توسعه داده شده و برای یک سیستم چند ورودی و تک خروجی به صورت رابطه (پ ۲-۲) خواهد بود [۵۱].

$$F(x_1, \dots, x_m) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \times \prod_{j=1}^m e^{-\left(\frac{x_j - x_{ij}}{\sigma}\right)^2}}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m e^{-\left(\frac{x_j - x_{ij}}{\sigma}\right)^2}} \quad (\text{پ ۲-۲})$$

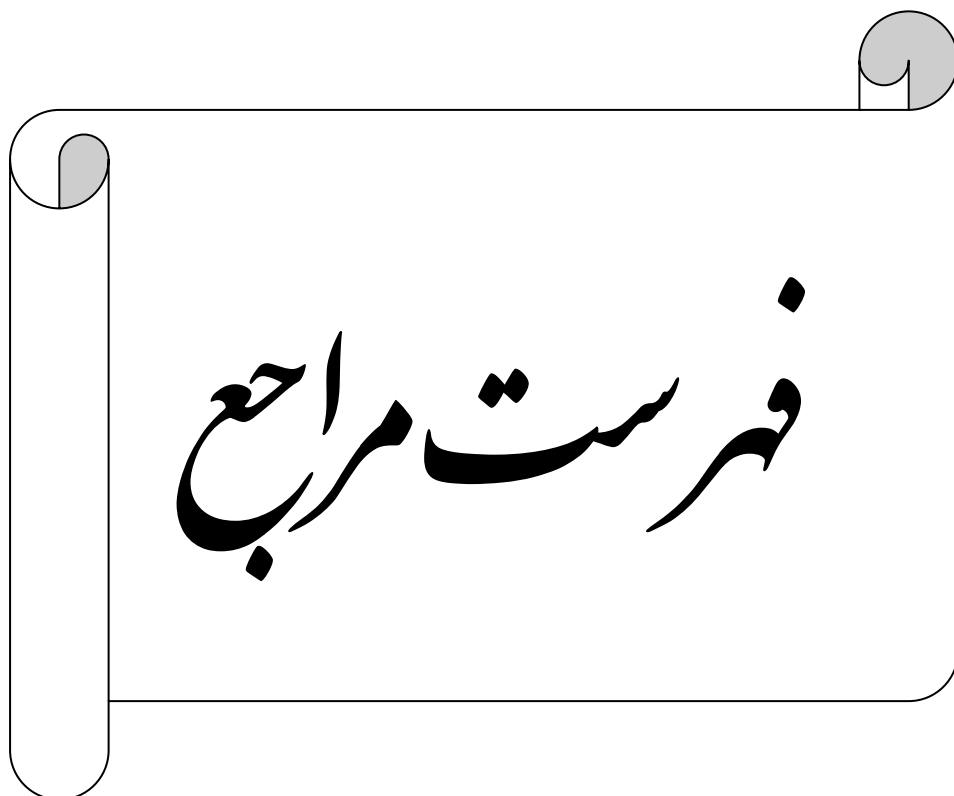
در رابطه بالا  $n$  تعداد زوج‌های ورودی-خروجی به عنوان قواعد فازی،  $m$  تعداد متغیر ورودی و پارامتر  $\sigma$  انحراف معیار تابع فازی ساز از نوع گوسی می‌باشد. در این رابطه با انتخاب مناسب  $\sigma$ ، سیستم فازی بیان شده،  $n$  زوج ورودی-خروجی را با هر دقت خواسته شده تطبیق می‌دهد.  $\sigma$  کوچک باعث می‌شود خطای تطبیقی کوچک شود و  $f(x)$  کمتر هموار گردد و اگر  $f(x)$  هموار نباشد برای نقاطی که در مجموعه آموزش قرار ندارد، ممکن است عمومیت نداشته باشد و مقدار  $\sigma$  بزرگتر خطای تطبیق بالاتری دارد. بنابراین  $\sigma$  باید به نحوی انتخاب شود که تعادلی را بین تطبیق و عمومیت بوجود آورد [۵۱].

به طور مثال در صورتی که خواسته شود از تقریبگر تابع فازی به عنوان سیستم هوشمندی استفاده شود که اعداد مثبت و منفی را تشخیص دهد، به این صورت عمل می‌شود. در ابتدا باید تعداد مطلوب

از داده‌های آموزش را در اختیار داشت. هر چه قدر تعداد داده‌های آموزش بیشتر باشد باعث بالا رفتن دقت صحت سیستم دسته‌بندی می‌شود که پیچیده‌تر شدن محاسبات را نیز به دنبال دارد. اگر چهار مقدار ۳-، ۵-، ۱- و ۱ را به عنوان داده آموزش در نظر گرفته شود و برای حالت مثبت بودن خروجی ۱ و منفی بودن خروجی ۱- در نظر گرفته شود، با بازکردن رابطه (پ ۲-۲) به رابطه (پ ۲-۳) می‌توان رسید.

$$F(x) = \frac{1e^{-\frac{(1-x)^2}{\sigma^2}} + (-1)e^{-\frac{(-1-x)^2}{\sigma^2}} + 1e^{-\frac{(5-x)^2}{\sigma^2}} + (-1)e^{-\frac{(-3-x)^2}{\sigma^2}}}{e^{-\frac{(1-x)^2}{\sigma^2}} + e^{-\frac{(-1-x)^2}{\sigma^2}} + e^{-\frac{(5-x)^2}{\sigma^2}} + e^{-\frac{(-3-x)^2}{\sigma^2}}} \quad (\text{پ ۲-۳})$$

حال از این رابطه هر نوع عدد را برای بررسی مثبت و یا منفی بودنش می‌توان دسته‌بندی نمود. مثلاً در صورتی که مقدار  $\sigma$  برابر با ۱ باشد و عدد مورد آزمون برابر با ۲ باشد خروجی برابر با ۱ است. اگر ورودی آزمون  $8/5-$  باشد خروجی برابر ۱- است. مشاهده می‌گردد با اینکه داده‌های جدید در داده‌های آموزش نباشد و حتی خارج از بازه آموزش باشد تقریباً تابع فازی به نوعی عدد مثبت و منفی را از هم تشخیص دهد.



- [1] "High Impedance Fault Detection Technology", Report of IEEE PSRC Working Group D15, March 1996. [online] Available on: <http://grouper.ieee.org/groups/td/dist/documents/highz.pdf>.
- [2] M. Sarlak and S. M. Shahrtash, "SVM-based method for high-impedance faults detection in distribution networks", COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 30, pp. 431-450, 2011.
- [3] S. Subramanian and K. Venkataraman, "Detection of high impedance fault in MV distribution system", in Developments in Power Systems Protection, 11th International Conference on, pp. 1-6, 2012
- [4] A. R. Sedighi, M. R. Haghifam, and O. P. Malik, "Soft computing applications in high impedance fault detection in distribution systems", Electric Power Systems Research, vol. 76, pp. 136-144, 2005.
- [5] M. Aucoin, "Status of High Impedance Fault Detection", Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-104, pp. 637-644, 1985.
- [6] A. E. Emanuel, et al., "High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 5, pp. 676-686, 1990.
- [7] A. M. Sharat, et al., "A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection", in Advances in Power System Control, Operation and Management, 1993. APSCOM-93., 2nd International Conference on, vol.2, pp. 613-620, 1993
- [8] T. M. Lai, L. A. Snider, E. Lo, and D. Sutanto, "High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 397-407, 2005.
- [9] N. Zamanan and J. K. Sykulski, "Modelling arcing high impedances faults in relation to the physical processes in the electric arc", WSEAS Transactions on Power Systems, vol. 1, pp. 1507-1512, 2006.
- [10] S. Yong and S. M. Rovnyak, "Decision tree-based methodology for high impedance fault detection", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 19, pp. 533-536, 2004.
- [11] H. K. Zadeh, "An ANN-Based High Impedance Fault Detection Scheme Design and Implementation", International Journal of Emerging Electric Power Systems Research, vol. 4, 2005.

- [12] M. Kizilcay and T. Pniok, "Digital simulation of fault arcs in power systems", *European Transactions on Electrical Power*, vol. 1, pp. 55-60, 1991.
- [13] H. A. Darwish and N. I. Elkalashy, "Universal arc representation using EMTP", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 772-779, 2005.
- [14] M. Michalik, et al., "High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 1793-1802, 2006.
- [15] M. Michalik, W. Rebizant, "Wavelet transform approach to high impedance fault detection in MV networks", in *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, pp. 1-7, 2005.
- [16] B. Vahidi, N. Ghaffarzadeh, S. H. Hosseinian, and S. M. Ahadi, "An Approach to Detection of High Impedance Fault Using Discrete Wavelet Transform and Artificial Neural Networks", *Simulation*, vol. 86, pp. 203-215, 2010.
- [17] S. R. Nam, J. K. Park, Y. C. Kang, and T. H. Kim, "A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP", in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, vol.2, pp. 1175-1180, 2001.
- [18] R. E. Lee and M. T. Bishop, "Performance Testing of the Ratio Ground Relay on a Four-Wire Distribution Feeder", *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-102, pp. 2943-2949, 1983.
- [19] H. Khorashadi-Zadeh, "A novel approach to detection high impedance faults using artificial neural network", in *Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International*, vol. 1, pp. 373-376, 2004.
- [20] A. A. Girgis, W. Chang, and E. B. Makram, "Analysis of high-impedance fault generated signals using a Kalman filtering approach", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 1714-1724, 1990.
- [21] K. Wook Hyun, L. Gi Wen, "High impedance fault detection utilizing incremental variance of normalized even order harmonic power", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 557-564, 1991.
- [22] D. C. Yu and S. H. Khan, "An adaptive high and low impedance fault detection method", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 1812-1821, 1994.
- [23] B. D. Russell, K. Mehta, and R. P. Chinchali, "An arcing fault detection technique using low frequency current components-performance evaluation using recorded field data", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 1493-1500, 1988.
- [24] A. F. Sultan, G. W. Swift, and D. J. Fedirchuk, "Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 461-470, 1994.

- [25] R. D. Christie, H. Zadehgo, and M. M. Habib, "High impedance fault detection in low voltage networks", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 1829-1836, 1993.
- [26] D. k. Ibrahim, E. S. T. Eldin, E. M. Aboul-Zahab, and S. M. Saleh, "Real time evaluation of DWT-based high impedance fault detection in EHV transmission", *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 907-914, 2010.
- [27] V. Torres Garcia and H. Ruiz Paredes, "High impedance fault detection in Distribution System using Wavelet Transform", in *Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2011 8th International Conference on, pp. 1-6, 2011.
- [28] S. R. Samantaray, P. K. Dash, and S. K. Upadhyay, "Adaptive Kalman filter and neural network based high impedance fault detection in power distribution networks", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 31, pp. 167-172, 2009.
- [29] S. R. Samantaray, "Ensemble decision trees for high impedance fault detection in power distribution network", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, pp. 1048-1055, 2012.
- [30] A. Bansal and G. Pillai, "High impedance fault detection using LVQ neural networks", *International Journal of Computer, Information, and Systems Science, and Engineering*, vol. 1, pp. 148-152, 2007.
- [۳۱] ایمان. نیکوفر، مصطفی. سرلک و محمد. شهرتاش، «آشکار سازی خطای امپدانس بالا در شبکه‌های توزیع با استفاده از تبدیل S و ماشین بردار تکیه گاه»، بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ۱۳۸۸.
- [۳۲] ایمان. نیکوفر، مصطفی. سرلک و محمد. شهرتاش، «آشکار سازی خطای امپدانس بالا در شبکه‌های توزیع با استفاده از تبدیل TT و ماشین بردار تکیه گاه»، چهارمین کنفرانس حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت تهران، ۱۳۸۸.
- [33] S. R. Samantaray, B. K. Panigrahi, and P. K. Dash, "High impedance fault detection in power distribution networks using time-frequency transform and probabilistic neural network", *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 2, pp. 261-270, 2008.
- [34] J. C. Goswami and A. K. Chan, *Fundamentals of wavelets: theory, algorithms, and applications* vol. 233: Wiley. com, 2011.
- [35] V. Torres G and H. F. Ruiz P, "High Impedance Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform", in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*, 2011 IEEE, pp. 325-329, 2011.
- [36] I. Baqui, I. Zamora, J. Mazón, and G. Buigues, "High impedance fault detection methodology using wavelet transform and artificial neural networks", *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 1325-1333, 2011.



- [37] A. A. Abohagar and M. W. Mustafa, "Back propagation neural network aided wavelet transform for high impedance fault detection and faulty phase selection", in Power and Energy (PECon), 2012 IEEE International Conference on, pp. 790-795, 2012.
- [38] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, "DWT-Based Investigation of phase currents for Detecting High Impedance Faults Due to Leaning Trees in Unearthed MV Networks", in Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, pp. 1-7, 2007.
- [39] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, "Feature Extraction of High Impedance Arcing Faults in Compensated MV Networks. Part I: DWT-Based Analysis of Phase Quantities", in Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica '07. IEEE, pp. 1-6, 2007.
- [40] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, "Feature Extraction of High Impedance Arcing Faults in Compensated MV Networks. Part II: DWT-Based Analysis of Residual Components", in Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica '07. IEEE, pp. 1-5, 2007.
- [41] Y. Ming-Ta, G. Jhy-Cherng, G. Jin-Lung, and C. Chau-Yuan, "Detection of High Impedance Faults in Distribution System", in Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, , pp. 1-5, 2005.
- [42] A. H. Etemadi and M. Sanaye-Pasand, "High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system", Generation, Transmission & Distribution, IET, vol. 2, pp. 110-118, 2008.
- [43] K. Chul-Hwan, K. Hyun, "A novel fault-detection technique of high-impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 17, pp. 921-929, 2002.
- [44] M. S. Ali, et al., "High impedance fault localization in a distribution network using the discrete wavelet transform", in Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012 Ieee International, pp. 349-354, 2012.
- [45] T. Lai, L. Snider, and E. Lo, "Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults", Electric Power Systems Research, vol. 76, pp. 626-633, 2006.
- [46] T. M. Lai, et al., "RMS percent of wavelet transform for the detection of stochastic high impedance faults", in Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on, pp. 823-828, 2012.

- [47] M. Michalik, M. Lukowicz, "Verification of the wavelet-based HIF detecting algorithm performance in solidly grounded MV networks", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 2057-2064, 2007.
- [48] M. R. Haghifam, A. R. Sedighi, and O. P. Malik, "Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection", *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 153, pp. 359-367, 2006.
- [49] J. Vico, M. Adamiak, C. Wester, and A. Kulshrestha, "High impedance fault detection on rural electric distribution systems", in *Rural Electric Power Conference (REPC)*, 2010 IEEE, pp. B3-B3-8, 2010.
- [50] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, "DWT-Based Detection and Transient Power Direction-Based Location of High-Impedance Faults Due to Leaning Trees in Unearthed MV Networks", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 94-101, 2008.
- [۵۱] وانگ. لی، «سیستم های فازی و کنترل فازی»، ترجمه تشنه لب. محمد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.
- [52] J. Moshtagh and A. Rafinia, "A new approach to high impedance fault location in three-phase underground distribution system using combination of fuzzy logic & wavelet analysis", in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2012 11th International Conference on, pp. 90-97, 2012.
- [۵۳] مجید. حاجتی پور و محمد. فرخی، «تشخیص خطای امپدانس بالا در شبکه های توزیع توسط فازی خوشه سازی»، نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ۱۳۸۳.
- [54] A. S. Bretas, M. Moreto, R. H. Salim, and L. O. Pires, "A Novel High Impedance Fault Location for Distribution Systems Considering Distributed Generation", in *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006. TDC '06. IEEE/PES, pp. 1-6, 2006.
- [55] D. K. Ibrahim, T. El Sayed, E.-D. El-Zahab, and S. M. Saleh, "Unsynchronized fault-location scheme for nonlinear hif in transmission lines", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 631-637, 2010.
- [56] A. Bernadić and Z. Leonowicz, "Fault location in power networks with mixed feeders using the complex space-phasor and Hilbert-Huang transform", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, pp. 208-219, 2012.
- [57] S. Gautam and S. M. Brahma, "Detection of High Impedance Fault in Power Distribution Systems Using Mathematical Morphology", *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 1226-1234, 2013.

[۵۸] کریم. روشن میلانی، «خطوط هوایی شبکه‌های توزیع برق - تجهیزات و طراحی»، انتشارات موسسه آموزش

عالی علمی-کاربردی صنعت آب و برق، چاپ اول، تابستان ۱۳۸۱.

[59] E. Acha, A. Semlyen, and N. Rajakovic, "A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 5, pp. 1390-1397, 1990.