

دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهروд

پایانامه کارشناسی ارشد

## شبیه سازی تخلیه جزئی در ترانسفور ماتور قدرت به منظور تشخیص و مکانیابی آن

اساتید راهنما:

دکتر احمد دارابی

دکتر مهدی بانزاد

محقق:

علی ساریخانی

به نام ایزد هستی بخش

## چکیده

در کنار هادی ها که مهمترین وسیله هدایت و انتقال توان الکتریکی هستند، عایقها به عنوان تکمیل کننده سیستم الکتریکی، از جایگاه ویژه ای برخوردارند. امروزه استفاده و بکار گیری عایق ها بصورت شاخه ای مجزا در علوم مواد و فشار قوی رشد کرده است. در سیستمهای فشار قوی، عایقها نقش کلیدی دارند و کیفیت و طول عمر آنها تاثیری مستقیم بر کارکرد صحیح، ضریب اطمینان و هزینه ها خواهد داشت. تخلیه جزئی سر منشا خرابی تدریجی عایقها و در نهایت تخریب آنها است. در نتیجه آشکار سازی و بررسی این پدیده در عایقها در طول سالیان متمادی مورد توجه محققان بوده است. در ترانسفورماتور- های قدرت و ژنراتور ها که سهم بزرگی از سرمایه گذاری بخش انتقال را به خود تخصیص داده اند، میزان تخلیه جزئی نشان دهنده میزان سلامت عایق است.

در طی سالیان متمادی تلاشهای فراوانی برای اختراع وسایل و روش‌های اندازه گیری کارامد، بیان تئوری تخلیه جزئی و کلاسه بندی و مکانیابی تخلیه جزئی صورت پذیرفته است. برخی از این موضوعات تا جایی توسعه یافته اند که کمیته های علمی معتبری مانند IEEE و IEC استانداردهای ویژه ای را برای آنها تدوین کرده اند. اما بدلیل ماهیت بسیار پیچیده تخلیه جزئی هنوز مشکلات بسیاری در برخی از زیر شاخه های تخلیه جزئی وجود دارد که از مهمترین آنها مشکلات موجود در زمینه مکان یابی تخلیه جزئی است. مکان یابی تخلیه جزئی به منظور تعویض قسمتهای معیوب برای جلوگیری از انتشار خرابی و یا جلوگیری از خروج اظراری ترانسفورماتور انجام می شود. این موضوع دست به گریبان مشکلاتی عدیده ای مانند مدلسازی مناسب ترانسفورماتور در فرکانس های بالا، مدلسازی منبع تخلیه جزئی بر طبق شواهد فیزیکی موجود و تحلیل مناسب تخلیه های اندازه گیری شده، است. لذا در این پایانامه به منظور حل برخی از این مشکلات، به بررسی و ارائه راهکار در زمینه های تشخیص، تحلیل و مکانیابی تخلیه جزئی اقدام می کنیم.

## فهرست فصل ها

## فصل

(۱).....اول

- ۱-۱

(۲).....مقدمه

## فصل

(۶).....دوم

مروری بر ساختار سیم پیچی ترانسفورماتور

- ۱-۲

(۷).....مقدمه

سیستم دیدگاه از ساختار ترانسفورماتور - ۲-۲

(۷).....عایقی

۳-۲- مروری مختصر بر انواع مختلف سیم

(۸).....پیچی

۱-۳-۲ - چند نوع عمدہ سیم

(۹).....پیچ

۲-۳-۲ - سیم پیچی

(۱۰).....ساندویچی

۳-۳-۲ - سیم پیچی

(۱۰).....متمرکز

۱-۱-۳-۲ - سیم پیچ لایه

(۱۱).....ای

(۱۳)..... دیسکی

## فصل

(۱۶)..... سوم

### تئوری تخلیه جزئی الکتریکی

-۱-۳

(۱۷)..... مقدمه

الکتریکی ..... -۲-۳  
تئوری ..... و سیستمهای

(۱۷)..... الکتریکی

-۱-۲-۳ - مدل سیستم عایقی و حفره تخلیه با توجه به شرایط فیزیکی

(۱۹)..... حاکم

-۲-۲-۳ ..... رابطه ..... جزئی ..... تخلیه ..... با ..... ولتاژ ..... و ..... مکان

(۲۱)..... حفره

-۳-۲-۳ ..... رابطه ..... تخلیه ..... الکتریکی ..... جزئی ..... با ..... شکل

(۲۵)..... حفره

-۳-۳ ..... بررسی ..... انواع ..... روشهای ..... تشخیص ..... خطا ..... در

(۲۶)..... ترانسفورماتور

-۴-۳ ..... تشخیص ..... خطا های دائمی ..... و گذرا ..... با استفاده از آزمایش ضربه

(۲۸).....

-۵-۳ ..... بررسی ..... انواع ..... روشهای ..... اندازه گیری ..... و ..... تشخیص ..... تخلیه ..... جزئی ..... در ..... ترانسفورماتورهای

(۳۰)..... قدرت

-۱-۵-۳ ..... روشن

(۳۰)..... شیمیایی

|   |          |        |        |          |
|---|----------|--------|--------|----------|
| روش   |          | -۲-۵-۳ |        |          |
| (۳۲).....   | صوتی     |        |        |          |
| روش   |          | -۳-۵-۳ |        |          |
| (۳۳).....   | الکتریکی |        |        |          |
| الکتریکی  | گیری     | اندازه | روشهای | -۶-۳     |
| (۳۳).....   |          |        |        |          |
| مشکلات و چگونگی آماده سازی مدار اندازه گیری تک پالس | -۱-۶-۳   |        |        |          |
| تخلیه.....(۳۵)                                      |          |        |        |          |
| کاهش  | روشهای   | و      | نویز   | -۱-۱-۶-۳ |
| (۳۵).....   |          |        |        | آن.....  |
| کالیبره   |          |        |        | -۲-۱-۶-۳ |
| (۳۶).....   | کردن     |        |        |          |
| روش در در جزئی از استخراج قابل اطلاعات -۷-۳         |          |        |        |          |
| (۳۸).....   | الکتریکی |        |        |          |
| ای زاویه اطلاعات -۱-۷-۳                             |          |        |        |          |
| (۳۸).....   | تخلیه    |        |        |          |
| زمانی اطلاعات -۲-۷-۳                                |          |        |        |          |
| (۳۹).....   | تخلیه    |        |        |          |
| و زمان به وابسته غیر اطلاعات -۳-۷-۳                 |          |        |        |          |
| (۳۹).....   | زاویه    |        |        |          |
| اطلاعات از تخلیه های پارامتر استخراج -۸-۳           |          |        |        |          |
| (۴۰).....   | تخلیه    |        |        |          |
| زمانی اطلاعات از تخلیه های پارامتر استخراج -۱-۸-۳   |          |        |        |          |
| (۴۰).....   | تخلیه    |        |        |          |

۹-۳- الگو یابی انواع تخلیه ها در ترانسفورماتور های روغنی با استفاده روش  
الکتریکی.....(۴۴)

۱-۹-۳- بررسی انواع تخلیه های موجود در ترانسفورماتورهای قدرت  
(۴۵).....

۲-۹-۳- مدلهای پیشنهاد شده جهت شبیه سازی و استخراج پارامتر های انواع مختلف

قدرت ترانسفورماتورهای در محتمل تخلیه های  
(۴۵).....

۳-۹-۳- الگو یابی تخلیه با استفاده از سنسورهای UHF  
(۴۶).....

نتیجه ۱۰-۳  
(۴۷)..... گیری

## فصل

چهارم.....(۴۸)

تکنیکهای مدرن در مکانیابی تخلیه جزئی

-۱-۴

مقدمه.....(۴۹)

۲-۴- مکان یابی تخلیه در ترانسفورماتور خشک

(۵۰).....

۳-۴- مکان یابی تخلیه جزئی در ترانسفورماتورهای نوع  
(۵۱)..... روغنی

۴-۴- تکنیکهای مدرن در مکانیابی تخلیه جزئی با استفاده از روش  
الکتریکی.....(۵۱)

#### ۱-۴-۴- مکانیابی بر اساس توابع تبدیل جزء به جزء سیم

پیچ (۵۲).....

#### ۲-۴-۴- مکانیابی بر اساس صفر و قطب های طیف فر کانسی سیگنال

ها (۵۴).....

نردبانی شبکه مدل -۱-۲-۴-۴

(۵۴)..... ترانسفورماتور

فرکانسی پاسخ مدل -۲-۲-۴-۴

(۵۷).....(FRD)

FTM ( ) بردارها تطابق میزان روش -۳-۲-۴-۴

(۵۷).....

زمان- حوزه سیگنال دارش پر های روش -۳-۴-۴

(۵۸)..... فرکانس

روشهای از استفاده -۴-۴-۴

(۵۹)..... هوشمند

-۵-۴- نتیجه

(۵۹)..... گیری

## فصل

(۶۰)..... پنجم

### مروری بر مدل سازی ترانسفورماتور برای حالات گذرای سریع

-۱-۵

(۶۱)..... مقدمه

۲-۵- مروری بر روشهای مدلسازی سیم پیچ ترانسفورماتور جهت مطالعات حالت

گذرا (۶۱).....

|  |           |
|--|-----------|
| ۳-۵- روش های مدل سازی فیزیکی و مقایسه آنها | (۶۴)..... |
| ۱-۳-۵- مدل خط انتقال چند فازه              | (۶۵)..... |
| ۲-۳-۵- مدل شبکه نرdbانی جزئی               | (۶۶)..... |
| ۳-۳-۵- مدل هیبرید                          | (۶۷)..... |
| ۴-۳-۵- مدل مشروح                           | (۶۷)..... |
| ۴-۵- نتیجه گیری                            | (۷۲)..... |

## فصل

|  |           |
|--|-----------|
| ششم  | (۷۴)..... |
| مدلسازی شکست الکتریکی و تخلیه الکتریکی - ۱-۶       |           |
| مقدمه  | (۷۵)..... |
| ۲-۶- نکات نادیده گرفته شده در مدلسازی شکست و تخلیه |           |
| جزئی   | (۷۵)..... |
| ۳-۶- مدلسازی تخلیه                                 |           |
| جزئی   | (۷۶)..... |
| ۱-۳-۶- مدل سه خازنی تخلیه الکتریکی برای ولتاژ      |           |
| AC   | (۷۶)..... |

|   |                 |
|---|-----------------|
| ۲-۳-۶- مدل سه خازنی حفره برای ولتاژ                                     | (۷۷).....DC     |
| ۴- گنجاندن مفهوم مکان و رشد شبه استاتیک در مدل‌های حفره ای              | (۷۹).....تخلیه  |
| ۵- مدل منبع جریانی تخلیه  | جزئی.....(۸۰)   |
| ۶- مدلسازی  | شکست.....(۸۳)   |
| ۷- نتیجه  | گیری.....(۸۵)   |
| فصل   |                 |
| هفتم  | (۸۶).....       |
| تبديل های زمان-فرکانس و زمان-مقیاس                                      | - ۱-۷           |
| مقدمه   | (۸۷).....       |
| ۲-۷- تبدیل هیلبرت-هوانگ   | (HHT).....(۸۸)  |
| ۳-۷- تبدیل فوریه زمان کوتاه   | (STFT).....(۹۰) |
| ۱-۳-۷- طیف انرژی سیگنال نمونه برداری شده با استفاده از تبدیل فوریه زمان | کوتاه.....(۹۰)  |
| ۴-۷- تبدیل موجک گسسته   | (DWT).....(۹۱)  |

## ۱-۴-۷- مزایا و معایب تبدیل موجک

گستته.....(۹۲)

۵-۷- تبدیل ویگنر-وایل

(۹۳).....(VWD)

۶-۷- تبدیل موجک-هیلبرت

(۹۴).....(WHT)

۱-۶-۷- تجزیه چند سطحی

(۹۴).....سیگنال(MTA)

۱-۱-۶-۷- تجزیه یک سیگنال به مجموعه ای از زیر سیگنالها

(۹۴).....

۲-۱-۶-۷- بازسازی زیر

(۹۷).....سیگنال

۲-۶-۷- طیف زمان-فرکانس- انرژی تبدیل موجک-

(۹۹).....هیلبرت

-۳-۶-۷- طیف انرژی موجک -

(۹۹).....هیلبرت

۴-۶-۷- کل انرژی

(۱۰۰).....سیگنال

۷-۷- نتیجه

(۱۰۰).....گیری

## فصل

۱۰۱).....هشتم

شبیه سازی

|  |       |
|--|-------|
| (۱۰۲).....   | مقدمه |
| ۲-۸- مشخصات ترانس مورد مطالعه و شبیه سازی سیم پیچی فشار قوی        |       |
| آن.....(۱۰۲)   |       |
| ۳-۸- تحلیل سیگنالهای شبیه سازی شده تخلیه جزئی با استفاده از        |       |
| تبدیل WHT.....(۱۰۵)  |       |
| ۱-۳-۸- شبیه سازی نمونه اول و تحلیل آن با استفاده از WHT و          |       |
| (۱۰۶).....STFT   |       |
| ۲-۳-۸- شبیه سازی نمونه دوم و تحلیل آن با استفاده از WHT و          |       |
| (۱۱۰).....STFT   |       |
| ۳-۳-۸- مقایسه نتایج روش STFT و                                     |       |
| (۱۱۶).....WHT  |       |
| ۴-۸- شبیه سازی خطاهای دائمی و گذرا در سیم پیچ تحت آزمایش ضربه..... |       |
| (۱۱۷).....   |       |
| ۱-۴-۸- شبیه سازی شکست و  |       |
| قوس.....(۱۱۷)  |       |
| ۲-۴-۸- شبیه سازی تخلیه الکتریکی.....                               |       |
| (۱۱۹).....   |       |
| ۳-۴-۸- شبیه سازی همزمان تخلیه و شکست.....                          |       |
| (۱۲۰).....   |       |
| ۴-۴-۷۸- شبیه سازی اتصال کوتاه دائمی.....                           |       |
| (۱۲۱).....   |       |
| ۴-۴-۸- شبیه سازی دائمی اتصال به زمین.....                          |       |
| (۱۲۱).....   |       |

-۶-۴-۸- نتایج شبیه سازی ۴-۶-۱ تا -۶-۴

(۱۲۲).....۵

۵-۸- مکان یابی تخلیه

(۱۲۷).....جزئی

۶-۸- جمع بندی و نتیجه

(۱۳۳).....گیری

فصل

(۱۳۴).....نهم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۹- نتیجه

(۱۳۵).....گیری

۲-۹- پیشنهادات

(۱۳۶).....

).....مراجع

(۱۳۷)

ضمیمه

## فهرست شکل ها

### فصل دوم

|  |      |
|--|------|
| شکل (۲-۱): شمایی از سیستم عایقی یک ترانسفور ماتور قدرت با سیم پیچی متumerکز..... | (۹)  |
| شکل (۲-۲): تقسیم بندی انواع سیم پیچی های رایج ترانسفور ماتور.....                | (۹)  |
| شکل (۳-۲): ساندویچی.....   | (۱۰) |
| شکل (۴-۲): متمرکز.....   | (۱۱) |
| شکل (۵-۲): مارپیچی.....  | (۱۲) |
| شکل (۶-۲): لایه.....   | (۱۲) |
| شکل (۷-۲): ودرهم.....  | (۱۳) |
| شکل (۸-۲): مزدوج.....  | (۱۴) |
| شکل (۹-۲): دوقلو.....  | (۱۵) |

شکل(۱۰-۲):

منفرد.....(۱۵)

### فصل سوم

شکل (۱-۳) : مکانهای احتمالی در سیستم

عایقی.....(۱۸)

شکل (۲-۳) : شکافها و مسیرهای آلوده در

عایق.....(۱۹)

شکل (۳-۳) : مدل ساده منبع

تخلیه.....(۱۹)

شکل (۴-۳) : خرابی عایق وابسته به فعالیت تخلیه

جزئی.....(۲۱)

شکل (۵-۳) : توسعه مدل منبع تخلیه برای مدل کامل از سیستم عایقی

تخلیه.....(۲۱)

شکل (۶-۳) : تاثیر تخلیه جزئی در یک سیستم عایقی در ولتاژ سینوسی با فرکانس

قدرت.....(۲۳)

شکل (۷-۳) : آرایش کاتدی و آندی دیواره برای عایقی های مطالعه تخلیه

جزئی.....(۲۴)

شکل (۸-۳) : کلاسه بندی انواع آزمایشها

(۲۷).....

شکل (۹-۳) : روش DGA

(۳۱).....

شکل (۱۰-۳) : روش اندازه گیری تک پالس

تخلیه.....(۳۵)

شکل (۱۱-۳) : آشکارساز همراه با مدار PD

(۳۸).....

|      |             |           |    |        |            |
|------|-------------|-----------|----|--------|------------|
| ایده | تخلیه زمانی | پالس      | تک | یک     | شکل(۱۲-۳): |
|      |             | (۴۲)..... |    |        | آل         |
| PD   | ای حفره     | مدلهای    |    | (۱۳-۳) | شکل        |

(۴۶).....

شکل(۱۴-۳): پارامترهای تک پالس ایده آل برای مدلها مختلف تخلیه جزئی در واحد نانو ثانیه.....(۴۶)

#### فصل چهارم

شکل(۱-۴): مکان یابی تخلیه در ترانسفورماتور خشک با استفاده از سنسور های تماسی در سطح پیچی سیم.....

(۵۰).....

شکل(۲-۴): شکل شماتیک پیچی سیم.....

(۵۳).....

شکل(۴-۳): زیر سیستمهای سیم پیچی از طرف بوشینگ به نول و بالعکس.....(۵۳)

شکل(۴-۴): الگوی مکانیابی بر اساس توابع تبدیل جزء به جزء سیم پیچ.....(۵۴)

شکل(۴-۵) مدل شبکه نرdbانی ساده شده ترانسفورماتور با سیم پیچ یکنواخت ساده.....(۵۵)

#### فصل پنجم

شکل(۱-۵): مدل خط انتقال چند فازه.....(۶۵)

شکل(۲-۵): مدل شبکه نرdbانی جزئی برای پیچ لایه ای.....(۶۶)

شکل(۳-۵): نمایش یک واحد به شکل دیسک از سیم پیچی نوع دیسکی.....(۶۸)

شکل(۴-۵): نمایش مدار واحد معادل یک پیچ در مدل مشروح.....(۶۸)

شکل(۵-۵): مدار معادل گسترده ۱۴۵ دیسک حلقه ای یک زوج و اژگون.....(۶۹)

شکل(۵-۶): مدار معادل ۱۴ حلقه ای یک زوج دیسک در هم.....(۶۹)

شکل(۵-۷): مدار معادل سیم پیچ فشار قوی شامل ۸ زوج دیسک سیم پیچ فشار قوی.....(۷۰)

شکل(۸-۵): مدار معادل مدل مشروح در حالتهای گذرا.....(۷۲)

### فصل ششم

شکل(۱-۶): مدل ساده شده مداری یک سیستم عایقی با یک حفره داخل آن برای ولتاژ AC.....(۷۶)

شکل(۲-۶): چگونگی شکست حفره و شکل گیری فرایند تخلیه الکتریکی در حفره داخلی عایق تحت ولتاژ AC.....(۷۷)

شکل(۳-۶): مدل ساده شده مداری یک سیستم عایقی با یک حفره داخل آن برای ولتاژ DC.....(۷۸)

شکل(۴-۶): چگونگی شکست حفره و شکل گیری فرایند تخلیه الکتریکی در حفره داخلی عایق تحت ولتاژ DC.....(۷۹)

شکل(۵-۶): مدار کننده پالس PD مدل مدار (الف).....(۸۱)

..... شکل(۶-۶): مدار کننده پالس، مدل PD مدل مدار (ب) (۶)

(۸۱).....

..... شکل(۷-۶): مدار کننده پالس، مدل PD، مدار (ج) (۷)

(۸۱)

..... شکل (۸-۶): پالس جریانی تخلیه جزئی (۸)

(۸۲)

### فصل هفتم

..... شکل(۱-۷): نمایی شماتیک از تبدیل STFT (۹۰)

..... شکل(۲-۷): نمایی شماتیک از تبدیل موجک (۹۲)

..... شکل(۳-۷): مقایسه پنجره های زمان-فرکانس در تبدیل موجک (الف) و فوریه پنجره ای شده (ب) (۹۲)

..... شکل(۴-۷): شمای سطح توصیفی روش MTA در دوازده (۹۵)

..... شکل(۵-۷): نمایی نزدیکتر از تجزیه سطح بوسیله MTA در یک (۹۶)

..... شکل(۶-۷): دیاگرام شماتیک الگوریتم بازسازی کننده در یک سطح (۹۷)

..... شکل(۷-۷): عملیات افزایش تعداد نمونه بوسیله صفر گذاری (۹۸)

..... شکل(۸-۷): دیاگرام سیگنالهای بازسازی شده در دو سطح (۹۸)

..... شکل(۹-۷): تبدیل مستقیم و معکوس در دو سطح .....  
(۹۸)

### فصل هشتم

..... شکل(۱-۸): شمایی از سیم پیچ از یک ترانس فور ماتور قدرت.....  
(۱۰۳)

..... شکل(۲-۸): ابعاد سیم پیچ مورد مطالعه و مدل بدن.....  
(۱۰۴)

..... شکل(۳-۸): شمایی از مدار شبیه سازی شده جهت مکانیابی تخلیه جزئی.....  
(۱۰۵)

..... شکل (۴-۸): شبیه سازی مدل توسعه یافته حفره دردیسک دهم سیم پیچی بوسیله MATLAB

..... (۱۰۶)

..... شکل(۸-۵): ربع شکل موج اندازه گیری بوسیله مدار شده اندازه گیری.....  
(۱۰۷)

..... شکل(۸-۶): جداسازی پالسهای جریانی تخلیه جزئی از موج جریانی با فرکанс قدرت.....  
(۱۰۸)

..... شکل(۸-۷): طیف انرژی سیگنالهای تخلیه با استفاده از تبدیل STFT .....  
(۱۰۹)

..... شکل(۸-۸): طیف انرژی دامنه سیگنال با استفاده از تبدیل WHT .....  
(۱۰۹).....WHT

..... شکل(۸-۹): طیف زمان- فرکанс- انرژی سیگنال ورودی با استفاده از تبدیل WHT .....  
(۱۱۰)

..... شکل(۱۰-۸): شمایی از شبیه سازی پالسهای تزریقی به سیم پیچی جهت مکانیابی تخلیه جزئی .....  
(۱۱۱)

شکل(۱۱-۸): شکل موج جریان در ترمینال اندازه گیری بوشینگ به هنگام تزریق پالسهاي تخلیه.....

(۱۱۱).....

شکل(۱۲-۸): تجزیه سیگنال شبیه سازی شده بوسیله روش MTA زیر سیگنالها از بالا به پایین شامل(جزئیات بازسازی شده سطوح اول تا یازدهم) و(تخمین بازسازی سطح شده یازدهم) هستند.....

(۱۱۳).....

شکل(۱۳-۸): مجموع سطح به سطح زیر سیگنالها یعنی از جزئیات باز سازی شده سطح اول تا سطح شده سازی باز تخمین یازدهم.....

(۱۱۴).....

شکل(۱۴-۸): STFT از استفاده با تخلیه سیگنالهای ارزی تخمین.....

(۱۱۵).....

شکل(۱۵-۸): طیف زمان-فرکانس STFT سیگنالهای شبیه سازی شده تخلیه جزئی.....

(۱۱۵).....

شکل(۱۶-۸): ارزی سیگنالهای شبیه سازی شده تخلیه جزئی.....

(۱۱۶).....

شکل(۱۷-۸): طیف زمان-فرکانس WHT سیگنالهای شبیه سازی شده تخلیه جزئی.....

(۱۱۶).....

شکل(۱۸-۸): شبیه سازی شکست، آرك و قطع آرك بین دو دیسک مجاور k و k+1 .....

(۱۱۸).....

شکل(۱۹-۸): لگاریتم قدر مطلق مقاومت R(t) در سه فاز شکست، آرك و قطع آرك.....

شکل(۲۰-۸): بلوك مدل توسعه يافته حفره دردیسک ام k .....

(۱۱۹).....

شکل (۲۱-۸): ولتاژ دو سر حفره تحت ولتاژ ضربه مستقل از ترانسفورماتور.....(۱۲۰)

شکل (۲۲-۸): جریانهای آزاد شده از حفره از طریق مقاومتهای  $Rc$ + $Rt$  تحت ولتاژ ضربه و مستقل از

ترانسفورماتور.....(۱۲۰)

شکل (۲۳-۸): مدل اتصال کوتاه بین دو دیسک مجاور  $k$  و  $k+1$  .....(۱۲۱)

شکل (۲۴-۸): مدل اتصال کوتاه به زمین در دیسک .....(۱۲۱)

شکل (۲۵-۸): جریان سیم زمین در چهار حالت (شکست و قوس ، اتصال کوتاه بین دو دیسک مجاور خط) .....(۱۲۲)

شکل (۲۶-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در چهار حالت(شکست و قوس ، اتصال کوتاه بین خط) .....(۱۲۳)

شکل (۲۷-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در چهار حالت(شکست و قوس ، اتصال کوتاه بین دو دیسک مجاور .....(۱۲۳)

شکل (۲۸-۸): مقایسه جریان سیم زمین در دو حالت (شکست- آرک-تخلیه و شکست- آرک).....(۱۲۴)

شکل (۲۹-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در دو حالت (شکست- آرک-تخلیه و شکست- آرک).....(۱۲۴)

..... شکل (۳۰-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در دو حالت (شکست- آرک- تخلیه و شکست- آرک)

(۱۲۵).....

..... شکل (۳۱-۸): مقایسه جریان سیم زمین در دو حالت (بدون خطا و تخلیه جزئی)

(۱۲۵).....

..... شکل (۳۲-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در دو حالت (بدون خطا و تخلیه جزئی) (۱۲۶).....

..... شکل (۳۳-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در دو حالت (بدون خطا و تخلیه جزئی) (۱۲۶).....

..... شکل (۳۴-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول (۱۲۸).....

..... شکل (۳۵-۸): سیگنال اندازه گیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول (۱۲۸).....

..... شکل (۳۶-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول (۱۲۸).....

..... شکل (۳۷-۸): سیگنال اندازه گیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول (۱۲۹).....

..... شکل (۳۸-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول (۱۲۹).....

شکل(۳۹-۸): سیگنال اندازه گیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره  
اول.....

(۱۲۹).....

شکل(۴۰-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره  
اول.....

(۱۳۰).....

شکل(۴۱-۸): سیگنال اندازه گیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره  
اول.....

(۱۳۰)

شکل(۴۲-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره  
اول.....

(۱۳۰).....

شکل(۴۳-۸): سیگنال اندازه گیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره  
اول.....

(۱۳۱)

شکل(۴۴-۸): تغییرات انرژی سیگنال از سر بوشینگ (\*) و نول(■) در طول سیم  
پیچی.....

شکل(۴۵-۸): نسبت انرژی سیگنالهای شده در طول سیم  
پیچی.....

(۱۳۲).....

شکل(ض-۲-۱): نمودار مکانی ماتریس  
اندوکتانس.....

## فهرست جدول ها

## فصل هشتم

جدول(۱-۸): قوى .....  
فني سيم پيچ فشار .....(۱۰۴)

ضميمه

جدول(ض-۲-۱): ديناميكي .....  
مشخصات پالسهاي تزريقي مصنوعی در منبع .....(۱۵۴)

جدول (ض-۲-۳): ماترييس اندوكتا نس مدل سيم پيچي فشار قوى ترانسفورماتور مطالعه .....  
شده .....(۱۵۴)

جدول(ض-۲-۲): پaramتر های خازنی و مقاومتی مدل سيم پيچي فشار قوى ترانسفورماتور مورد .....  
مطالعه .....(۱۵۵)

## مقدمه:

عملکرد با قابلیت اطمینان بالا، همیشه از نگرانیهای مهندسان صنعت برق بوده است به همین منظور، کنترل کیفیت ترانسفورماتورهای قدرت از همان سالهای اولیه پیدایش این تجهیز مورد توجه فراوان بوده است. آزمایش های گوناگونی برای ارزشیابی صحت وضعیت عایقی در مرحله کنترل کیفیت در کارخانه و بعد از هر تعمیر ترانس پیشنهاد و بکار گرفته شده است. می توان گفت آزمایشهای دی الکتریک ، ضربه و تخلیه جزئی معیارهایی را برای وضعیت سیستم عایقی ارائه می دهند، اما آزمایشهای مربوطه تنها سالم و یا ناسالم بودن وضعیت سیستم را تعیین می کنند و هیچگونه مشخصه ای را برای شرایط اولیه وجود خطا در سیستم عایقی ترانسفورماتور ارائه نمی دهند، بنابراین پیشنهاد شده است که آزمایش تخلیه جزئی هم در مرحله کنترل کیفیت و هم در مرحله بهره برداری برای آشکار سازی شرایط اولیه خطا به منظور انجام اقدامات پیشگیرانه و یا پشتیبانی، انجام گردد. شاید تخلیه جزئی<sup>۱</sup> مهمترین دلیل خرابی عایق های الکتریکی ترانسفورماتورهای قدرت باشد. بنابراین بررسی مهمترین علت خرابی عایق های ترانسفورماتور (تخلیه جزئی) به منظور اعمال مراقبت های نگهدارانه و یا تعویض قسمت های معیوب ترانسفورماتور به منظور جلوگیری از انتشار

آسیب و همچنین کاهش هزینه و زمان تعمیر ضروری به نظر می رسد. به این دلیل است که مکان یابی تخلیه جزئی به منظور شناسایی محل خطا مورد توجه مهندسان برق قرار گرفته است. شناسایی دقیق مشکلات موجود در هر زمینه ای نیازمند به دانش پایه ای در آن راستا می باشد، بنابراین محققان با بیان های تعریفیک به توصیف مشکلات علمی می پردازنند. در این میان تئوری تخلیه جزئی، چگونگی پیوند خوردن این تئوری با مسائل و مشکلات عملی، بررسی چگونگی مدلسازی و شبیه سازی آن، انواع روشها و مدارات آشکار ساز عملی و پیاده سازی آن در نرم افزار به منظور مطالعه دقیقترا این خطا مورد توجه فراوان قرار گرفته است.

تکنیکهای مکان یابی تخلیه جزئی وابسته به روش آشکار سازی تخلیه جزئی می باشد. هر کدام از روشهای اندازه گیری محدودیتهای ویژه ای را دارند که وابسته به نوع ترانس و تخلیه می باشد. به عنوان مثال می توان گفت روش نوری محدود به عایق های شفاف و تخلیه کرونا می باشد، روش شیمیایی کاربرد مشخصی در مکانیابی تخلیه ندارد و روش صوتی محدود به عایقهای جامد می شود و بدلیل پیچیدگی پدیده انتشار امواج در مواد جامد پالسهای اندازه گیری شده، اطلاعات مفیدی برای مکان یابی تخلیه ارائه نمی دهند، به همین دلیل می توان گفت که روشهای نوری، صوتی و شیمیایی حساسیت پایینی به مکان تخلیه دارند. ولی در روش الکتریکی پالسهای اندازه گیری شده طیف فر کانسی بسیار گسترده ای تا فرکانس <sup>۱</sup>UHF را شامل می شوند. امروزه با توسعه مدار های اندازه گیری پیشرفتی امکان اندازه گیری پالسهای سریعتر با شدت کمتر در این روش میسر شده است. یکی از روشهای پایه ای برای مکان یابی تخلیه با استفاده از روش الکتریکی مقایسه انرژی سیگنال عملی و نمونه شبیه سازی شده است، اما مشکلات متقابل نتایج عملی و شبیه سازی شده محدودیتهايی را در این روش پدیدار کرده است.

شاید بتوان گفت تمامی مباحث مکان یابی و شناسایی طبیعت خطا با مدلسازی مناسب وسیله خطدار شده و خطای مورد مطالعه در نرم افزار، قابل اجرا است. بنابراین توسعه مدلهای مناسب تجهیزات برای شبیه سازی انواع خطاهای مانند خطاهای طراحی و خطاهای ظاهر شده در مرحله کنترل کیفیت و بهره برداری مورد توجه فراوان بوده است. مدلسازی موثر انواع مختلف خطاهای با توجه

---

<sup>۱</sup>. Ultra High Frequency

به شواهد تجربی حاکم بر آنها به عنوان یک اصل در کلاسه بندی و مکان یابی آنها شناخته شده است. روش‌های گوناگونی برای تشخیص الگوهای خطأ و کلاسه بندی آنها توسعه یافته اند که بر پایه مقایسه نتایج اندازه گیری و نتایج شبیه سازی‌های مدل‌های خطأ استوار می‌باشند. اما هنوز مدل‌سازی موثر خطاهای کوچک و گذرا بصورت مدل‌های غیر خطأ بصورت کامل مورد توجه قرار نگرفته است.

تعداد زیادی از روش‌های شناسایی مکان و فیزیک خطأ بر مبنای تحلیل مناسب سیگنال‌های خطأ دار استوار شده اند. روش مرسوم برای تحلیل سیگنال تخلیه جزئی روش تحلیل فوریه می‌باشد. این روش پایه و اساس نمودارهای پاسخ و طیف فرکانسی می‌باشد. این روش وقتی به سیگنال‌های غیرخطی و غیرساکن اعمال می‌شود با محدودیتهای جدی از جمله اینکه انرژی طیف با تغییر زمان تغییر نمی‌کند، مواجه می‌شود. بنابراین استفاده از تبدیل فوریه برای تحلیل این چنین سیگنال‌هایی روش مفیدی نمی‌باشد. برای حل این مشکل تبدیلهای زمان - فرکانس در ۲۰ سال اخیر به طرز چشم گیری توسعه یافته اند این روند تکاملی در کنار پیشرفت دستگاههای دیجیتالی، ما را قادر به تحلیل و بررسی سیگنال‌های تخلیه جزئی ساخته است. روش تحلیل سیگنال غیر ایستای تخلیه باید دارای خواص نویز زدایی، پنجره سازی اتوماتیک و رزولوشن زمان-فرکانس مناسب باشد. اما هنوز روش کارامدی که تمامی این ویژگیها را دارا باشد ارائه نشده است.

در یک نگاه کوتاه در فصل دوم به مروری مختصر بر سیستم عایقی ترانسفورماتور و انواع سیم پیچی‌های رایج می‌پردازیم. در فصل سوم، انواع روش‌های تئوری در رابطه با تخلیه جزئی، بررسی مشخصات پالسهای تخلیه و انواع روش‌های آشکار سازی آن بررسی می‌شود. بدنبال آن در فصل چهارم، انواع روش‌های مکان یابی مدل مرجع به منظور انتخاب و بهبود آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند. در فصل پنجم انواع روش‌های مدل‌سازی ترانسفورماتور برای حالت گذرای سریع مورد توجه قرار می‌گیرد. که هدف از آن انتخاب مدلی مناسب برای پیاده سازی مدل خطای تخلیه بر روی آن است. در فصل ششم به بهبود مدل‌های موجود در زمینه شکست الکتریکی و تخلیه جزئی اقدام خواهد شد. در فصل هفتم برای حل مشکلات موجود در زمینه تحلیل سیگنال‌های الکتریکی تخلیه یک تبدیل جدید در این راستا ارائه می‌شود. در فصل هشتم به شبیه سازی و تحلیل مطالب ارائه شده در فصول گذشته اقدام و در پایان در فصل نهم نتیجه گیری و پیشنهادات بیان می‌گردند.

شاید مهمترین موضوع در رابطه با عمر مفید ترانسفورماتور، عمر سیستم عایقی آن باشد. سیستم عایقی ترانسفورماتور به تمامی اجزایی که نقش جدا کنندگی ولتاژ بالاتر از پایین تر را دارند گفته می‌شود. این اجزاء شامل عایق‌های جامد، مایع و گاز می‌شود. ساختار سیستم عایقی وابسته به نوع سیم پیچی است، لذا در این فصل به منظور مطالعه دقیق‌تر این موضوع به مروری مختصر بر ساختار کلی عایقی ترانسفورماتور و بدنبال آن به بررسی انواع مختلف سیم پیچی‌های رایج می‌پردازیم.

## [۱]-۲-ساختار ترانسفورماتور از دیدگاه سیستم عایقی

شکل(۱-۲) یک شمای کلی از سیستم عایقی یک ترانسفورماتور قدرت با سیم پیچی مرکز را نشان می‌دهد. در این ساختار از مواد دی الکتریک به منظور ایجاد فاصله بین سطوح پتانسیل دار استفاده شده است. از مهمترین این مواد میتوان به روغن عایقی، کاغذ آغشته به روغن، فاصله اندازه های ۳ عمودی، صفحات سلولزی<sup>۳</sup> و چسب عایقی اشاره نمود. همچنین به منظور ایجاد فاصله بین دورهای سیم پیچی، از هادیهای لاک دار، هادی با روپوش پنبه و یا کاغذ استفاده می‌شود. از آنجایی که بحث اصلی در این تحقیق، بررسی سیم پیچی‌های فشار قوی در حوزه‌های فرکانسی بالا است لذا تمرکز خود را به روی انواع این سیم پیچی‌ها معطوف می‌کنیم.

## [۲]-۳-مروری مختصر بر انواع مختلف سیم پیچی

طراحی سیم پیچی ترانسفورماتور مبتنی بر مجموعه‌ای از نیازهای اساسی است. ترانسفورماتور باید قادر به تحمل تنש‌های الکتریکی و مکانیکی که در موقع آزمایش و بهره برداری بر آن وارد می‌شود، باشد. اگر جوابهای آزمایش‌هایی که در مرحله کنترل کیفیت انجام می‌شود، رضایت‌بخش باشد، احتمال این داده می‌شود که ترانسفورماتور برای سالیان متمادی، تحت شرایطی که نصب می‌شود، با قابلیت اطمینان خوبی کار کند. طی چندین دهه از تاریخ شروع بهره برداری از

---

<sup>۳</sup>. Spacer

۲. Press Board

ترانسفورماتورها، مهندسین برای رفع مشکلات موجود در ساختار سیم پیچی ها، تدبیر زیادی را بکار برده اند. بعضی از این تمهدیات مدت زیادی نیست که اجرا می شود و هنوز بسیاری از طرحها در اجرا مشکل دارند چون هر نوع سیم پیچی، مزیت ویژه ای را برای محدوده ای از ولتاژها و ظرفیت ها ایجاد می کند، لذا برای تعیین حالت بهینه برای هر نوع سیم پیچ، ولتاژ و قدرت نامی ترانسفورماتور را باید در نظر گرفت.

سیم پیچ مجموعه ای از حلقه ها از جنس هادی است که همگی تشکیل یک مدار الکتریکی را می دهند. در ساخت هر نوع سیم پیچ، طراح باید بهترین ترکیب را با توجه به نکات زیر انتخاب کند.

۱- سیم پیچ باید استقامت عایقی مناسبی داشته باشد که بتواند ولتاژهای مختلف، شامل ولتاژ کار و ولتاژ خطا، اعم از ولتاژ ناشی از کلید زنی و ولتاژ ناشی از امواج گذرای صاعقه را تحمل کند.

۲- حرارت ناشی از تلفات سیم پیچ بطور موثر به محیط روغن منتقل گردد تا افزایش غیر مجاز دمای سیم پیچ بوجود نیاید.

۳- تلفات بار و تلفات آهن همسو با یک طراحی بهینه باشد.

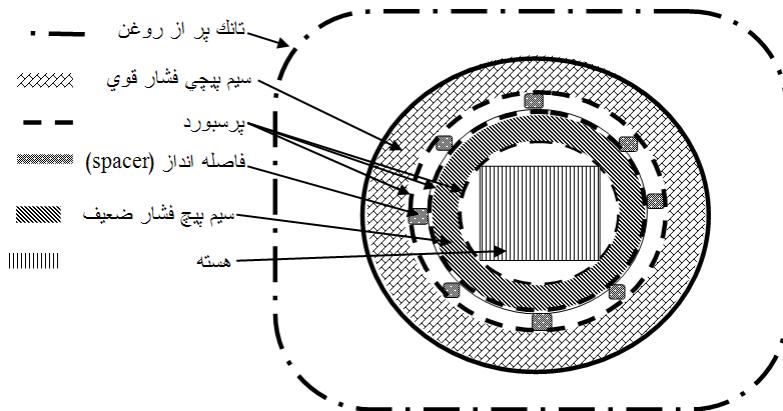
۴- امپدانس پراکندگی و امپدانس اتصال کوتاه جهت محدود کردن جریانهای اتصال کوتاه و همچنین تنظیم ولتاژ، بصورت مناسب انتخاب گردد.

۵- توزیع اولیه ولتاژ در طول سیم پیچ، در صورت ورود امواج ضربه به عایقها صدمه نرساند.

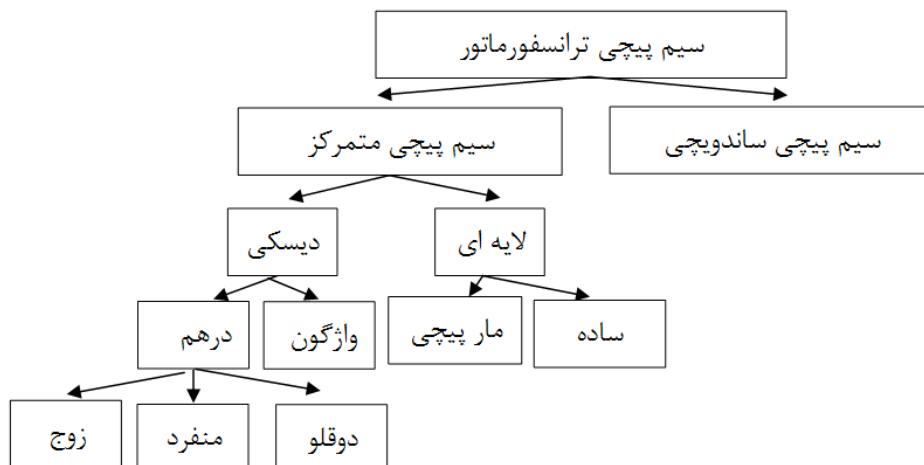
۶- در مقابل نیروهای ناشی از جریانهای اتصال کوتاه، استقامت مکانیکی مناسبی داشته باشد.

### ۱-۳-۲- چند نوع عمدہ سیم پیچ

تقسیم بندیهای مختلفی برای سیم پیچی ها ذکر شده است و به طور کلی آنها را می توان به صورت دیاگرام شکل (۲-۲) تقسیم بندی کرد [۲].



شکل (۱-۲): شمایی از سیستم عایقی یک ترانسفور ماتور قدرت با سیم پیچی متمرکز<sup>۱۵</sup> [۱]



شکل (۲-۲): تقسیم بندی انواع سیم پیچی های رایج ترانسفور ماتور [۱]

### ۲-۳-۲- سیم پیچی ساندویچی<sup>۱۶</sup> [۱]

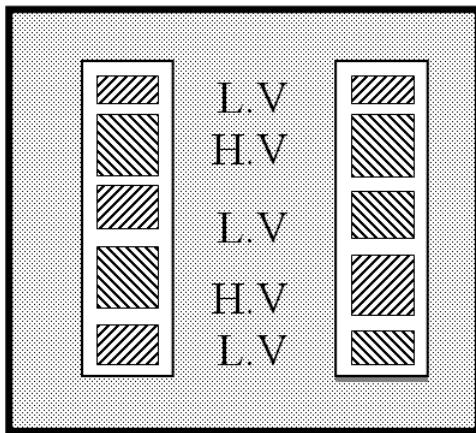
این نوع سیم پیچی برای ترانس فور ماتور زرهی<sup>۷</sup> مورد استفاده قرار می گیرد. در این سیم پیچی، سیم پیچی های فشار ضعیف و فشار قوی به چند بخش تقسیم می شوند و هر بخش سیم پیچ فشار قوی بین دو بخش سیم پیچی فشار ضعیف قرار می گیرد. تعداد دور بخشهای انتهایی سیم پیچی

<sup>۱</sup>. Core Type

<sup>۲</sup>. Sandwich Type

<sup>۳</sup>. Shell Type

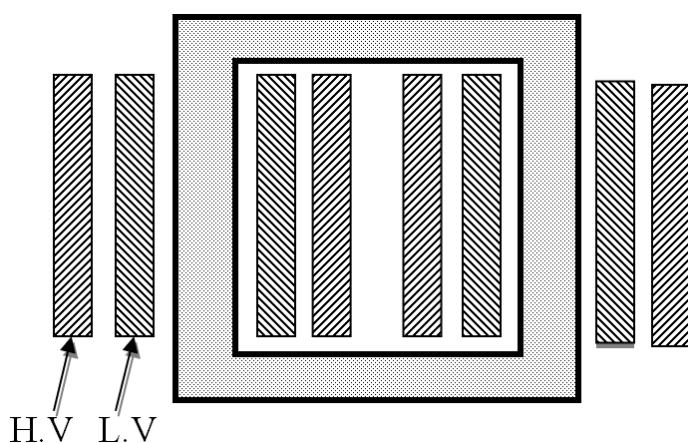
فشار ضعیف نصف تعداد دور بخش‌های معمولی سیم پیچ فشار ضعیف می‌باشد. شکل (۳-۲) این نوع سیم پیچی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲): سیم پیچی ساندویچی [۱]

### ۳-۳-۲- سیم پیچی متمرکز [۱]

سیم پیچی متمرکز برای ترانسفورماتورهای ستونی بکار می‌رود. در این نوع از ترانس فورماتور، سیم پیچی اولیه و ثانویه بصورت استوانه متمرکز روی ساقه هسته طبق شکل (۴-۲) پیچیده می‌شود. سیم پیچی فشار ضعیف نزدیک به هسته قرار می‌گیرد و سیم پیچ فشار قوی روی آن واقع می‌شود. این سیم پیچی را می‌توان تقسیم کرد و به تناب بخش‌های سیم پیچی فشار قوی و فشار ضعیف را روی هم پیچید تا مقاومت القابی پراکندگی کاهش یابد.



## شکل(۴-۲): سیم پیچی متمرکز[۱]

### [۲]-۳-۳-۱- سیم پیچ لایه ای

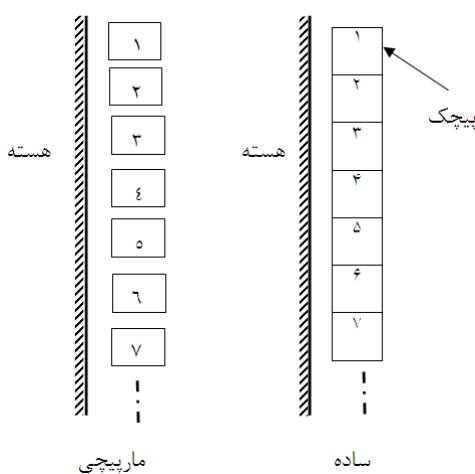
در این نوع از سیم پیچی دو دور متوالی یا مجاور در یک شعاع ثابت در راستای محور هسته و هم امتداد با ستونها پیچیده می شوند. این نوع به دو دسته تقسیم می شود.

#### الف- سیم پیچی لایه ای ساده

در سیم پیچی لایه ای ساده هر دور در کنار دور قبلی قرار می گیرد (البته در سطح هر عایق وجود دارد). این نوع سیم پیچی برای ولتاژ های تا حدود ۳۶ کیلو ولت بکار می رود و استفاده از آن در در طرف فشار ضعیف ترانسفور ماتور های قدرت معمول است(شکل(۵-۲)).

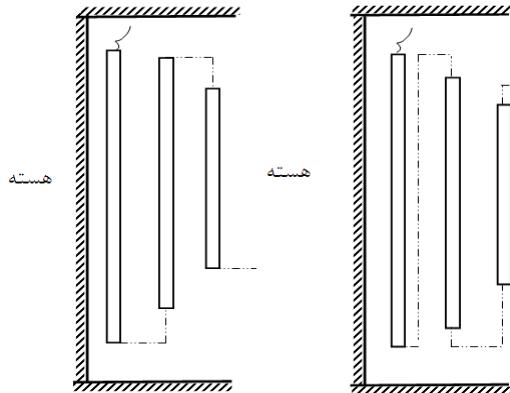
#### ب- سیم پیچی لایه ای مارپیچی

در این نوع سیم پیچی هر دور با دور قبلی فاصله دارد. یعنی بین هر حلقه با حلقه بعدی یک سری فاصله انداز وجود دارد. این نوع سیم پیچی باعث افزایش انتقال حرارت می شود. سطح مقطع این نوع سیم پیچی معمولاً مستطیلی است و برای ولتاژ های تا حدود ۳۶ کیلو ولت بکار می رود. این نوع سیم پیچی معمولاً در طرف فشار ضعیف ترانسفور ماتور های قدرت بکار گرفته می شود(شکل(۵-۲)).



شکل(۵-۲): سیم پیچی لایه ای ساده و مارپیچی[۲]

سیم پیچی های لایه ای را می توان به صورت چند لایه ترکیب نمود. این نوع آرایش در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.



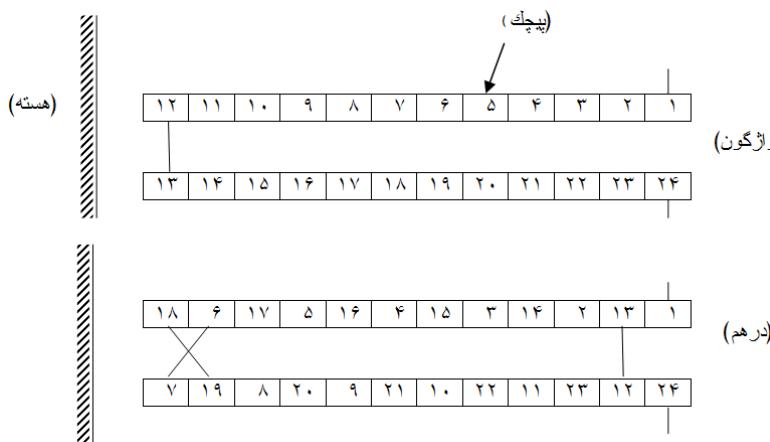
شکل (۶-۲): سیم پیچ لایه ای چند لایه

از آنجایی که تمرکز اصلی در این پایانمه بر روی سیم پیچ فشار قوی یک ترانسفور ماتور دیسکی غیر هموژن است، در ادامه به تشریح جامع سیم پیچی های دیسکی می پردازیم.

### ۳-۳-۲- سیم پیچ دیسکی

در این نوع سیم پیچی دو دور متواالی یا مجاور در جهت شعاعی در امتداد عمود بر محور هسته کnar هم پیچیده می شوند. به دو دلیل عمدۀ سیم پیچهای دیسکی برای سیستم های با ولتاژ بالاتر از ۳۶ کیلو ولت بکار می روند. اولاً، در این سیم پیچها اختلاف پتانسیل بین حلقه های مجاور نسبت به سیم پیچ لایه ای کاهش یافته است. ثانیا، به خاطر افزایش ظرفیت خازنی طولی سیم پیچی تحمل امواج ضربه بهبود یافته است [۲].

سیم پیج نوع دیسکی به انواع مختلفی از جمله دیسکی ساده یا واژگون<sup>۸</sup> و نوع درهم<sup>۹</sup> تقسیم بندی می شود. در شکل (۷-۲) این دو نوع نشان داده شده اند. سیم پیچهای دیسکی بسیار متنوع هستند. در قسمت بعد به چند نوع آنها اشاره خواهد شد.



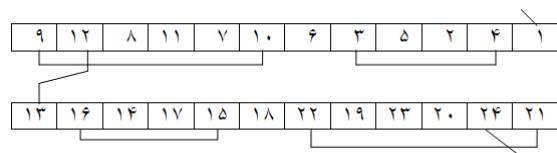
شکل(۷-۲): سیم پیج های دیسکی واژگون و درهم [۲]

همانطور که می دانیم با کاهش ظرفیت خازنی عرضی توزیع ولتاژ روی سیم پیچی یکنواخت تر خواهد شد. این کار را می توان با زیاد کردن عایق بین هسته و سیم پیج انجام داد در این صورت باقیستی ابعاد ترانسفور ماتور را زیاد کرد که این کار چندان اقتصادی نیست. راه دیگر افزایش خازن طولی (سری) است. برای سیم پیج دیسکی پیوسته با یک در میان قرار دادن حلقه ها (دور کردن حلقه های متوالی) از یکدیگر و نتیجتاً افزایش اختلاف پتانسیل حلقه های کنار هم) می توان انرژی پتانسیل ذخیره شده در مجموعه را افزایش داد و به عبارت دیگر ظرفیت معادل سری به ازای یک ولتاژ ثابت افزایش می یابد. در دهه ۷۰ بخارط فقدان یک روش قابل اطمینان برای محاسبه توزیع ولتاژ روی سیم پیج، به منظور فائق آمدن بر مشکل اضافه ولتاژ های داخلی، ابعاد عایق بین حلقه ها افزایش داده می شد. علی رغم این موضوع، فراهم آوردن استقامت الکتریکی مناسب برای عایق در برابر ولتاژ ضربه مساله ای لا ینحل بود. افزایش عایق، ظرفیت طولی را کاهش و توزیع ولتاژ ضربه را غیر یکنواخت تر می کند، بطوریکه سیم پیج استقامت لازم را در برابر فرکانس قدرت و ولتاژهای ضربه

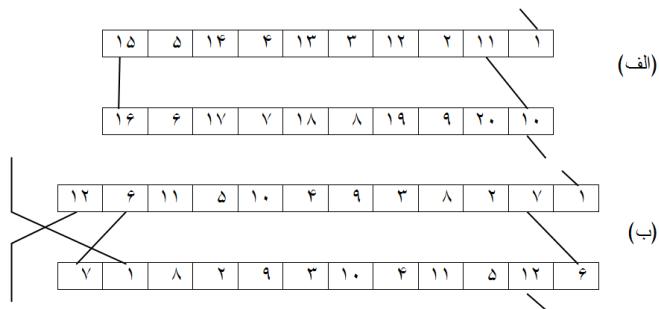
<sup>۸</sup>. Inverted

<sup>۹</sup>. Interleaved

بدون تقویت عایق ما بین حلقه ها داشته از دست می دهد. می توان نشان داد ظرفیت سری یک سیم پیچ را می توان بدون آنکه به ابعاد یا ولتاژ و جریان آن دست زد، چندین برابر افزایش داد. افزایش خیلی زیاد این ظرفیت باعث افزایش بیش از حد ولتاژ ما بین حلقه ها می شود، که لازم است عایق بندی بین حلقه ها عوض شود که این مساله هم باعث کاهش ظرفیت خازنی سری می شود که از لحاظ تکنیکی و هم از لحاظ اقتصادی مطلوب نیست. بنابراین مقدار بهینه این افزایش را باید با توجه به ابعاد و سایر مشخصات ترانسفورماتور بدست آورد. انواع مختلف سیم پیچی های درهم در اشکال (۸-۲)، (۹-۲) و (۱۰-۲) نشان داده شده است . در این نوع از سیم پیچی، اختلاف ولتاژ بین دورهای کنار هم بر حسب تعداد دیسکهایی که در آنها بهم پیچیدگی صورت می گیرد بوسیله مفهومی با نام درجه بهم پیچیدگی<sup>۱۰</sup> توصیف می شود [۲].



شکل(۸-۲): سیم پیچی درهم مزدوج<sup>۱۱</sup> [۲]

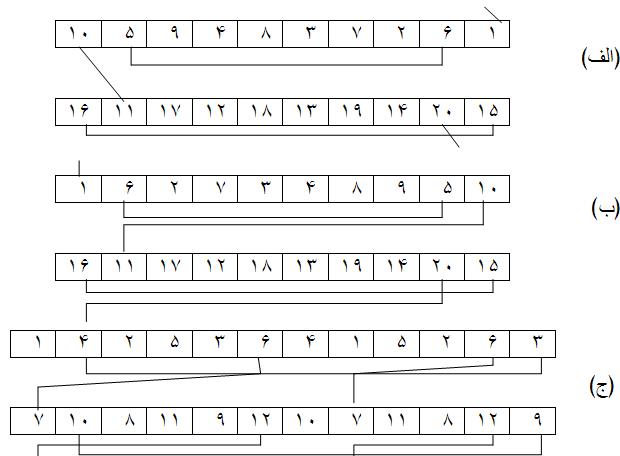


شکل(۹-۲): دو نوع متداول از سیم پیچی درهم دوقلو<sup>۱۲</sup> [۲]

<sup>۱</sup>. Self-Molding Degree

<sup>۲</sup>. Double

<sup>۳</sup>. Twin



شکل(۱۰-۲): سه نوع متداول از سیم پیچی درهم منفرد [۲]<sup>۱۳</sup>

### ۱-۳- مقدمه

به منظور منعکس کردن شواهد فیزیکی موجود در زمینه تخلیه جزئی در یک نمونه شبیه سازی شده، بررسی انواع تئوری های موجود در این زمینه ضروری بنظر می رسد. بنابراین در این فصل انواع تئوری های موجود در زمینه تخلیه جزئی، چگونگی پیوند خوردن این تئوریها با مسائل و مشکلات عملی، بررسی انواع روشهای تشخیص خطا بویژه تخلیه جزئی و همچنین مطالعه انواع روشهای مدارات آشکار ساز عملی و بررسی مزايا و معایب آنها به منظور انتخاب یک روش کارآمد و بهینه به منظور شبیه سازی دقیق آن در نرم افزار MATLAB، مورد توجه قرار می گیرند.

### ۲-۳- تئوری توصیفی تخلیه جزئی و سیستمهای الکتریکی [۳]

تخلیه جزئی به جرقه هایی که بصورت موضعی در عایق ایجاد شده و فقط محدود به یک قسمت از عایق می باشد، گفته می شود. در این فرایند، پل الکتریکی بطور کامل میان الکترودها بر قرار نمی شود.

---

<sup>۱۴</sup>. Single

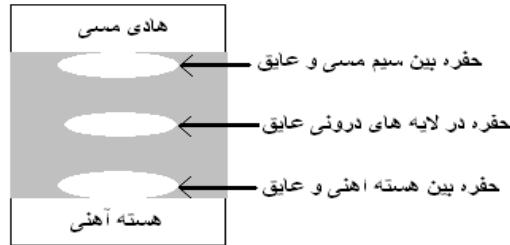
به طور کلی تئوری تخلیه جزئی شامل تحلیل خواص مواد، تحلیل میدانهای الکتریکی، بررسی رفتارهای آرک، انتشار پالس تخلیه و انحراف آن، حساسیت سنسورهای اندازه گیری، پاسخ فرکانسی سیگنالهای اندازه گیری شده، کالیبراسیون، نویززدایی، شناسایی الگوهای تخلیه، روشهای اندازه گیری، تمایز تخلیه از دیگر خطاهای درونی سیستم عایقی، تحلیل رفتاری تخلیه جزئی در شرایط مختلف و مکان یابی محل وقوع تخلیه می باشد.

مونیتورینگ تخلیه جزئی یکی از ابزارهای نگهدارنده مؤثر برای ترانسفورماتور، ژنراتورها و موتورها برای بالا بردن قابلیت اطمینان شبکه ای که این تجهیزات در آنها مشغول به کار هستند، می باشد. به این منظور درک تئوری تخلیه جزئی در رابطه با خرابی عایق، ما را در مونیتورینگ Online، مکانیابی خطأ و جلوگیری از خرابی تجهیزات کمک می کند. بنابر این در این پایانامه به منظور ارائه روشی برای مکانیابی تخلیه جزئی در ترانسفورماتور به روی تئوری آن متمرکز می شویم.  
تلashهای بسیاری برای بیان مفاهیم تخلیه پس از ساده سازیهای متعدد و آزمایشات فراوان صورت گرفته است. در اینجا به بیان چندین مفهوم اساسی می پردازیم.

الف- تخلیه جزئی می تواند بصورت پالس الکتریکی جریانی مدل شود.

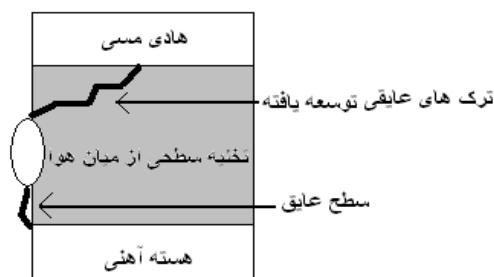
ب- پالسهای آزاد شده فرکانس های بالایی دارند، بنابراین سریعاً منحرف شده و از طریق زمین خارج می شوند. تخلیه ها آرک های کوتاهی هستند که در درون سیستم عایقی اتفاق می افتد، بنابراین باعث خرابی عایق ها بصورت موضعی و خرابی کامل عایق و شکست آن در طول زمان می شوند.

ج- تخلیه ها در حفره های گازی موجود در روغن، و یا سطوح عایقهای جامد و مایع و یا حفره های موجود در عایق جامد اتفاق می افتد. حفره ها عموماً بین عایق سیم پیچ مسی و بدنه و یا هسته قرار دارند. این حفره ها عموماً بین سیم مسی و دیواره های درونی عایق جامد، و یا دیواره خارجی عایق و روغن و یا دیواره خارجی روغن و بدنه و یا در طول سطوح بیرونی عایق واقع شده اند. این مکانهای احتمالی در سیستم عایقی در شکل (۳-۱) نشان داده شده اند.



شکل (۳-۱): مکانهای احتمالی وجود حفره ها در سیستم عایقی [۳]

د- تخلیه ها باعث ترکهای عایقی می شوند. ترکهای موجود درون عایق به همراه شکافها و مسیرهای آلوده در سطح عایق باعث ایجاد پل بین ولتاژ فشار قوی و زمین می شوند(شکل ۲-۳).

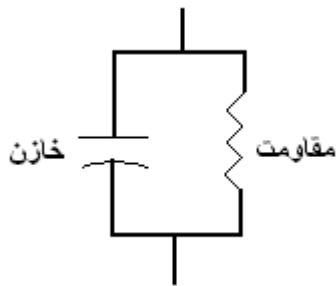


شکل (۲-۳): شکافها و مسیرهای آلوده در عایق [۳]

### ۱-۲-۳- مدل سیستم عایقی و حفره تخلیه با توجه به شرایط فیزیکی حاکم

یک مدل ساده از یک سیستم عایقی بوسیله یک مقاومت و خازن موازی قابل نمایش است [۴]. این مدل برای آزمایش ضربی قدرت یک سیستم عایقی مورد استفاده قرار می گیرد. در این مدل جریان نشتی بین مسیرهای مقاومتی و خازنی تقسیم می شود لذا ضربی قدرتی شامل کسینوس زاویه بین تمامی جریانهای نشتی خازنی و مقاومتی، قابل تعریف است [۵-۶].

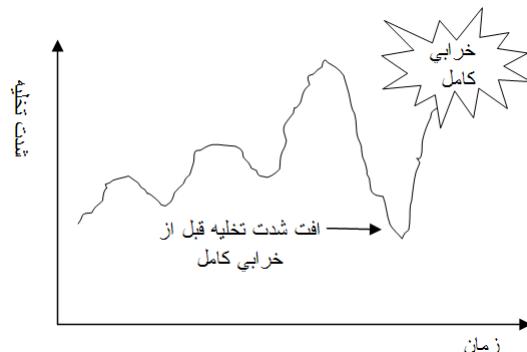
خازن یک مدل بسیار ساده از حفره موجود درون عایق است [۷]. تخلیه ها با افزایش دامنه ولتاژ اعمالی بر عایق شروع شده و سپس با یک اتصال کوتاه از طریق یک مقاومت کوچک در درون حفره خاموش می شوند، بنابراین با قرار دادن یک مقاومت موازی با خازن، به مدلی واقعی تر می رسیم. این مقاومت شامل عناصر و ترکیبات ارگانیک و کربونیزه شده است. بنابراین مدل منبع تخلیه مشابه مدل یک سیستم عایقی است(شکل ۳-۳).



شکل (۳-۳): مدل ساده منبع تخلیه

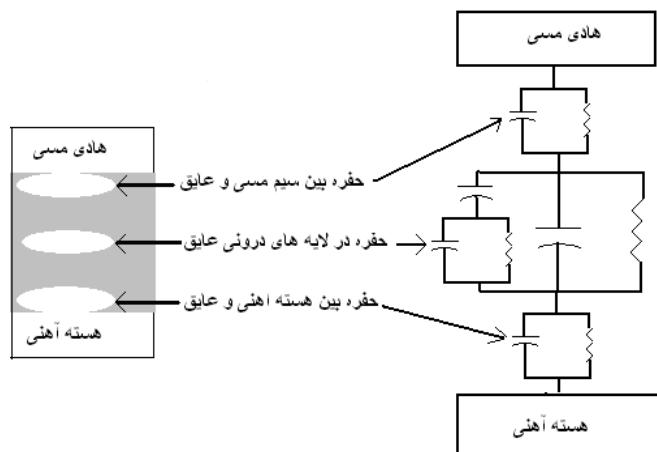
خرابیهای پی در پی عایقی افتی در شدت و چگالی تخلیه ها در طول پریودهای کوچک در طول زمان تا خرابی کامل را نشان می دهند و این در برهمه ای از زمان اتفاق می افتد که درون عایق مقاومتهایی که از کربونیزه شدن عایق بوجود می آیند آنقدر کوچک هستند که از ساخته شدن ولتاژ در دو سر حفره جلوگیری می کنند. اما همین مقاومتهای کوچک باعث عبور جریان زیاد از درون حفره و در نتیجه گرم شدن موضعی و در نهایت خرابی عایق می شوند. پس می توان گفت مدل ایده آل حفره بعلاوه مقاومتی که نشاندهنده افزایش جریان نشتی در مدهای خرابی متوالی در سیستم عایقی است، می تواند یک مدل دینامیک از مدل منبع تخلیه را نشان می دهد. این مدل دینامیک نمایانگر ساختار درختی پدیده تخلیه است. یک شکل واقعی از این مؤلفه های مقاومتی، ترکهایی است که در سطح عایق آشکار می شود. رابطه بین تخلیه های سطحی و ترکهای عایقی بدین صورت است که خرابی عایقی بوسیله افزایش محلی شدت دمایی که بوسیله جریانهای نشتی ایجاد می شود، رشد می کند. این جریانهای نشتی از طریق هر شکافی که تجمع رطوبت در آنجا وجود داشته باشد جاری می شود. همانطور که این شکاف عایقی پیوسته و پهن می شود، گرمای تولید شده بوسیله جریان نشتی در سراسر یک ناحیه پهن پخش می گردد. گرما باعث بخار شدن نواحی کوچک ناخالص موجود در عایق می شود و هر کدام از آنها را به جزیره ها و استخرهایی از مواد کربونیزه شده تبدیل می کند. هر شکست در هر جزیره که با آرک های کوچک همراه است، یک بخش از جریان نشتی را قطع می کند. اغلب تصور می شود که این آرک های کوچک بی تاثیر هستند، ولی همین آرک ها و گرمایی تولید موضعی باعث شکست ملکولی و شیمیایی در لایه های درونی عایق می شوند. ماده ارگانیک تولید شده از آرک ها کربن می باشد. این آرک های کوچک در طول سطح عایق به عنوان تخلیه های جزئی

سطحی شناخته می شوند. بنابراین می توان نتیجه گرفت خرابی عایق تابعی از فعالیت تخلیه جزئی است(شکل (۴-۳)).



شکل (۴-۳): خرابی عایق وابسته به فعالیت تخلیه جزئی [۳]

با قرار دادن مدل ساده منبع تخلیه در یک سیستم عایقی می توانیم به توصیف کامل استاتیکی یک سیستم عایقی خطدار شده بوسیله تخلیه بپردازیم. این موضوع در شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



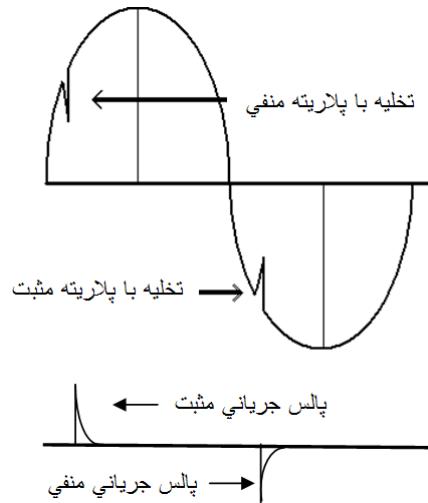
شکل (۳-۵): توسعه مدل منبع تخلیه برای مدل کامل از سیستم عایقی تخلیه [۳]

## ۲-۲-۳- رابطه تخلیه جزئی با ولتاژ و مکان حفره

اولین نکته وابسته به سیکل فرکانس قدرت می باشد که بر اساس آن تخلیه ها عموما در نیم سیکل اول و سوم اتفاق می افتد. در طول نیم سیکل اول تمامی مؤلفه های خازنی تا اینکه ولتاژ حفره به مقدار لازم برای شکست برسند، شارژ می شوند و سپس تخلیه ها با یک افت ولتاژ منفی اتفاق می افتد. در این نیم سیکل بارهای آزاد شده از حفره پلاریته مثبت دارند. در نیم سیکل دوم ولتاژ کاهش می یابد بنابر این ولتاژ مثبت دو سر هر حفره و بارهای خازنی کم می شوند. ولی برخی بارهای خازنی در مقدار قبلی باقی می مانند چون بارهای خازنی نمی توانند بصورت لحظه ای برگردند. در طول نیم سیکل سوم یک بار مثبت باعث وقوع تخلیه می شود. در این نیم سیکل بار مثبت، تخلیه می شود و باعث پالسهای جریانی منفی تولید می شود. در این نیم سیکل و قوع تخلیه با یک افت ولتاژ مثبت همراه است.

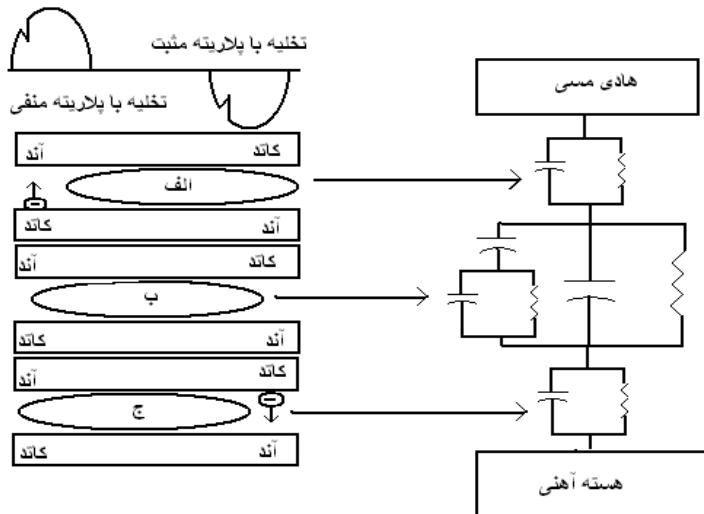
دومین نکته این است که تخلیه ها تابع پلاریته و دامنه ولتاژ اعمالی هستند. بدین صورت که تخلیه ها با پلاریته معکوس نسبت به پلاریته ولتاژ اعمالی پدیدار می شوند این واقعیت در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. پالس های تخلیه فرکانسهای بالایی دارند و افت ولتاژ ناشی از آنها در حدود چند ولت می باشند که بوسیله اسیلوسکوپ های معمولی قابل نمایش نیستند.

در طول نیم سیکل اول و سوم به ترتیب یک پالس جریان مثبت و منفی از طریق حفره تخلیه آزاد می شود. برای مطالعه سیگنالهای تخلیه در یک سیکل قدرت، یک سیکل به چهار قسمت تقسیم می شود و تخلیه ها در قسمت اول و سوم با هم مقایسه می شوند تفاوت دامنه تخلیه ها در قسمت اول و سوم به مسیرهای مربوط به جریان نشتی و مکان منبع تخلیه وابسته می باشد. دامنه و نرخ تکرار پالس های تخلیه ها نشان دهنده توسعه و شدت خرابی است. این دو کمیت نقش بسیار مهمی در تعیین وضعیت عایقی دارند. دامنه های جریانی تخلیه اغلب بوسیله واحد پیکو کلمب، سنجیده می شوند.



شکل(۳-۶): تاثیر تخلیه جزئی در یک سیستم عایقی در ولتاژ سینوسی با فرکانس قدرت[۳]

نکته سوم با مقایسه پالسهای جریانی قدرتمند مثبت و پالسهای جریانی قدرتمند منفی که در طول نیم سیکل اول و سوم از سیکل قدرت اتفاق می افتد، قابل بیان است. اگر دامنه تخلیه های با پلاریته منفی از دامنه تخلیه های با پلاریته مثبت بیشتر باشد، آنگاه حفره ها و مسیر های معیوب احتمالی نزدیک به هسته یا بدنه هستند و اگر این روند بالعکس باشد آنگاه حفره ها نزدیک به سیم مسی واقع شده اند. این نتیجه جالب به ولتاژ اعمالی به حفره، هندسه حفره و مواد اطراف حفره که نقش آند و کاتد را بازی می کنند وابسته است. ماده بحرانی در این فرایند کاتد است، کاتد الکترونهای آزاد را برای ادامه یافتن تخلیه، آزاد می کند. چگونگی نقش آندی و کاتدی عایق، دیواره حفره، مس، بدنه و هسته در یک سیکل قدرت در شکل(۳-۷) نشان داده شده است.



شکل(۷-۳): آرایش کاتدی و آندی دیواره های عایقی برای مطالعه تخلیه جزئی [۳]

همانطور که در شکل (۷-۳) نشان داده شده است، وابسته به مکان حفره و ولتاژ سینوسی اعمالی مواد مختلفی نقش آند و کاتد را در نیم سیکل اول و سوم بر عهده می گیرند.

موادی که نقش کاتدی را بر عهده می گیرند اهمیت زیادی دارد، چون آنها الکترونها را برای ادامه تخلیه آزاد می کنند. وقتی عایق کاتد می شود و تخلیه در سطح عایق اتفاق می افتد رفتار عایق مانند پلاسما می شود. پلاسما یک منبع بسیار غنی از الکترونهاست آزاد برای تغذیه تخلیه است. سطح تخلیه با رشد سطح پلاسما گسترش می یابد و نتیجه این است که وقتی عایق نقش کاتدی دارد تخلیه های بزرگتری اتفاق می افتد. بنابراین اگر حفره نزدیک سیم مسی بود، آنگاه افت ولتاژ منفی نسبتاً بزرگتر از افت ولتاژ مثبت است. اگر حفره نزدیک آهن یا بدنه باشد، آنگاه افت ولتاژ مثبت نسبتاً بزرگتر از ولتاژ منفی است، اگر حفره در لایه های درونی عایق باشد، تخلیه ها با پلاریته مثبت و منفی عموماً دامنه و نرخ تکرار یکسانی دارند چون آند و کاتد تنها همان عایق است. مفاهیم ساده شده بالا در شناسایی طبیعت تخلیه و مکان یابی آن نقش به سزاوی دارند.

بررسی رفتار تخلیه در عایقهای جامد آغاز شده به روغن در ترانسفورماتور نشان می دهد که مهمترین عامل بروز تخلیه، پیری عایقی و تجمع رطوبت درون عایق است. در این میان افزایش دمای غیر معمول به عنوان مهمترین عامل پیری عایقهای الکتریکی شناخته شده است ولی بدليل اینکه افزایش آن در یک زمان مشخص از عمر عایق باعث کاهش رطوبت در عایق می شود پس می توان گفت در شدت تخلیه نقشی ندارد و عموماً باعث کاهش نرخ تکرار و شدت تخلیه می شود [۸].

### ۳-۲-۳- رابطه تخلیه الکتریکی جزئی با شکل حفره

تخلیه جزئی در انواع عایق‌های جامد، مایع و گاز بصورت تصادفی اتفاق می‌افتد که می‌توان آنها را به روش‌های مختلف دسته بندی نمود. بدین منظور مسائلی همچون شکل الکترودهای اطراف حفره و جنس حفره بسیار حائز اهمیت هستند.

انواع تخلیه الکتریکی با توجه به محل ایجاد آنها و شکل الکترودهای اطراف حفره به چهار دسته کلی زیر تقسیم بندی می‌شوند.

الف- تخلیه در خلل تخت و مسطح در سطوح داخلی محصور شده توسط عایق (آزاد سازی پالسهای متعدد در یک نقطه مشخص از زمان از ویژگیهای بارز این شکل از حفره است)

ب- تخلیه در حبابهای کروی<sup>۱۴</sup> شکل محصور شده در عایق (آزاد سازی پالسهای منفرد جریانی در یک زمان مشخص از ویژگیهای بارز این شکل از حفره می‌باشد)

ج- تخلیه کرونا<sup>۱۵</sup> که مربوط به یونیزه شدن موضعی گازها در اثر میدان غیریکنواخت بوده و بصورت جرقه ریزی پدیدار می‌شود.

د- تخلیه سطحی<sup>۱۶</sup> در سطوح خارجی و یا داخلی همچوar هادی (از ویژگیهای بارز این حفره آزادسازی دامنه جریانی نسبتاً بزرگتر تخلیه نسبت به سایر حفره‌ها است)

### ۳-۳- بررسی انواع روش‌های تشخیص خطأ در ترانسفورماتور

عملکرد با قابلیت اطمینان بالا، همیشه از نگرانیهای مهندسان صنعت برق بوده است. برنامه‌های توصیفی متعددی برای نگهداری تجهیزات الکتریکی در حداکثر ظرفیت کاری بوسیله مؤسسات علمی

- 
- ۱. Bubble
  - ۲. Corona
  - ۳. Surface

تدوین شده است [۹]. استاندارد IEEE P1434 و ERPI بیان می کند که عموماً ۳۰٪ از خطاهای درونی ترانسفورماتورها خطای الکتریکی می باشند بنابراین قبل از راه اندازی ترانسفورماتور استانداردهای BS و IEC TSS و آزمایشهای مختلفی را در سه گروه پیشنهاد کرده اند. در این مبحث به کلاسه بندی انواع آزمایشهایی که بر روی ترانسفورماتور که به منظور کنترل کیفیت و یا شناسایی خطاهای بوجود توسط تولید کننده، مصرف کننده و یا تعمیر کار انجام می شود می پردازیم [۱۰، ۱۱ و ۱۲]. این آزمایشهایی در سه گروه طبقه بندی می شوند.

الف- آزمایشهای مرسوم<sup>۱۷</sup>

ب- آزمایشهای نوعی<sup>۱۸</sup>

ج- آزمایشهای ویژه<sup>۱۹</sup>

آزمایشهای مرسوم بر روی تمامی ترانسفورماتورها اعمال می شوند ولی آزمایشهای نوعی و ویژه وابسته به نوع، سطح ولتاژ و ظرفیت ترانسفورماتور، قابل انجام است. آزمایشهای مرسوم، نوعی و ویژه هر کدام در چندین گروه طبقه بندی می شوند. این طبقه بندیها ، به صورت زیر می باشد شکل (۳-۸).

الف- آزمایشهای مرسوم:

۱- آزمایش دی الکتریک

۲- آزمایشهای پارامتریک

ب- آزمایشهای نوعی:

۱- آزمایش افزایش دما

۲- آزمایش ضربه

ج- آزمایش های ویژه:

۱- آزمایش اتصال کوتاه

۲- آزمایش نامتعادلی جریان

---

۱. Routine

۲. Type

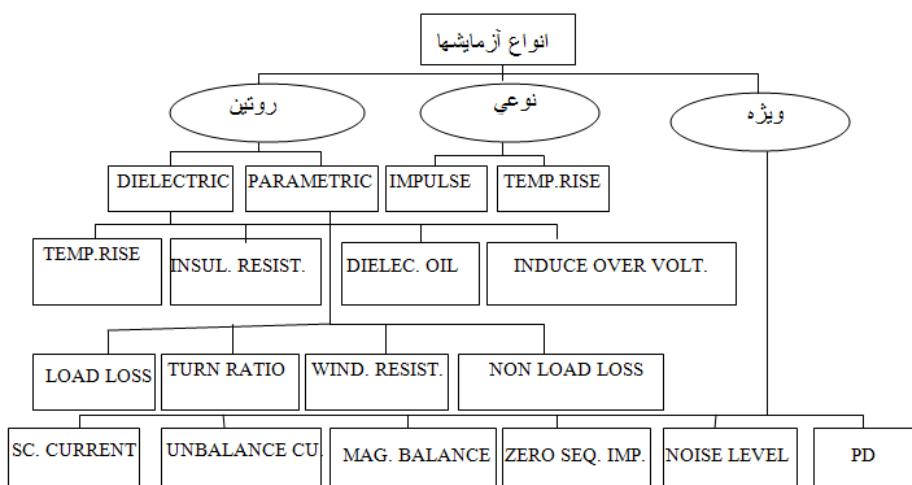
۳. Special

۳- آزمایش تعادل مغناطیسی

۴- آزمایش امپدانس مؤلفه صفر

۵- آزمایش سطح نویز

۶- آزمایش تخلیه جزئی



شکل (۸-۳): کلاسه بندی انواع آزمایشها [۱۱]

با ملاحظه آزمایش‌های نامبرده شده می‌توان گفت آزمایش‌های دی الکتریک، ضربه و تخلیه جزئی معیارهایی را برای وضعیت سیستم عایقی ارائه می‌دهند. در این میان رایج‌ترین روش برای تشخیص سلامت سیم پیچی آزمایش ضربه است. این آزمایش قابلیت تشخیص توزیع نامناسب ولتاژ در طول سیم پیچی، نقاط ضعیف عایقی و همچنین ارائه نتایجی برای کلاسه بندی خط‌را دارد.

#### ۴-۳- تشخیص خط‌های دائمی و گذرا با استفاده از آزمایش ضربه

آزمایش‌های دی الکتریک و آزمایش ضربه که از آزمایش‌های روتین و نوعی هستند، معیارهای مناسبی را برای تعیین وضعیت سیم پیچی و عایقی ترانسفورماتور ارائه می‌دهند. اهمیت این آزمایشها از آنجا آشکار می‌شود که توزیع نامناسب و غیر معمول ولتاژ در طول سیم پیچی، همچنین نقاط ضعیف و یا معیوب عایقی آشکار می‌شوند. شکل موج ولتاژ اعمالی در آزمایش ضربه در استاندارد تدوین شده است [۱۳ و ۱۴]. در این آزمایش یکی از ترمینال‌های ترانسفورماتور زمین شده و بعد از آن

ولتاژ کامل و کاهش یافته ضربه به ترمینال دیگر اعمال ، و جریانها در هر دو حالت از سیم زمین اندازه گیری می شود. نهایت بوسیله تحلیل این جریانها به بررسی وضعیت درونی ترانسفورماتور پرداخته می شود؛ زیرا دامنه و شکل موج جریان زمین تابعی از ولتاژ ضربه و ساختار سیم پیچی است. در تحقیقات گذشته گزارش شده که شکل این جریان خرابی های دی الکتریکی و عایقی در سیم پیچی و ولتاژ ضربه اعمالی را دنبال می کند [۱۵]. اختلاف در این شکل موجهها وابسته نوع خط و سیم پیچی است، برای مثال تخلیه های سطحی در سیم پیچی با نوسانات کم دامنه و فرکانس بالایی که بر روی شکل موج جریان سوار می شود همراه است [۱۶]، زمانی که خطای اتصال به زمین در سیم پیچی اتفاق می افتد دامنه این شدیداً افت می کند، خطای در لایه های درونی عایقی با کم کردن امپدانس سعی در افزایش این جریان را دارد و اگر خطای تنها محدود به دورهای مشخصی از سیم پیچی باشد در بعضی مواقع افزایش اندوکیتوی جریان آشکار نخواهد شد، اما تغییر در ردپای جریان نوع خط را آشکار می سازد [۱۵]. مشکل اساسی در این آزمایش حفره های گذرا و اغلب کوچک تخلیه جزئی هستند، حتی تخلیه های جزئی پرقدرت هم اختلاف قابل ملاحظه ای در شکل موج جریان بوجود نمی آورند. این در حالی است که ترانسفورماتور به هیچ وجه در هنگام آزمایش ضربه از تخلیه آزاد نمی باشد [۱۷]. این اختلاف های بسیار کوچک در شکل موجهها همیشه باعث جدال بین سازندگان و خریداران بوده است. برای جلوگیری از این مشکل و صرفه جویی در زمان و هزینه این آزمایش باید به نحو موثر تری انجام شود.

امروزه ثباتهای مدرن و تحلیلگرهای با رزولوشن زمانی بالا امکانات مفید و موثری را در اختیار ما قرار داده اند. مقادیر اندازه گیری شده پس از ثبت و مرتب سازی برای مطالعات تکمیلی به کامپیوتر فرستاده می شود. در این میان روش‌های موثری برای کلاسه بندی و تشخیص خطای تدوین شده اند که بصورت نمونه ای می توان به روش تابع تبدیل اشاره نمود [۱۸و۱۹]. در این روش تمامی خطاهای درونی که در رفتار سیم پیچی تاثیر می گذارند آشکار می شود. مشکل عمده در این روش در هنگام سوار شدن نویز بر روی سیگنال اندازه گیری شده رخ می دهد، که استفاده از تبدیل ویولت گسسته<sup>۲۰</sup>

---

<sup>۱</sup>. Discrete Wavelet Transform

و خاصیت نویز زدایی آن برای حل این معضل پیشنهاد شده است. نتایج نشان می دهد که روش تابع تبدیل به شکل موجهای نویز زدایی شده حساسیت بالاتری دارد.

همچنین استفاده از تکنیک ویولت برای تشخیص خطای درونی ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰، ۲۱ و ۲۲]. نتایج نشان می دهنند که الگوهای غیر ایستای ذاتی شکل موج جریان در شرایط خطای مختلف با استفاده از این تکنیک به طور موثری قابل کلاسه بندی هستند [۲۳]. در لابرаторهای فشار قوی، تشخیص خطاهای عموماً بر اساس تجربه است، که نشان داده شده این تجربیات قابلیت آموزش یک سیستم هوشمند را دارا هستند [۲۴].

همچنین از شبکه های عصبی مصنوعی برای کلاسه بندی خطاهای در هنگام آزمایش ضربه بر روی سیم پیچی ترانسفورماتور استفاده شده است [۲۵]. متاسفانه در سیستمهای هوشمند، و روشهای هوشمندی که بر پایه مشخصه های تبدیل یافته<sup>۱</sup> استوار شده اند، برای دانستن چگونگی نزدیک شدن از یک الگوی داده شده به برخی الگوهای شناخته شده احتیاجی به دانش متخصصان و همچنین قوانین پایه ای تمایز<sup>۲</sup> برای تمایز طبیعت و مکان خطا نمی باشد [۲۶]. همچنین استفاده از روش مدل مرجع<sup>۳</sup> برای تمایز تخلیه جزئی و شکست پیشنهاد شده است [۱۶ و ۲۶].

شاید به قطعیت بتوان گفت که تخلیه جزئی مهمترین خطاهای درونی ترانسفورماتور های قدرت می باشد. محققان بسیاری آنرا غده سرطانی ترانسفورماتور نامیده اند که اگر در مراحل اولیه تشخیص و درمان نشود به بروز آسیبهای جدی در سیستم عایقی مانند شکست الکتریکی منجر می شود. آزمایشهای دی الکتریک و ضربه تنها سالم و یا ناسالم بودن وضعیت ترانسفورماتور را تعیین می کنند و هیچگونه مشخصه ای را برای شرایط اولیه وجود خطا در سیستم عایقی ترانسفورماتو ارائه نمی دهند. بنابراین پیشنهاد شده است که آزمایش تخلیه جزئی هم در مرحله کنترل کیفیت و هم بهره برداری برای آشکار سازی شرایط اولیه خطا به منظور انجام اقدامات پیشگیرانه و یا پشتیبانی، انجام گردد.

---

۱. Neutral Network- Based Feature Mapping

۲. Explicit Rule Base

۳. Refrence Model

## ۳-۵- بررسی انواع روش‌های اندازه گیری و تشخیص تخلیه جزئی در ترانسفورماتورهای قدرت

با گذشت زمان عایق های ترانسفورماتور قدرت در اثر تنشهای الکتریکی، مکانیکی و حرارتی وارد، دچار پیری می شوند. بدلیل اینکه فرایند شکست عایقی نتیجه ای از فعالیت پی درپی تخلیه الکتریکی جزئی است، بنابراین تشخیص تخلیه الکتریکی جزئی ضروری به نظر می رسد. در طول چهل سال گذشته چندین روش برای اندازه گیری و تشخیص تخلیه جزئی ترانسفورماتورهای قدرت گسترش یافته است. به طور کلی این روشها را می توان در چهار دسته شیمیایی، الکتریکی، صوت و نوری طبقه بندی کرد. به علت خاصیت غیرشفاف بودن روغن معدنی، روش نوری به صورت گسترده ای در سیستمهای امروزی کاربرد ندارد. سه روش دیگر در این قسمت مورد بررسی قرار خواهد گرفت [۲۷ و ۲۸].

### ۳-۵-۱- روش شیمیایی [۲۹ و ۳۰]

در اثر بروز تخلیه الکتریکی جزئی در داخل حفره های عایقی، مواد درون و جداره حفره تجزیه شده و درون روغن پخش می شود، پس می توان با آنالیز شیمیایی مواد درون روغن به وجود تخلیه پی برد. دو روش DGA و HPLC از جمله آزمایش‌هایی هستند که برای شناخت این مواد به کار می روند. با استفاده از DGA می توان به نوع و مقدار گازهای حاصله از تجزیه موادی که در اثر تخلیه جزئی بوجود می آید، پی برد. این آزمایش حضور تخلیه جزئی را نشان می دهد و با کمک آن می توان نوع تخلیه جزئی را مشخص کرد، چرا که وجود هر گاز نشانگر تخلیه خاصی می باشد. اما تاکنون استاندارد خاصی برای تعریف سطوح گازی استخراج شدن بیان نشده است و به رغم پیشرفت‌های به عمل آمده، روش شیمیایی هنوز قادر به تعیین مکان، طبیعت، شدت و مکان تخلیه جزئی نمی باشد. البته برخی متخصصان معتقدند که بررسی نرخ رشد این گازها اطلاعات مفیدتری را نسبت به اندازه گیری مقدار این گازها در یک زمان مشخص آشکار می کند.

استاندارد IEC ۶۰۵۹۹ لیستی از خطاهای قابل آشکارسازی بوسیله روش DGA را به ترتیب زیر کد-بندی کرده است.

۱- تخلیه های جزئی تخلیه با انرژی کم (D1)

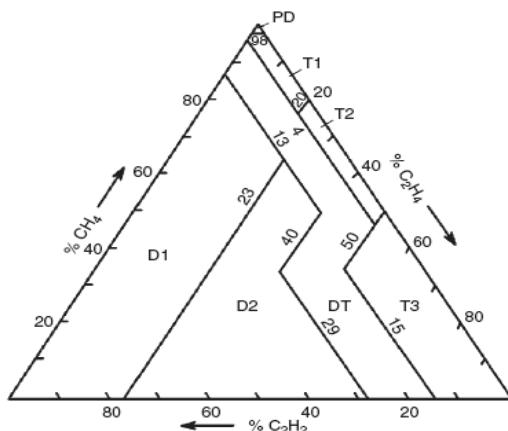
۲- تخلیه های با انرژی زیاد (D2)

۳- خطاهای دمایی (T1)، برای دماهای کمتر از  $300^{\circ}$  سانتی گراد

۴- خطاهای دمایی (T2)،  $300^{\circ} < T < 700^{\circ}$

۵- خطاهای دمایی (T3)،  $T \geq 700^{\circ}$

خطاهایی که به وسیله تحلیل گازهای نامحلول در روغن قابل آشکارسازی هستند در یک مثلث به شکل (۹-۳) قابل طبقه بندی هستند.



[۳۰]DGA روش (۹-۳)

روش HPLC نیز دارای مشکلات خود می باشد چرا که مقدار زیادی از گلوکز ایجاد شده در اثر تجزیه دیواره های عایق جامد در روغن معدنی حل نمی شود و همچنین شکلهای پیر شده گلوکز پایدار نمی باشد. همچنین این آزمایش نیز همانند آزمایش DGA دارای مشکل عدم قطعیت و عدم وجود استاندارد مشخص است.

به طور کلی معایب این روش را می توان به صورت خلاصه چنین بیان کرد :

الف - این روش مکان وقوع PD را دقیقاً مشخص نمی کند.

ب - آزمایشهای شیمیابی بویژه تحلیل ترکیبات فورانی را نمی توان به صورت Online انجام داد.

ج - عدم قطعیت و عدم وجود استاندارد مشخص

### ۳-۵-۲- روش صوتی [۳۱ و ۳۲]

وقتی پالس جریانی در داخل حفره ایجاد می شود گرمای موضعی زیادی تولید می گردد که باعث تبخیر مواد اطراف خود می شود این تبخیر باعث ایجاد یک نیروی مکانیکی شده که از طریق تانک ترانسفورماتور منتشر می شود که این فرایند با تولید موج صوتی همراه است. در این روش همانند روش الکتریکی به پردازش سیگنال ایجاد شده از پدیده تخلیه جزئی پرداخته می شود، البته با این تفاوت که این سیگنال یک سیگنال صوتی غیر خطی است.

روش اندازه گیری توسط صوت به دو صورت انجام می شود:

الف - سیستمهای خارجی

ب - سیستمهای داخلی

در سیستمهای خارجی که بیشتر در صنایع برق استفاده می شود، سنسورهایی را در بیرون تانک ترانسفورماتور برای اندازه گیری سیگنالهای صوتی تعییه می کنند، اما در سیستمهای داخلی با به کار بردن سنسورهای در درون تانک ترانسفورماتور مستقیماً به اندازه گیری موج فشاری در داخل روغن معدنی می پردازند.

مزایا و قابلیتهای روش صوتی:

- ۱- مشخص کردن محل دقیق تخلیه و ساده بودن الگویابی
- ۲- حداقل شدن مزاحمتاهای الکترومغناطیسی بدلیل پایین بودن فرکانس صوتی ایجاد شده در اثر تنشهای مکانیکی نسبت به فرکانس PD.

مشکلات و معایب روش صوتی:

- ۱- پیچیدگی پدیده انتشار موج در ترانسفورماتورها
- ۲- نیاز مندی به سنسورهای دقیق به دلیل شدت کم امواج صوتی

### ۳-۵-۳- روش الکتریکی [۳۳، ۳۴، ۳۵ و ۳۶]

روش الکتریکی بر مبنای اخذ پالسهای الکتریکی تولید شده از حفره ها است. این روش بسیار متداول و گسترده است که توسط کمیته IEC، استاندارد ویژه ای درباره آن منتشر شده است. مکانیابی تخلیه جزئی با استفاده از روش الکتریکی با به کارگیری ترانسdiyosرهای جریان که در اطراف ترمینالهای اندازه گیری متصل اند ممکن می شود. فاز و دامنه ای که تخلیه در آن رخ می دهد حاوی اطلاعاتی پیرامون نوع و مکان نقص عایقی می باشد. همچنین شکل موج های جریانی تخلیه حاوی اطلاعاتی پیرامون فیزیک تخلیه و مکان حفره است.

### ۳-۶- روشهای اندازه گیری الکتریکی

#### الف- روش tip-up

این روش بر اساس اندازه گیری ضریب تلفات در دو سطح ولتاژ جداگانه و مقایسه بین آنها می باشد.

#### ب- روش تحلیل تک پالس تخلیه<sup>۲۴</sup>

در این روش از سلف ها و خازنهای کوپلاژ که به طور مستقیم به پایانه ترانسفورماتور قدرت وصل می شود، برای اندازه گیری استفاده می شود. این روش دقیقترین و کاراترین روش موجود جهت اندازه گیری اطلاعاتی برای مکان یابی تخلیه جزئی است.

#### ج- روش تحلیل تلفات دی الکتریک

در این روش از تلفات توان در سیستم عایقی به عنوان تابعی از ولتاژ در یک سیکل بررسی می شود.

#### د- روش ترانسفورماتوری

این روش بر اساس اخذ جریانهای ضربه<sup>۱</sup> که به هنگام تخلیه آزاد می شود استوار است.

#### ۵- روش پروب های القایی

۱. Direct Probing

۲. Impulse Current

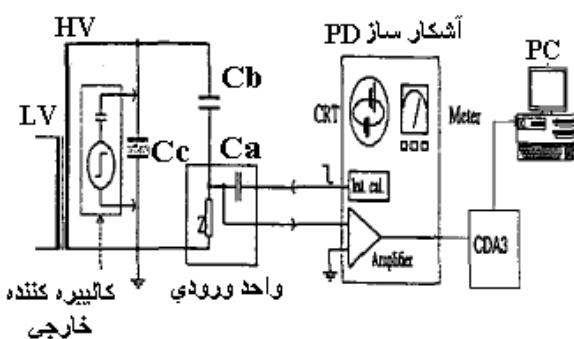
در این روش از سنسورها و پروبهای القایی که بروی تانک ترانس نصب می شود جهت مکانیابی تخلیه استفاده می شود.

بطور کلی محدودیتهای روش الکتریکی عبارتنداز :

۱- نسبت به نویز حساس است، به طوری که تشخیص و جداسازی پالس PD را از نویز مشکل می کند.

۲- مشخصات پالس تخلیه دریافتی به شدت به شکل هندسی ترانسفورماتور فشار قوی، ابعاد حفره و مدار اندازه گیری وابسته است. با وجود این محدودیتها، آزمایش Offline تخلیه الکتریکی جزئی کاربرد فراوانی دارد.

همانطور که گفته شد دقیقترین و کاراترین روش در بین روش‌های الکتریکی استفاده از روش اندازه گیری تک پالس تخلیه می باشد. اندازه گیری از طریق ترمینالهای بوشینگ و نول بوسیله یک خازن جابجا کننده بار  $C_b$  از مهمترین خصوصیات این مدار می باشد که به سادگی و با دقت بالا قابل شبیه سازی است. بدلیل حذف مدارات ارتباطی، حذف پاسخ فرکانسی آشکار ساز PD و عدم نیاز به مدار تشدید کننده در نمونه شبیه سازی شده این مدار ، در این پایانامه از ساختار و اصول این روش برای شبیه سازی مدار اندازه گیری استفاده می شود. در شکل (۱۰-۳) مدار اندازه گیری عملی این نوع نشان داده شده است.



شکل(۱۰-۳): روش اندازه گیری تک پالس تخلیه [۲۷]

### ۳-۶-۱- مشکلات و چگونگی آماده سازی مدار اندازه گیری تک پالس

#### تخلیه

#### ۳-۶-۱-۱- نویز و روش‌های کاهش آن

هر نوع سیگنال الکتریکی نامطلوب در مدارهای الکتریکی را نویز می‌گویند. استثناء این تعریف در اعوجاج است، که ناشی از غیرخطی بودن مدار است. در واقع اعوجاج مسئله طراحی بوده و مسئله نویز مدار نیست. اگرچه این اعوجاجها ممکن است نامطلوب باشند، ولی تا وقتی که به قسمتهای دیگر مدار کوپله نشوند به عنوان نویز در نظر گرفته نمی‌شوند. از تعریف نویز می‌توان نتیجه گرفت که حتی اگر سیگنال مطلوب بطور غیر عمدی به قسمت دیگری از مدار کوپله شود، نویز به حساب خواهد آمد [۳۷].

منابع نویز را به سه گروه می‌توان تقسیم بندی کرد:

الف- منابع نویز ذاتی که در اثر تغییرات تصادفی در سیستم‌های فیزیکی به وجود می‌آیند. به عنوان مثال نویز حرارتی و شات نویز جزء این گروه هستند.

ب- نویزهای ساخت دست بشر مثل نویز ناشی از موتورها، سوئیچها و غیره.

ج- نویز ناشی از اغتشاشات طبیعی مثل رعد و برق و تشعشعات خورشیدی.

وجود نویز باعث بروز مشکلاتی در اندازه گیری تخلیه جزئی می‌شود. بنابراین استخراج دقیق تخلیه جزئی، کاهش مؤثر نویز امری ضروری است. فیلتر کردن و جداسازی نویزها کاری مشکل است زیرا پالس‌های آن از لحاظ زمان و حوزه فرکانس خیلی شبیه پالس PD است. در اینجا روش‌های معمول جهت کاهش نویز ارائه می‌گردد.

(الف) پهنانی باند سیستم

یک روش ساده و مهم برای به حداقل رساندن نویز در یک سیستم الکتریکی محدود کردن پهنانی باند سیستم در محدوده مورد نیاز سیگنال آن سیستم می‌باشد. بیشتر شدن پهنانی باند سیستم از مقدار مورد نیاز سیگنال موجب می‌شود که نویز بیشتری وارد مدار شود [۳۸].

(ب) شیلد کردن

شیلد کردن یکی از راه های اصلی به حداقل رساندن تأثیر نویز می باشد. در صورت استفاده صحیح از شیلد کردن اثر نویزها به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. شیلدها اطراف المانها، مدارات، کابلها و سیمهای ارتباطی مورد استفاده قرار می گیرند.

### ج) زمین کردن

زمین کردن صحیح یکی از راه های مقدماتی برای کم کردن نویزها و ولتاژهای القایی ناخواسته می باشد. با استفاده صحیح از ترکیب زمین و شیلد کردن درصد بزرگی از مشکل نویز برطرف می شود. بررسی ها نشان می دهند که در فرکانسهای پایین استفاده از سیستم زمین یک نقطه ای و در فرکانسهای بالا از سیستم چند نقطه ای بسیار موثر است.

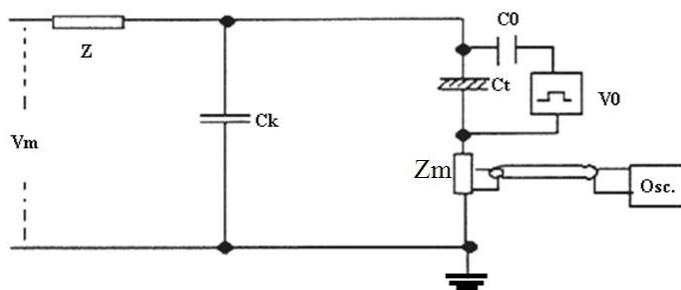
## ۳-۱-۶- کالیبره کردن [۳۹]

کالیبره کردن به منظور اندازه گیری مقدار صحیح بار آزاد شده از حفره (بار آشکار) انجام می شود. مدارها و تجهیزات اندازه گیری معمولاً توسط سازندگان کالیبره می شود ولی بعد از هر تعمیر اساسی کالیبره کردن دوباره ضروری است. کالیبره کردن بعد از گذشت مدت زمانی طولانی نیز لازم است. تجهیزات کالیبره کننده، معمولاً پالس های جریان کوتاهی را در اندازه های مناسب و با اندازه بار معلوم از طریق امپدانس های اندازه گیری که غالباً در آشکارسازهای تخلیه تعبیه شده اند تزریق می نماید. این پالس ها را می توان به کمک ولتاژ ژنراتوری با ولتاژهای پله مستطیلی با دامنه  $v_0$  که با یک ظرفیت کوچک با مقدار معلوم  $C_0$  سری شده است، تولید نمود. مقدار این پالس جریانی برابر با  $q = C_0 v_0$  خواهد بود. در هنگام بروز تخلیه جزئی، جابجایی بار از منبع تخلیه  $C_t$  به سمت ترمینالهای اندازه گیری صورت می پذیرد. پالس های جریانی اندازه گیری شده ( $I(t)$ ) توسط اسیلوسکوپ نصب شده در ترمینالها، به پارامترهای مدار آزمایش بستگی دارند.

در مدار اندازه گیری تک پالس تخلیه (شکل ۱۱-۳) به ازاء مقادیر مؤثر ظرفیت تزویج گر( $C_k$ )، رابطه بین مقدار بار اندازه گیری شده  $q_m$  و بار آشکار  $q_i$  می تواند به راحتی به صورت  $(C_k / C_i)$  محاسبه گردد. ولی در واقع ظرفیت های پراکنده موجود بین رابطه های فشار قوی و ظرفیت های موجود در منبع تغذیه فشار قوی که با خازن  $C_k$  موازی هستند ممکن است به وسیله امپدانس یا

فیلتر Z به طور رضایت بخشی حذف نشوند، بنابراین برای اجرای یک اندازه گیری مطمئن باز آشکار ضروری است که مدار یا وسیله اندازه گیری در آزمایش کامل آزمایش کالیبره شود.

مولد کالیبره کننده که به صورت موازی با نمونه تحت آزمایش قرار می گیرد، در شکل (۱۱-۳) نشان داده شده است. بارهای آزاد شده از مولد کالیبره کننده با این روش مشابه با بارهای آزاد شده از حفره های درون سیستم عایقی  $C_t$  عمل می کند، بنابراین مقدار خازن کالیبراسیون  $C_0$  باید در مقایسه با  $C_t + C_k$  کوچک باشد ( $\leq 10\%$ ). به این ترتیب مقدار بار  $q = cov_0$  که مربوط به پالس کالیبره کننده است، با یک بار آشکار مصنوعی معادل است پس وسیله آشکارساز PD، می تواند بر حسب بار مولد کالیبره کننده، کالیبره شود. این فرآیند با ضرب کردن یک ضریب مقیاس به صورت  $k = q/q_m$  در بارهای اندازه گیری شده  $q_m$ ، قابل انجام است. با احتساب سلفهای پراکندگی مربوط به رابطهای موجود بین مدار آزمایش و کالیبراسیون، امکان نوسان پالس های جریانی تزریق شده از مولد کالیبره کننده وجود دارد، زیرا طیف فرکانسی پالس های جریانی آشکار شده توسط  $Z_M$  شامل فرکانس تشدید نیز می باشند. آشکارسازهای باند باریک به این تشدیدها عکس العمل نشان می دهند و از این نظر، وجود چنین پدیده ای را باید با تغییر دادن فرکانس باند میانی بازرسی کرد. بنابراین برای پرهیز از سلفهای ناخواسته، مدار کالیبره کننده را باید هر چه نزدیکتر به وسیله آزمایش قرار دارد.



شکل (۱۱-۳): مدار آشکارساز PD همراه با مدار کالیبره کننده [۳۹]

### ۷-۳- اطلاعات قابل استخراج از تخلیه جزئی در روش الکتریکی [۴۰]

عموما اطلاعات بدست آمده با استفاده از اندازه گیری به روش الکتریکی بر سه دسته اند.

الف- اطلاعات زمانی<sup>۲۵</sup>،

ب- اطلاعات زاویه ای<sup>۲۶</sup>

ج- اطلاعات غیر وابسته به زمان و زاویه<sup>۲۷</sup> هستند.

### ۱-۷-۳- اطلاعات زاویه ای تخلیه [۴۰]

اطلاعات زاویه ای تخلیه وابسته به سیکل قدرت هستند. در این حالت فرض می شود ولتاژ ثابت است و سپس زاویه ولتاژ به تعداد مناسبی پنجره تقسیم بندی می شود. معمولاً از یک آشکار ساز دیجیتالی تخلیه برای جمع آوری پالسهای شبه انفرادی استفاده می شود. کمیت های پالس شامل دامنه پالسهای شبه انفرادی ( $q$ )، زاویه وقوع پالسهای شبه انفرادی تخلیه ( $\Phi$ ) و نرخ تکرار تخلیه ( $n$ ) می باشند. این کمیت ها بوسیله یک توزیع عددی یک جمله ای و یا دو جمله ای به صورت زیر قابل بیان است.

الف- میانگین بار در هر پنجره ( $q_a \sim \Phi$ )

ب- حداقل با در هر پنجره ( $q_p \sim \Phi$ )

ج- تعداد پالس در هر پنجره ( $n \sim \Phi$ )

د- میانگین جریان تخلیه در هر پنجره ( $I \sim \Phi$ )

ه- توزیع دو جمله ای ( $\Phi \sim q \sim n$ )

اگر نرخ تکرار تخلیه تعداد پالسهای در واحد زمان باشد آنگاه سطح زیر منحنی توزیع ( $q \sim n$ ) معادل با جریان تخلیه خواهد بود.

### ۲-۷-۳- اطلاعات زمانی تخلیه [۴۰]

<sup>۱</sup>. Time-Resolved Data

<sup>۲</sup>. Phase-Resolved Data

<sup>۳</sup>. Data Without Time-Phase Information

در اطلاعات زاویه‌ای تخلیه هیچ گونه مشخصه‌ای در رابطه با شکل موج پالس تخلیه وجود ندارد.

بطور ساده و مفید می‌توان توزیع ( $t \sim q$ ) را که در برگیرنده شکل موج تخلیه است را به عنوان اطلاعات زمانی تخلیه معرفی کرد. این نوع از اطلاعات نتایج بسیار شگرفی را در بر دارد. به عنوان مثال می‌توان رابطه‌هایی بین شکل موج تخلیه و فیزیک تخلیه پیدا کرد. ابزار اندازه‌گیری در این روش ارزانتر است، بعلاوه مکانیابی و عمریابی سیستم‌های عایقی با استفاده از این اطلاعات آسانتر است.

### [۴۰]-۳-۷-۳-اطلاعات غیر وابسته به زمان و زاویه

یک نمونه از این اطلاعات شامل توزیع ( $v \sim q$ ) است. این توزیع از اندازه‌گیری دامنه‌های تخلیه در ولتاژ‌های مختلف بدست می‌آید. این اطلاعات نمایانگر اثر هیسترزیسی تخلیه در یک سیکل آزمایش است. این اثر نمایانگر این مطلب است که زمانی که تخلیه در یک ولتاژ اولیه شروع می‌شود بعد از آن ولتاژ پایین تری برای تثبیت تخلیه لازم است.

### [۴۰]-۳-۸-استخراج پارامترهای تخلیه از اطلاعات تخلیه

روشهای ریاضی مختلفی برای برای استخراج پارامترهای تخلیه از اطلاعات اندازه‌گیری شده وجود دارد. از جمله این روشهای میتوان به روشهای آماری، روشهای تحلیل سیگنال، روشهای تحلیل تصاویر و سریهای زمانی اشاره کرد. هر کدام از این روشهای بر روی اطلاعات مشخصی قابل پیاده‌سازی هستند. به عنوان مثال روشهای آماری و تحلیل تصاویر بر روی اطلاعات زاویه‌ای، روشهای تحلیل سیگنال بر روی اطلاعات زمانی و روش سری‌های زمانی بر روی اطلاعات غیر وابسته به زمان و زاویه قابل پیاده‌سازی است.

بدلیل وابستگی پارامتر های استخراج شده از اطلاعات زمانی تخلیه به فیزیک تخلیه- شکل و مکان حفره ای که تخلیه در آنجا اتفاق می افتد- در ادامه بحث تمرکز خود را بر روی پارامتر های قابل استخراج از اطلاعات زمانی معطوف می کنیم.

### ۳-۸-۱- استخراج پارامتر های تخلیه از اطلاعات زمانی تخلیه [۴۰]

امروزه سنجش بار آشکار  $q_i$  به عنوان یک کمیت اساسی تخلیه الکتریکی به طور وسیعی شناخته شده است. مقدار بارهای انفرادی پالس های پیاپی و همین طور تعداد تخلیه ها در یک فاصله زمانی مبنا متفاوتند. فرآیندهای خرابی سیستم عایقی نتیجه ای از کل تخلیه هاست و تنها به مقادیر حداکثر محدود نمی شوند، با این حال عموماً تنها بزرگترین بارهای آشکار به عنوان یک مقدار مشخصه مهم می باشد و در بیشتر تحقیقات اخیر هم تنها به اندازه گیری پالسهای های انفرادی تخلیه الکتریکی و ارزیابی آنها با معیار های آماری پرداخته شده است.

همانگونه که گفته شد سیستم های اندازه گیری تک پالس تخلیه با نام تحلیل گرپالس تخلیه شناخته شده اند. وابسته به نوع سیستم های آشکارساز و تحلیل گر، مقادیر مختلفی مانند تعداد پالس ها، فواصل زمانی آنها و دامنه های انفرادی پالس ها قابل آشکار سازی هستند. حجم زیاد اطلاعات ناشی از تعداد زیاد رخدادها، لازم می دارد که تحلیلگرهای پالس الکترونیکی چندکاناله در سیستم بکار گرفته شده و ارزیابی نتایج نیز توسط کامپیوترها انجام شود. اندازه گیری بار آشکار  $q_i$  پیش شرط لازم برای کاربرد چنین سیستم هایی است. دامنه پالس های تخلیه آنگاه می تواند به سهولت بوسیله هر نوع شمارشگر پالس یا شدت سنجی شمارش شده و تعداد متوسط پالس را به صورت یک مقدار متوسط به دست آورد مشروط بر اینکه زمان پاسخ آشکارساز آنچنان کوتاه باشد که بین پالس های انفرادی تمایز قابل گردد. نرخ تکرار به مقدار بار نیز می تواند مربوط شود. به خاطر اینکه شمارنده ها را می توان طوری تنظیم کرد که نسبت به محدوده دامنه های معینی واکنش نشان دهند. با توجه به اینکه پاسخ اکثر آشکارسازهای PD نوسانی اند، باید دقیق کرد که بیش از یک شمارش به ازاء هر تخلیه انجام نگیرد.

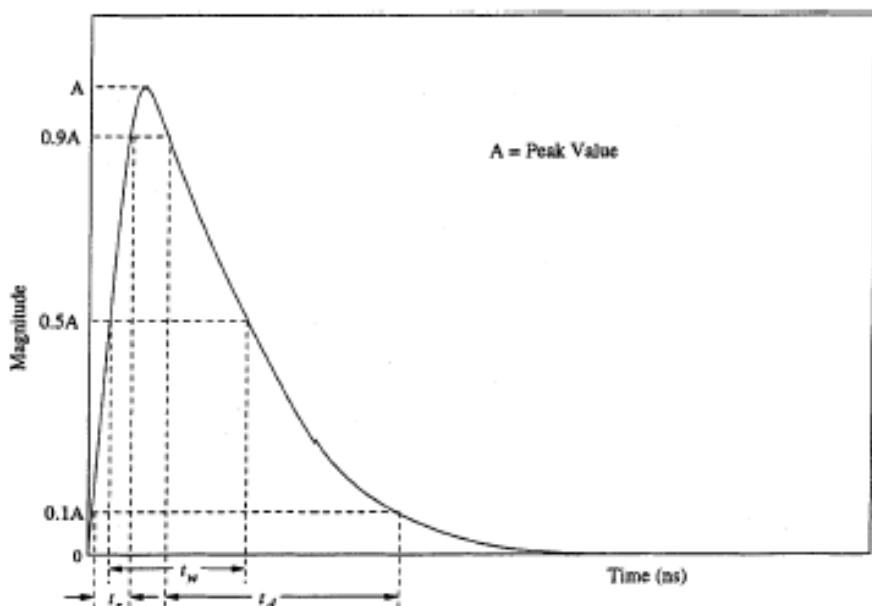
همانطور که گفته شد اطلاعات زمانی شامل شکل موج های اندازه گیری شده تخلیه در یک بازه زمانی  $\Delta t$  است. مهمترین اطلاعات اندازه گیری شده، بار آشکار ( $q_i$ )، ولتاژ ( $v_i$ ) و توزیع ( $t \sim q$ ) می-باشند. باید توجه داشت که بازه زمانی اندازه گیری  $\Delta t$  در مقابل پریود ولتاژ بسیار بزرگتر باشد. پارامتر های معرفی شده از یک تک پالس زمانی تخلیه ایده آل بصورت زیر قابل معرفی است (شکل ۱۲-۳).

الف- زمان صعود پالس ( $t_r$ ): زمان رسیدن پالس از  $10\%$  به  $90\%$  مقدار قله پالس

ب- زمان انحلال پالس ( $t_d$ ): زمان رسیدن از  $90\%$  به  $10\%$  مقدار قله پالس

ج- پهنهای پالس ( $t_w$ ): فاصله زمانی بین مقادیر  $50\%$  از طرفین قله پالس

د- سطح زیر پالس: سطح زیر پالس بین مقادیر  $10\%$  از طرفین قله پالس



شکل ۱۲-۳: یک تک پالس زمانی تخلیه ایده آل [۴۰]

پارامتر های ذکر شده، از یک پالس ایده آل بدست آمداند. لذا پارامتر های دیگری به صورت زیر تعریف شده اند ( $n$  تعداد کل تخلیه ها در بازه زمانی  $\Delta t$  است که به طور نرمال یک ثانیه انتخاب می شود).

الف- میانگین جریان تخلیه<sup>۲۸</sup>:

$$I = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^n |q_i|$$

با این تعریف کمیتی در دسترس خواهد بود که کلیه پالس های انفرادی PD و نیز شدت تکرار آنها را در- بر دارد. جریان تخلیه متوسط تا به حال به طور گستردۀ مورد تحقیق قرار نگرفته اند. اگرچه تحقیقات موجود اطلاعاتی اضافی کاملاً جالبی را درباره برخورد آن با عمر عایق نشان می دهد. اندازه گیری صحیح این کمیت اگر پالس های بی ضربان تخلیه نیز موجود باشند، آسان نیست.

ب- نرخ درجه دوم<sup>۲۹</sup>:

$$D = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^n q_i^2$$

-۵ تکرار<sup>۳۰</sup>: نرخ

$$n = \frac{N}{\Delta t}$$

ج- توان تخلیه<sup>۳۱</sup>:

$$P = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^n q_i V_i$$

-۵ تخلیه: دامنه ماکریمم

$$q_{max} = max(q_1, q_2, \dots, q_N)$$

و- دامنه میانگین تخلیه:

$$q_{av} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^n |q_i| / N$$

<sup>۱</sup>. Average Discharge Current

۲. Quadratic Rate

۳. Repetition Rate

۴. Discharge Power

استفاده از ابزار های تحلیل سیگنال مانند تبدیل فوریه<sup>۳۲</sup>، تبدیل ویولت<sup>۳۳</sup>، تبدیل هار<sup>۳۴</sup> و تبدیل ولش<sup>۳۵</sup> برای استخراج پارامتر های تخلیه از روی اطلاعات زمانی مرسوم است. هر کدام از این تبدیل ها مزایا و معایب خاصی دارند که در مورد آنها در فصل پنجم مفصلابحث خواهد شد.

raig ترین پارامتر های استخراج شده با استفاده از این ابزار های قدرتمند شامل طول زمانی معادل و پهنهای باند معادل هستند. اگر سیگنال تخلیه شامل  $k$  نمونه باشد و  $s_i$  نمونه آشکار شده در زمان  $x_i(f_i)$  باشد آنگاه طول زمانی معادل و پهنهای باند معادل به صورت زیر قابل تعریف است. در رابطه زیر ( $f_i$ ) مولفه فرکانسی بدست آمده از سیگنال تخلیه با استفاده از تبدیل فوریه است.

معادل<sup>۳۶</sup>:

زمانی

طول

-الف-

$$T^2 = \frac{\sum_{i=1}^K (t_i - t_0)^2 s_i^2}{\sum_{i=0}^K s_i^2}$$

آن

در

که

$$t_0 = \frac{\sum_{i=1}^K (t_i) s_i^2}{\sum_{i=0}^K s_i^2}$$

$$BW^2 = \frac{\sum_{i=1}^K f_i^2 |x_i(f_i)|^2}{\sum_{i=0}^K |x_i(f_i)|^2}$$

ب- پهنهای باند معادل<sup>۳۷</sup>:

### ۹-۳- الگو یابی انواع تخلیه ها در ترانسفورماتور های روغنی با استفاده

روش الکتریکی [۴۱ و ۴۲]

۴. Fourier Transform

۵. Wavelet Transform

۶. Haar Transform

۷. Wlash Transform

۸. Equivalent Time-Length

۹. Equivalent bandwidth

الگویابی تخلیه عبارتست از تفکیک انواع مختلف تخلیه ها . بعد از استخراج پارامتر های تخلیه از اطلاعات زمانی، زاویه ای و یا اطلاعات غیر وابسته به زمان و زاویه می توان به کلاسه بندی آنها اقدام نمود. روش‌های کلاسه بندی عموماً روشهایی هوشمند هستند. بصورت نمونه می توان به کلاسه بندی کننده های عصبی، فازی، آماری و فاصله ای اشاره کرد. جهت الگویابی تخلیه جزئی در یک نمونه واقعی باید مقولات زیر مورد توجه قرار گیرند:

- ۱- بررسی انواع مختلف تخلیه در ترانسفورماتورهای قدرت
- ۲- طراحی مدل مناسب جهت شبیه سازی تخلیه
- ۳- انتخاب روش مناسب جهت انجام آزمایش و استفاده از روش‌های کاهش نویز
- ۴- انجام آزمایش بر روی مدلها
- ۵- استفاده از پارامترهای مناسب جهت تشخیص نوع تخلیه
- ۶- کلاسه بندی تخلیه با کمک نرم افزارهای خبره نظری سیستم شبکه عصبی
- ۷- ایجاد پایگاه اطلاعاتی جهت تشخیص خطأ با استفاده از الگوهای تخلیه جزئی

### ۱-۹-۳- بررسی انواع تخلیه های موجود در ترانسفورماتورهای قدرت

به علت پیچیده بودن سیستم عایقی ترانسفورماتور مکان، نوع و نرخ تکرار تخلیه ها متفاوتند.

[۴۳ و ۴۴]. انواع مختلف تخلیه در ترانسفورماتور می تواند به صورت زیر خلاصه شود.

الف- تخلیه در فاصله موجودین لایه های سیم پیچی در عایق کاغذ-پرس بورد-روغن

ب- تخلیه بین دورهای سیم پیچی

ج- تخلیه در سر سیمهای در انتهای سیم پیچی

د- تخلیه سطحی در کاغذ عایقی

### ۲-۹-۳- مدل‌های پیشنهاد شده جهت شبیه سازی و استخراج پارامتر های انواع مختلف تخلیه های محتمل در ترانسفورماتورهای قدرت

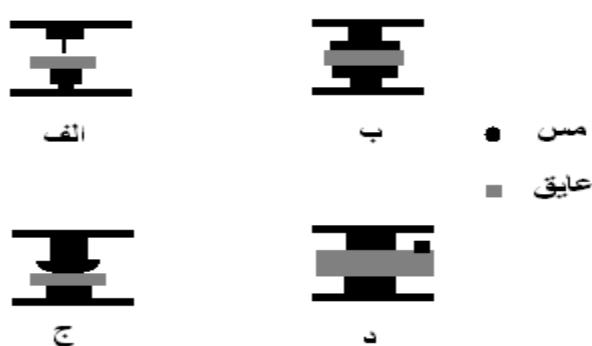
با توجه به اینکه منبع تخلیه در ترانسفورماتورهای قدرت می‌تواند حفره‌ها، ذرات شناور، قسمتهای نوک تیز، حباب در روغن باشد، لذا به منظور مدلسازی این منابع، مدارات مختلفی با در نظر داشتن ولتاژ دو سر حفره، مکان حفره و شکل الکترودهای اطراف آن پیشنهاد شده است [۴۱]. به عنوان نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف- کرونای روغن: الکترود سوزن-صفحه در حالی که فاصله انداز بین دو الکترود جایگذاری شده است.

ب- تخلیه سطحی: پرسپورده بین دو الکترود موازی

ج- تخلیه حبابی: الکترود کروی و یک الکترود صفحه‌ای در حالی که عایق پرسپورده بین دو الکترود قرار داده شده است.

د- تخلیه ذرات معلق: که با اتصال یک تراشه مسی به پرس بورد مدل می‌شود که این تراشه مسی پتانسیل شناور خواهد داشت (شکل (۳-۱۳)).



شکل (۳-۱۳): مدل‌های حفره‌ای [۴۴] PD

بعد از انجام آزمایش بر روی مدلها و جمع آوری اطلاعات زمانی و بعد از استخراج پارامترهای تخلیه و کلاسه بندی آنها الگویابی میسر می‌شود. یک نمونه از این نتایج در شکل (۳-۱۴) آورده شده است. نتایج آزمایش‌های مختلف نشان میدهد که تخلیه جزئی در روغن به صورت ناپایدار و نوسانی می‌باشد.

| pulse parameter |     |       |       |       |         |  |
|-----------------|-----|-------|-------|-------|---------|--|
| PD type         | Tr  | Td    | T90%  | T150% | Tset    |  |
| 1               | 5-6 | 10-11 | 13-14 | 19-21 | 80-90   |  |
| 2               | 6-8 | 9-10  | 11-13 | 14-16 | 140-150 |  |
| 3               | 3-4 | 9-11  | 11-13 | 14-15 | 120-140 |  |
| 4               | 8-9 | 11-12 | 18-19 | 28-30 | 290-300 |  |

1 Internal Discharge    2 Surface Discharge  
3 Bubble Discharge    4 Floating part Discharge

شکل(۱۴-۳): پارامترهای تک پالس ایده آل برای مدل‌های مختلف تخلیه جزئی در واحد نانو ثانیه [۴۴]

### ۳-۹-۳- الگو یابی تخلیه با استفاده از سنسورهای UHF

روش دیگر برای شناسایی الگوهای تخلیه، استفاده از تکنولوژی UHF در آزمایشگاه است [۴۱]. در این روش از یک تحلیل کننده طیفی استفاده می شود. این روش قابلیت جمع آوری اطلاعات زاویه ای تخلیه را دارد. ولی مشکل آشکارسازی سیگنالهای ضربانی تخلیه و مونیتورینگ On-Line بصورت دراز مدت هنوز پا بر جا می باشد. پس از جمع آوری اطلاعات زاویه ای و تحلیل آنها با استفاده از ریاضیات آماری و سپس کلاسه بندی آنها، نتایج زیر بدست آمده اند [۴۲].

الف- تخلیه کرونا: در روغن درنیم سیکل مثبت سیگنال قدرت اتفاق می افتد.

ب- تخلیه سطحی: تخلیه سطحی نزدیک به قله سیگنال مثبت اتفاق می افتد عموماً از ۲۰ تا ۱۲۰ درجه و از ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه.

ج- تخلیه حبابی<sup>۳۸</sup>: پالسهای تخلیه نزدیک به ناحیه صفر سیگنال قدرت اتفاق می افتد.

د- تخلیه ذرات معلق: این نوع تخلیه معمولاً در تمام دوره سیگنال قدرت اتفاق می افتد.

### ۳-۱۰- نتیجه گیری

بدلیل کارایی فوق العاده روش الکتریکی در تشخیص ماهیت تخلیه الکتریکی جزئی در ترانسفورماتورها در این پایانمه از این روش استفاده می شود. با مطالعه انواع تکنولوژیهای موجود

فهمیده شد که، اندازه گیری الکتریکی تک پالس تخلیه<sup>۳۹</sup> ، ساده ترین و سازگار ترین روش برای مکان یابی است. بدلیل شباهت مکانیزم شکست و تخلیه الکتریکی مدلسازی و مقایسه این دو پدیده ضروری به نظر می رسد. بدلیل تصادفی بودن نرخ تکرار و درهم بودن الگوهای تخلیه در یک زمان مشخص در یک نمونه واقعی، دریافته شد که برای نزدیک شدن به نتایج واقعی تر، شبیه سازی همزمان انواع مختلفی از تخلیه ها با مشخصات مختلف در یک نقطه مشخص در ترانسفورماتور مفید تر است. اما تحلیل چنین پالسی با مشکلات فراوانی مواجه خواهد بود که در فصل ششم روشی موثر برای حل این مساله ارائه خواهد شد.

#### ۱-۴- مقدمه

تخلیه جزئی مهمترین دلیل خرابی عایق های الکتریکی ترانسفورماتورهای قدرت است. هزینه سرمایه ای<sup>۴۰</sup> ترانسفورماتور قدرت بسیار بالاست، همچنین خارج شدن ترانسفورماتور قدرت از شبکه اطمای اقتصادی زیادی به بهره برداری تحمیل می کند، بنابراین بررسی مهمترین علت خرابی عایق های ترانسفورماتور (تخلیه جزئی) به منظور اعمال مراقبت های نگهدارانه<sup>۴۱</sup> و یا تعویض قسمت های معیوب ترانس به منظور جلوگیری از انتشار آسیب و همچنین کاهش هزینه و زمان تعمیر ضروری بنظر می رسد.

تکنیکهای مکان یابی تخلیه جزئی وابسته به روش آشکار سازی تخلیه جزئی می باشد. هر کدام از روشهای اندازه گیری محدودیتهای ویژه ای دارند که در فصل اول به آنها اشاره شد. روشهای نوری و صوتی و شیمیایی حساسیت پایینی به مکان تخلیه دارند. ولی در روش الکتریکی پالسهای اندازه گیری شده طیف فرکانسی بسیار گسترده ای تا فرکانس UHF را شامل می شوند. امروزه با توسعه مدارهای اندازه گیری پیشرفته دیجیتالی امکان اندازه گیری پالسهای سریعتر با دامنه کوچکتر میسر شده است.

---

<sup>۳۹</sup>. Direct Probing

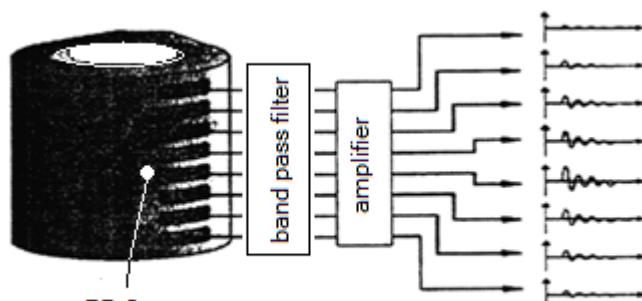
<sup>۴۰</sup>. Capital Cost

<sup>۴۱</sup>. Maitenance

به دلیل ساختار پیچیده ترانسفورماتور، سیگنالهای اندازه گیری شده از محل ترمینال های اندازه گیری (نول و بوشینگ) از شکل واقعی خود بسیار منحرف می شوند، بنابراین مکان یابی محل وقوع تخلیه از روی این سیگنالها مشکل می شود؛ اما با این حال همین سیگنالها حاوی اطلاعات بسیار ارزشمندی درباره محل وقوع تخلیه جزئی و نوع تخلیه هستند. حال اگر این اطلاعات آنالیز شوند، محل وقوع تخلیه جزئی قابل شناسایی خواهد بود [۴۵ و ۴۶]. به دلیل تفاوت سیستم عایقی ترانسفورماتورهای خشک و روغنی، عیب یابی و مخصوصاً تعیین محل دقیق تخلیه جزئی در داخل عایق آنها، در این دو نوع ترانسفورماتور متفاوت می باشد، از اینرو در ادامه به تشریح روشهای مکان یابی تخلیه در ترانسفورماتورهای خشک و روغنی به صورت جداگانه می پردازیم.

#### ۲-۴- مکان یابی تخلیه در ترانسفورماتور خشک [۴۶]

در اینجا مدلی از یک روش نوین در اندازه گیری جزئی در ترانسفورماتورها مطرح می شود. ایده اصلی در این روش جدید، اندازه گیری امواج الکترومغناطیسی تولید شده از منبع تخلیه جزئی است. برای این منظور از سنسورهایی که مستقیماً روی سطح سیم پیچ ترانسفورماتور نصب می کنند. شکل(۱-۴) این موضوع را نشان می دهد.



شکل(۱-۴): مکان یابی تخلیه در ترانسفورماتور خشک با استفاده از سنسور های تماسی در سطح سیم پیچی [۴۶]

با این روش می توان مکان تخلیه جزئی را تعیین کرد زیرا در سنسورهایی که به منبع تخلیه جزئی نزدیک هستند دامنه سیگنالها بزرگتر است و در سنسورهایی که از محل ایجاد تخلیه جزئی دور

هستند، دامنه سیگنالها خیلی کوچک می باشد. با استفاده از یک فیلتر میانگذر مناسب نویز به اندازه کافی حذف می شود. به علاوه می توان با محاسبه تفاضل سیگنالهای مجاورهم میزان میرایی نویزها را افزایش داد. قبل از ارزیابی تخلیه جزئی بایستی بار آشکار را در مرحله کالیبراسیون تنظیم شود و سپس فرکانس مرکزی و محدوده فرکانسی مناسبی را برای فیلتر میانگذر انتخاب کنیم.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه تخلیه الکتریکی جزئی در ترانسفورماتور خشک، می توان گفت که فعالیت تخلیه الکتریکی به صورت پیوسته نمی باشد و ممکن است در برخی دوره ها کم باشد، از طرف دیگر با توجه به شرایط این ترانسفورماتور از نظر نوع عایق بندی، هر آسیب جدی می تواند منجر به از کار افتادن کل ترانسفورماتور گردد لذا مونیتورینگ Online تخلیه الکتریکی جزئی به طور مداوم، برای این ترانسفورماتورها پیشنهاد می گردد.

### ۳-۴- مکان یابی تخلیه الکتریکی جزئی در ترانسفورماتورهای نوع روغنی

بر خلاف ترانسفورماتورهای نوع خشک که در آنها تخلیه جزئی مستقیماً از سطح سیم پیچ اندازه- گیری می شود، در ترانسفورماتورهای نوع روغنی اندازه گیری تخلیه جزئی با روش تماسی<sup>۴۲</sup> به هنگام بهره برداری از ترانسفورماتور فقط از طریق ترمینالهای آن امکان پذیر است، لذا با کمک روشهای تشخیص الگو و روشهای ابتکاری می توان به محل تخلیه جزئی در سیم پیچی ترانسفورماتور پی برد. البته علاوه بر روشهای اندازه گیری الکتریکی تخلیه جزئی می توان از روشهای شیمیایی (نظیر DGA<sup>۴۳</sup>) و یا روشهای صوتی نیز کمک گرفت، ولی با توجه به تحقیقات انجام شده در سالهای گذشته روشهای مکان یابی صوتی به دلایل ذکر شده حساسیت و دقت کافی نداشته اند و همچنین روش DGA نیز دارای دقت و حساسیت لازم در این مورد نمی باشد. ولی به هر حال برای افزایش قابلیت اطمینان در کنار روش اندازه- گیری الکتریکی می توان از روش صوتی برای اندازه گیری مقدار و مکان تخلیه جزئی و روش DGA برای اندازه گیری شدت تخلیه جزئی استفاده کرد.

---

<sup>۱</sup>. Probing

<sup>۲</sup>. Dissolve gas analysis

#### ۴-۴- تکنیکهای مدرن در مکانیابی تخلیه جزئی با استفاده از روش الکتریکی

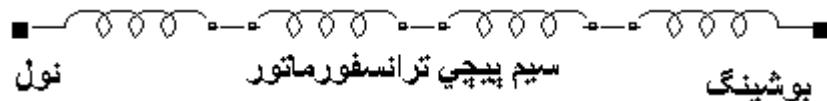
عموماً پروسه مکان یابی تخلیه جزئی بر اساس مدل مرجع می باشد به این ترتیب که ابتدا معیار داده های آماری و یا توابع تبدیلی وابسته به مکان تخلیه از روی مدلی نزدیک به ترانسفورماتور یا ترانسفورماتور واقعی تهیه می شود و سپس از روی آنها به مکان یابی تخلیه در ترانس واقعی اقدام می شود. اساس جمع آوری اطلاعات جهت ساختن معیار و یا داده ها بر مبنای تزریق پالس جریانی تخلیه مشخص به نقاط درونی مدل و یا خود ترانس استوار می باشد.

اخیراً تحقیقات گسترده ای برای اختراع روشهایی برای مکان یابی تخلیه جزئی انجام شده است. از جمله این روشها می توان به روش توابع تبدیل جزء به جزء سیم پیچ<sup>۴۷</sup> (SWTF)، روش صفرهای طیف فرکانسی سیگنال های تخلیه جزئی<sup>۴۹</sup>، روش نسبت انرژی سیگنالهای دریافتی از سر نول و بوشینگ<sup>۵۰</sup>، استفاده از روشهای هوشمند در مکان یابی تخلیه جزئی<sup>۵۱</sup> [۵۱] اشاره کرد؛ که هر کدام از آنها پیچیدگی های خاص خود را در عمل دارا می باشند.

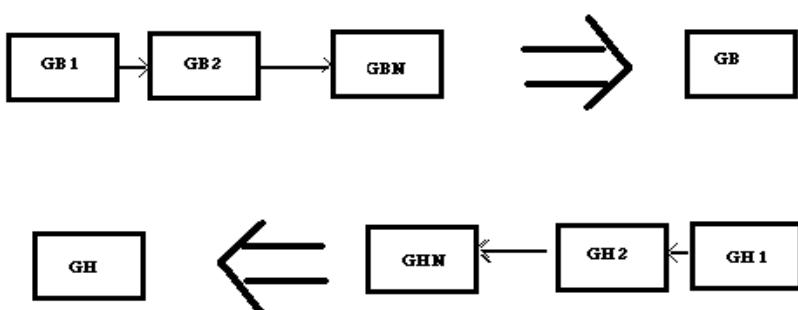
#### ۴-۱- مکانیابی بر اساس توابع تبدیل جزء به جزء سیم پیچ

در اینجا برای مکان یابی تخلیه جزئی روشی ارائه می شود که بر دو فرض اساسی پایه گذاری شده است. یکی بر خطی بودن سیم پیچ ترانسفورماتور و دیگری بر این فرض که بتوان سیم پیچ ترانسفورماتور را به زیر سیستم هایی تقسیم کرد که بصورت سری با هم قرار دارند. با توجه به شکل (۲-۴) فرض بر این است که سیم پیچ ترانسفورماتور از دو طرف، به بوشینگ (B) و نقطه خنثی (N) متصل هستند. تابع تبدیل سیم- پیچی در صورتی که نقطه خنثی خروجی و بوشینگ ورودی باشد طرف یکسان نمی باشند. به تبع این نگرش، زیر سیستم ها که نمایانگر جزئیات سیم پیچی می باشند نیز متفاوت خواهند بود. اگر این زیر سیستم ها محاسبه و یا اندازه گیری شوند آنگاه مکان یابی تخلیه

میسر خواهد بود. شکل (۳-۴) نمایی از چگونگی عبور پالس تخلیه از توابع انتقال جزئی سیم پیچ به طرف بوشینگ و نول را نشان می دهد.

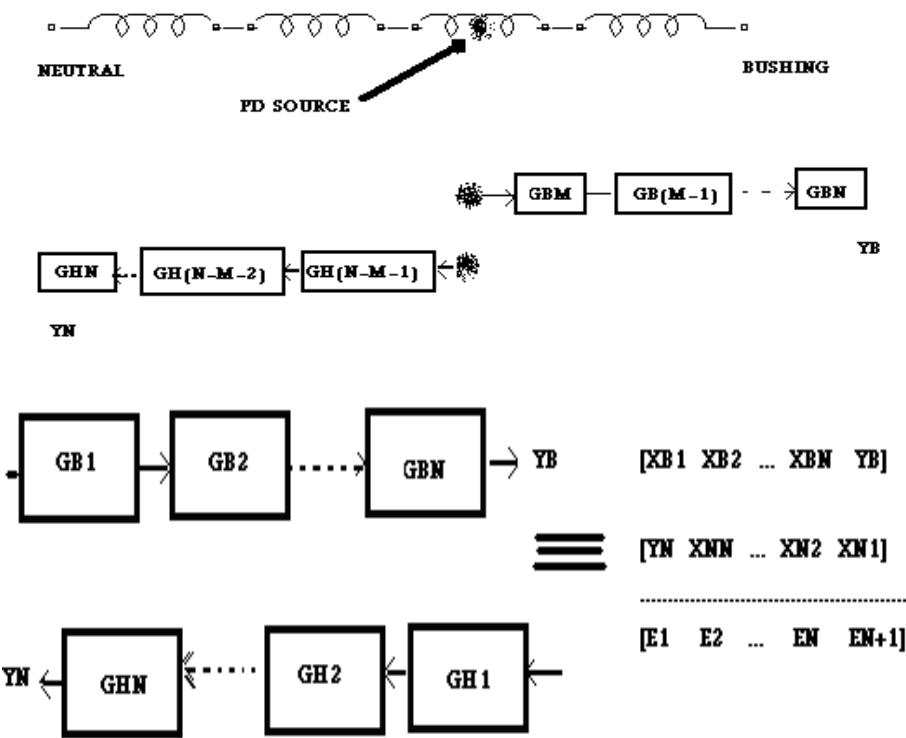


شکل(۲-۴): شکل شماتیک سیم پیچی



شکل(۳-۴): زیر سیستمهای سیم پیچی از طرف بوشینگ به نول و بالعکس [۴۷]

در انتشار این پالس به طرف نقطه خنثی زیر سیستم ها با توابع  $GB_i$  و در انتشار به سمت بوشینگ زیر سیستم ها با توابع  $GH_i$  در مسیر سیگنال ها قرار خواهند داشت بنابراین از روی این دو خروجی نول ( $y_n$ ) و بوشینگ ( $y_B$ ) می توان ورودی زیرسیستم ها را مشخص نمود. به این ترتیب با استفاده از خروجی  $y_n$  تمامی ورودی زیر سیستم ها محاسبه گردند و همچنین با استفاده از  $y_B$  یکسری ورودی دیگر محاسبه شوند. بنابراین برای هر نقطه دو ورودی محاسبه می شوند اگر این دو ورودی بیشترین شباهت را داشته باشند به لحاظ تئوریک محل وقوع تخلیه خواهد بود(شکل (۴-۴)).



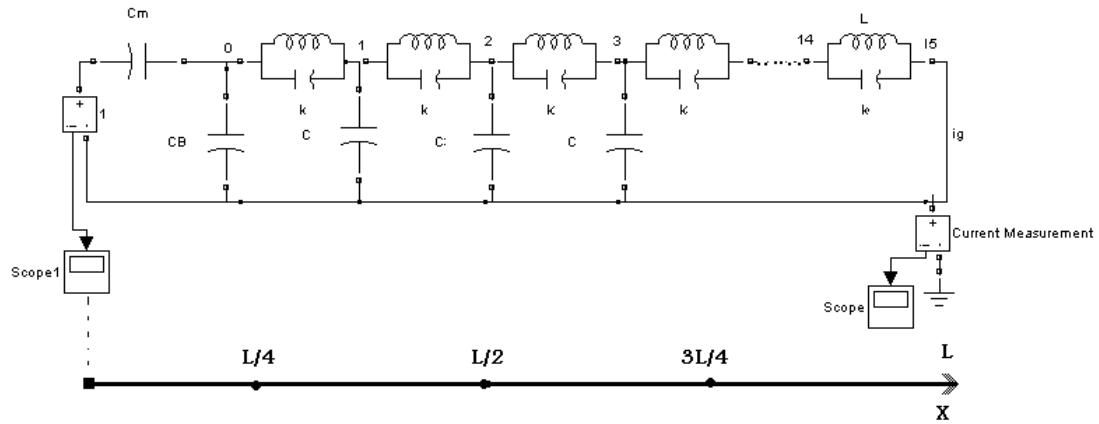
شکل(۴-۴): الگوی مکانیابی بر اساس توابع تبدیل جزء به جزء سیم پیچ [۴۷ و ۴۸]

#### ۴-۲-۴-۴- مکانیابی بر اساس صفر و قطب های طیف فر کانسی سیگنال ها

در این روش پالسهای جریانی تخلیه به نقاط درونی مدلی از سیم پیچی واقعی ترانسفورماتور تزریق و پاسخ آنها در دو سر بوشینگ و نول ثبت می شوند. در این روش اثبات می شود که صفرهای طیف فر- کانسی سیگنالهای دریافتی از سر نول و بوشینگ وابسته به مکان تزریق است. برای وضوح بیشتر این مطلب، اثبات این موضوع را برای یک مدل ساده ترانسفورماتور نشان می دهیم.

#### ۴-۲-۴-۱- مدل شبکه نردنbanی ترانسفورماتور [۴۹]

برای مطالعه بهتر تخلیه جزئی در یک ترانسفورماتور، سیم پیچی ترانسفورماتور مانند یک شبکه نردنbanی مخلوط شامل اندوکتانس ها، خازن ها، مقاومت ها و هدايت ها مدل می شود. اگر اثر هدايت و تلفات دی الکتریک را بتوان نسبتاً پایین فرض نمود در آن صورت شبکه ساده شده ای از اندوکتانس ها و خازن ها برای بیان رفتار گذراي سیم پیچی کفايت می کند(شکل(۵-۴)).



شکل(۴-۵): مدل شبکه نردنی ساده شده ترانسفورماتور با سیم پیچی یکنواخت ساده [۴۹]

برای این مدار معادل پاسخ های ولتاژ گره ها و جریان شاخه ها را می توان بصورت زیر محاسبه می شود.

(۱-۴)

$$U(x, j\omega) = A \cosh(rx) + B \sinh(rx)$$

(۲-۴)

$$j(x, j\omega) = \frac{1}{z} [A \sinh(rx) + B \cosh(rx)]$$

که در آنها:

$$r^2 = \frac{-Lc\omega^2}{1 - Lk\omega^2}$$

$$z = \sqrt{\frac{L}{C(1 - Lk\omega^2)}}$$

در معادلات (۱-۴) و (۲-۴) ضرایب  $A$  و  $B$  با توجه به شرایط مرزی محاسبه می شوند. اگر فرض کنیم که انتهای سیم پیچی مدار باز است و منبع جریانی تخلیه  $i_{pd}$  به نقطه  $x$  تزریق می شود آنگاه پاسخ این جریان در سیم نول  $(l, j\omega)$  به صورت رابطه (۳-۴) بدست می آید.

(۳-۴)

$$i(l, j\omega) = \frac{\cosh(rx)}{\cosh(rl)} \times i_{pd}(j\omega)$$

صورت تابع تبدیل معادله بالا که شامل صفر های تابع است به نقطه تزریق  $x$  وابسته است. برای بدست آوردن صفر ها و قطب های تابع تبدیل صورت و مخرج کسر را مساوی صفر قرار می دهیم و عبارت را به شکل زیر ساده می کنیم.

$$\cosh(rx) = \cos\left(\frac{(2k-1)\pi}{2}\right) = 0, k = 1, 2, \dots, n$$

$$\cosh(rl) = \cos\left(\frac{(2k-1)\pi}{2}\right) = 0, k = 1, 2, \dots, n$$

$$r_k x = j \frac{(2k-1)\pi}{2}$$

$$r_k l = j \frac{(2k-1)\pi}{2}$$

(۴-۴)

$$z_k = \pm \frac{j(2k-1)\pi}{2x \sqrt{LC + LK \left( \frac{(2K-1)\pi}{2x} \right)^2}}$$

(۵-۴)

$$p_k = \pm \frac{j(2k-1)\pi}{2l \sqrt{LC + LK \left( \frac{(2K-1)\pi}{2l} \right)^2}}$$

المانهای  $L$  و  $C$  در شکل (۴-۵) نشان داده شده اند. در این مدل ساده از اندوکتانسها متقابل صرفنظر شده است.

همانطور که ملاحظه می شود صفر های تابع تبدیل طبق معادله (۴-۴) با مکان تزریق  $x$  تغییر می کند در حالی که قطب ها طبق معادله (۴-۵) وابستگی مشخصی به مکان تزریق ندارند. محاسبه صفرها و قطب ها در مدلها بدون تقریب و واقعی ترانسفورماتور، با تبدیل پاسخ های زمانی اندازه گیری شده به مدل پاسخ فرکانسی قابل حصول می شود.

#### ۴-۴-۲-۲- مدل پاسخ فرکانسی $FRD^{45}$

مدل FRD مدلی است که بر اساس آن مقادیر پاسخ فرکانسی مختلط در طول بردارهای متناظر فرکانسی مرتب می شوند. این مدل به صورت  $\{G_i(\omega_i) \omega_i, i = 1 \dots n\}$  قابل نمایش است.  $G_i(\omega)$  قابل تعريف است.

(۶-۴)

$$G_i(\omega) = |G(\omega_i)| \exp(j \angle G(\omega_i))$$

مدل FRD خطی<sup>۴۶</sup> است. این نوع مدلسازی سیستم برای حالاتی که تنها در برخی لحظه ها پاسخ فرکانسی نمونه برداری شده در دسترس باشد، برای سیگنالهای خطی و ساکن بسیار مفید می باشد. بدلیل وجود نوبز، تداخل و حذف صفر و قطب در پاسخ فرکانسی های اندازه گیری شده ممکن است برخی از صفرها در پاسخ فرکانسی محو شوند، بنابراین استفاده از برداری که طول آن اختلاف فرکانسی بین اولین و دومین و یا سومین صفر می باشد بسیار کار گشا می باشد. این روش به روش تطابق بر دار ها (FTM) موسوم است.

#### ۴-۴-۳-۲- روش میزان تطابق بردارها<sup>۴۷</sup> (FTM)

در این روش بر طبق رابطه (۴-۷) از فاصله اولین و دومین صفر در پاسخ فرکانسی برای تشکیل بردارهای تطابق  $FTV_{S(i)}^{48}$  استفاده می شود. این بردارها به ازای تمامی نقاط محتمل خطای جریانی در طول مدل گسترده ترانسفورماتور برای دو ترمینال اندازه گیری بدست می آیند، درنتیجه به ازای هر گره مدل گسترده ( $i$ ) یک بردار در پایگاه داده ها خواهیم داشت. حال فرض می کنیم در شرایط

- 
۱. Frequency Response Data
  ۲. Linear Time Invariant(LTI)
  ۳. Feature Template Matching
  ۴. Feature Template Vector

عملی خطا در نقطه ای مجھول اتفاق افتاده است و پاسخ فرکانسی آن ثبت شده است. اولین و دومین صفر از پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده استخراج شده و سپس بردار های واقعی  $FTV_M$  محاسبه می شوند.  $FTV$  های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با هم تشکیل تابع تشخیص(۲-۸) را می دهند. جایی که این تابع براورده شد به عنوان مکان خطا شناسایی می شود.

(۷-۴)

$$FTV = \left| |Z_1| - |Z_2| \right|$$

(۸-۴)

$$D_f = \min(FTV_{S(i)} - FTV_M)$$

### ۳-۴-۴- روش های پردازش سیگنال در حوزه زمان-فرکانس

تبديل های زمان- فرکانس ابزاری قدرتمند در پردازش سیگنال به شمار می روند. این تبدیلهای سیگنال های دو بعدی اندازه گیری شده در حوزه زمان را به سه بعد دامنه- فرکانس- زمان تبدیل می کنند.

سیگنالهای تبدیل شده تخلیه جزئی وابسته به مکان تخلیه، رفتار های مختلفی را در حوزه زمان- فرکانس-دامنه دارا می باشند. به همین دلیل مهندسان از این تبدیل ها برای تحلیل اطلاعات زمانی تخلیه و همچنین ایجاد بانک اطلاعاتی به منظور مکان یابی تخلیه سود جسته اند [۵۰].

روشهای مکانیابی تخلیه بعد از مرحله اندازه گیری و آنالیز سیگنال مطرح می شود. از تبدیلهای مفید و مورد توجه محققان در این موضوع می توان به تبدیل فوریه، موجک و فوریه زمان کوتاه اشاره نمود. نکته کلیدی در مبحث مکانیابی تخلیه با استفاده از این تبدیلهای استخراج پالسهای تخلیه و سپس محاسبه نسبت انرژی سیگنالهای اندازه گیری شده از سر بوشینگ و نول با استفاده از تئوری پارسوال می باشد [۵۰]. مزیت این روش حذف وابستگی معیار بدست آمده به نوع تخلیه با مشخصه های متفاوت، می باشد.

در فصل هفتم به طور مفصل در مورد این روشهای بحث و همچنین با ارائه یک تبدیل جدید به تفسیر زمان- فرکانس سیگنالهای تخلیه اقدام خواهد شد.

#### **۴-۴- استفاده از روش‌های هوشمند**

در این روش‌ها بر اساس اقتباس از مغز انسان بوجود آمده‌اند. اساس این روش‌ها بر آموزش شبکه با ورودی‌های محدود و صحیح بر اساس الگوریتم‌های ویژه آموزش است. این روش‌ها ابزاری هوشمند و مبتنی بر تجربه برای شناسایی و طبقه‌بندی ورودی‌های ناشناس فراهم می‌کنند. داده‌های ورودی می‌توانند شامل دامنه، ضرائب میراکننده سیگنال، ضرائب مارکل، پاسخ فرکانسی در یک باند مشخص، انرژی موج و یا اطلاعات آماری مانند توابع توزیع متوسط و ماکزیمم دامنه و توزیعهای تعریف شده در مبحث تخلیه می‌باشند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش شبکه عصبی، روش عصبی-فازی و دسته بندی کننده ها<sup>۴۹</sup> اشاره نمود. سخت افزار و نرم افزار مورد استفاده در این روش‌ها شامل یکسری سنسور و یک دستگاه مالتی پلکسیر و کامپیوتر است.

#### **۵-۴- نتیجه گیری**

در این فصل انواع تکنیک‌های مدرن در مکانیابی تخلیه جزئی بررسی شد. تکنیک‌های مکان‌یابی تخلیه جزئی وابستگی مستقیمی به نوع ترانسفورماتور، چگونگی مدلسازی آن و روش اندازه گیری سیگنال تخلیه دارند. با تمامی این ملاحظات بنظر می‌رسد که استفاده از روش‌های زمان-فرکانس و معیار انرژی سازگاری بهتری با نمونه‌های شبیه سازی شده داشته باشد، لذا این روش انتخاب می‌شود.

#### **۱-۵- مقدمه**

برای مطالعه شکل موج جریان ابتدای سیم پیچی ترانسفورماتوری که دچار خطای گذرا و یا دائم درون سیستم عایقی خود شده است، یک مدل گسترده و دقیق از ترانسفورماتور قدرت مورد نیاز است. حد اعتبار این نوع مدل باید در حد چند صد کیلوهرتز باشد. جهت افزایش حد اعتبار فرکانسی می-

---

<sup>۱</sup>. Clustering

توان جزئیات مدل را افزایش داد، یعنی باید تعداد گره ها را افزایش داده و به مدلسازی حلقه به حلقه سیم پیچی رسید. پس از مدلسازی ترانسفورماتور در محدوده فرکانسی مورد نظر قادر خواهیم بود به مدلسازی تخلیه جزئی در آن بپردازیم. لذا در این فصل جهت انتخاب یک مدل مناسب، انواع مدلهای گذرا ای یک ترانسفورماتور قدرت بررسی شده است.

## ۲-۵- مروری بر روش‌های مدلسازی سیم پیچ ترانسفورماتور جهت مطالعات حالت

### گذرا

برای تشخیص خطا در ترانسفورماتور استفاده از مدلی که رفتار سیم پیچی را در فرکانس‌های بالا و حالات گذرا نشان دهد، لازم است. مدلهای گذرا و گستردۀ به دو گروه عمده گستته و پیوسته طبقه بندی می‌شوند. عموماً قابلیت مدلسازی خطاهای درونی، در این مدلها وجود دارد [۵۴، ۵۳، ۵۲ و ۵۵]. مدلهای گستته<sup>۵۰</sup> و پیوسته<sup>۵۱</sup> ترانسفورماتور با استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و ساختمان داده‌ها بدست می‌آیند. در مدل پیوسته نقاط داغ سیم پیچی در نظر گرفته نمی‌شود و دقیق فرکانسی بخارط اینکه بهینه سازی حول اولین فرکانس انجام می‌شود در کل باند فرکانسی محدود شده است [۵۳]. بنابراین استفاده از مدل‌های درونی جزئی گستته بطور برجسته تری توسط مهندسان برق جهت طراحی و خطا یابی در ساختار عایقی ترانسفورماتورهای بزرگ قدرت مورد توجه قرار گرفته است. امروزه برای بالا بردن دقیق و توسعه مدلهای جزئی، مفاهیمی همچون رفتارهای غیرخطی و تلفاتی هسته، رفتارهای غیرخطی و تلفاتی عایق و همچنین اثرات پوستی مسیرهای جریانی، مورد تحقیقات فراوان قرار گرفته است [۵۷، ۵۶ و ۵۸].

روش‌های مدلسازی و بررسی تحلیلی حالت‌های گذرا سیم پیچی بعد از ساده سازیهای متعدد امکان پذیر است. برای برداشتن گامی فراتر در جهت انجام مطالعات دقیق تر به مدلهایی احتیاج داریم که مبتنی بر روش‌های عددی هستند. با توجه به تحقیقات و مطالعات انجام شده، میتوان گفت دو دیدگاه عمده جهت مدلسازی سیم پیچی ترانسفورماتور وجود دارد:

۱. Discrete

۲. Continous

## الف- دیدگاه جعبه سیاه

### ب- دیدگاه فیزیکی

دیدگاه جعبه سیاه مدل نظر طراح سیستم قدرت می باشد، چرا که جهت طراحی و هماهنگی عایقی در سیستمهای با ولتاژ بالا، نیازمند به مدلهای دو قطبی برای اجزاء متفاوت سیستم قدرت از جمله ترانسفورماتورها هستیم.

در روش جعبه سیاه موضوع مورد نظر مقدار جریان و ولتاژ در ترمینال ورودی ترانسفورماتور است و ترانسفورماتور مثل یک جعبه سیاه در نظر گرفته می شود. در این روش مدلسازی، وجود نتایج اندازه گیری در حوزه زمان یا فرکانس لازم است، بنابراین امکان مدلسازی، بعد از مرحله ساخت میسر می گردد. از مزایای مهم این روش بالا بودن حد اعتبار فرکانسی مدل است. در حقیقت می توان گفت حد اعتبار فرکانسی محدودیتی ندارد و هر محدودیتی از طرف تجهیزات و روش‌های اندازه گیری است و نه مدل. استخراج مدل ریاضی سیستم را تحلیل سیستم می نامند. اگر در این ضمن از داده های بدست آمده از آزمایشات استفاده شود، عمل انجام شده را شناسایی سیستم می نامند. به کمک یک روش شناسایی می توان با توجه به مقادیر اندازه گیری شده ورودی و خروجی، یک مدل ریاضی برای سیستم مورد مطالعه بدست آورد. تحلیل سیستم اغلب یک روند تکراری است. یعنی یک مدل از طریق مقایسه تکراری با سیستم مبنا به میزان لازم تا فراهم شدن دقت لازم اصلاح می گردد.

هدف از مدل سازی جعبه سیاه این است که از مدل غیر پارامتری ترانسفورماتور که به شکل پاسخ فرکانسی یا زمانی است، به یک مدل پارامتری به شکل یکتابع تبدیل و یا به شکل یک مدار معادل برسیم. با توجه به رفتار خطی ترانسفورماتور برای فرکانس‌های بزرگ‌تر از  $10$  کیلو هرتز می توان آن را یک سیستم خطی دانست و روند مذکور را برای آن اعمال کرد. این روش می تواند هم بر مبنای اندازه گیری های حوزه فرکانس و هم بر مبنای اندازه گیری های حوزه زمان باشد. پاسخ پله یا ضربه اندازه گیری شده و همچنین تحریک ورودی در حوزه زمان به کمک تبدیل فوریه به حوزه فرکانس منتقل می گردند و در آخر از آنها تابع تبدیل سیستم بدست می آید. ناتوانایی بزرگ این روش، عدم توانایی توصیف رفتار نقاط داخلی سیم پیچ است. بنابراین در مرحله طراحی باید از مدلهای گستردگی سود جست.

از دیدگاه مهندس طراح ترانسفورماتور هدف از مدل سازی فیزیکی، بررسی رفتار سیم پیچ است. زیرا جهت طراحی عایق بندی سیم پیچها، رفتار نوسانی ترانسفورماتور و تنشهای الکتریکی بوجود آمده در حالت‌های گذرا در داخل سیم پیچ بایستی مشخص باشد. در داخل سیم پیچ امکان بروز حالت‌های گذرای سریع و خیلی سریع همیشه مطرح است. علت این پدیده می‌تواند ضعف عایقی در برابر برخورد صاعقه به خطوط انتقال، کلید زنی بخصوص در ترانسفورماتورهای متصل به پستهای گازی<sup>۵۲</sup> و اغتشاشات دیگر در شبکه مانند اتصال کوتاه یا اتصال ترانسفورماتورهای بی‌بار باشد. در صورت تطابق یکی از فرکانس‌های تحریک، با یکی از فرکانس‌های طبیعی ترانسفورماتور امکان بروز پدیده تشدید<sup>۵۳</sup> در داخل سیم پیچ فراهم می‌گردد. این پدیده می‌تواند عایق سیم پیچ را بطور موضوعی تحت تنش الکتریکی قرار دهد و باعث خرابی آن گردد. البته حفاظت‌های معمول ترانسفورماتور، مانند برقگیر، در جلوگیری از بروز این پدیده بی‌تأثیرند. بنابراین در مرحله طراحی ارزیابی بروز اضافه ولتاژهای با دامنه بالا و توانایی تحلیل رزونانس جهت حفاظت سیستم به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان و در نتیجه عدم زیان اقتصادی امری ضروری است. مهندس طراح ترانسفورماتور باید این مساله را در مرحله طراحی به کمک شبیه سازی بررسی نماید. در رابطه با این موضوع در ادامه بحث و بررسی مدلها از دیدگاه فیزیکی می‌پرازیم.

### ۳-۵- روش‌های مدل سازی فیزیکی و مقایسه آنها

تمامی مطالعات در مرحله طراحی و خطایابی به کمک مدل‌های فیزیکی انجام می‌شود. در نتیجه کاربرد مدل‌های فیزیکی اجتناب ناپذیر است. عیب عمدۀ همه مدل‌های فیزیکی، ساختار ثابت و از قبل تعیین شده آنها است. چون بدین ترتیب آنها سیستم‌هایی را با مرتبه مشخص مدل می‌کنند. بنابراین مدل مطرح شده از قبل محدود شده است [۵۹ و ۶۰].

حد اعتبار این مدل ها در حدود چند صد کیلوهertz بوده و جهت افزایش حد اعتبار فرکانسی آنها، باید جزئیات مدل را افزایش داد. یعنی در مدل سازی باید تعداد گره ها یا خطوط انتقال را افزایش داد و به مدلسازی حلقه به حلقه رسید. یعنی واحد سیم پیج را حلقه انتخاب نمود و نه دیسک یا زوج دیسک.

در اینصورت با توجه به این که معمولاً هر سیم پیج فشار قوی شامل صدها حلقه است، در نتیجه مدار معادل ترانسفورماتور شامل گره های زیادی خواهد بود. کار با این چنین مدار بزرگی احتیاج به قدرت محاسباتی زیادی دارد و کاربرد آن بدون استفاده از روش های کاهش مرتبه مشکل است. به هر حال یک مدل کامل فرکانسی باید دارای مشخصات زیر باشد [۵۹].

الف - تأثیرات تلفات اثر پوستی در سیم پیچی لحاظ شده باشد.

ب - جریانهای گردابی و تلفات هیسترزین هسته لحاظ شده باشد.

ج - تأثیر فرکانس در کوپل مغناطیسی بین سیم پیچی ها لحاظ شده باشد.

د- تلفات دی الکتریک لحاظ شده باشد

تا کنون مدلهای مختلفی برای برای بررسی حالات گذراي سیم پیچی ترانسفورماتور ارائه شده است. مشهور ترین مدلهای مطرح شده از دیدگاه فیزیکی عبارتند از:

الف- مدل خط انتقال چند فازه

ب- مدل شبکه نردبانی جزئی

ج- مدل هیبرید

د- مدل مشروح<sup>۵۴</sup>

### ۱-۳-۵- مدل خط انتقال چند فازه [۶۱ و ۶۲]

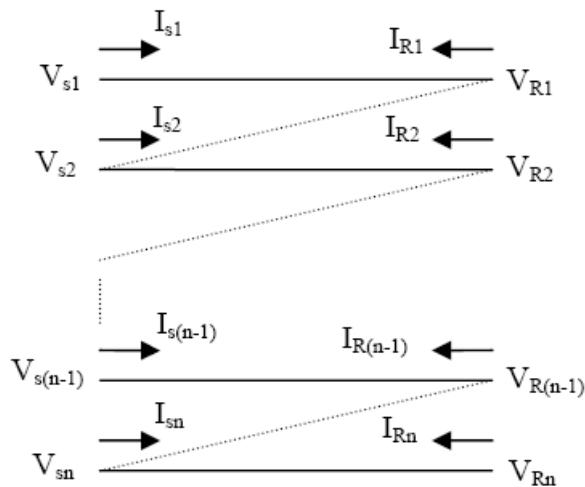
اگر سیم پیج ترانسفورماتور مورد مطالعه از نوع تک لایه همگن باشد، مدل تک فازه خط انتقال چند فازه نیز می تواند تا حدودی جوابگوی نیاز باشد. در این روش، مدل سازی سیم پیج بصورت

---

<sup>۱</sup>. Detail Model

خطوط  $n$  فازه ای است که از نظر مکانی با یکدیگر موازی هستند و از لحاظ الکتریکی سری شده اند(شکل(۱-۵)). این مدل نیز همانند مدلهای دیگر دارای حد اعتبار فرکانسی است.

اثبات صحت روش مدل سازی تا کنون فقط برای سیم پیچ ساده انجام شده است. بعلاوه در مدل مطرح شده از اثر پوستی و از اثر همجواری که باعث افزایش تلفات و میرایی می شوند صرف نظر گردیده است. همچنین در مدل ارائه شده برای مدل کردن سیم پیچهای مختلف باید هر حلقه را به عنوان یک خط انتقال در نظر گرفت که در این صورت یک سیم پیچ فشار قوی که دور زیادی دارد، با بیش از هزار خط انتقال مدل می شود که عملاً غیر ممکن است. مدل ارائه شده به این روش برای محاسبه تخلیه هایی با عرض پالس ۱۰۰ نانوثانیه تا ۱۰ میلی ثانیه مناسب می باشد.



شکل (۱-۵): مدل خط انتقال چند فازه [۶۱]

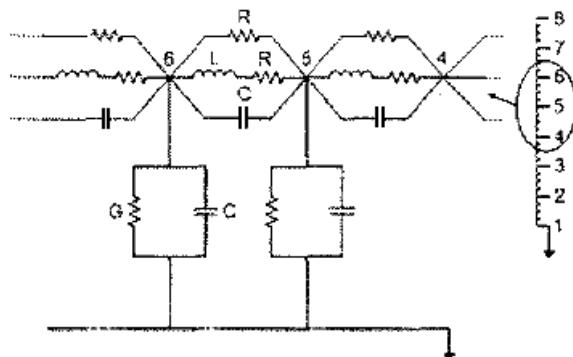
### ۲-۳-۵- مدل شبکه نرdbانی جزئی<sup>۵۵</sup> [۶۰]

در این نوع مدلسازی ترانسفورماتور را مانند یک شبکه نرdbانی مانند شکل(۲-۵) مدل می کنیم. مدل سیم پیچی فشرده - گسترده است و شرایط شبیه استاتیک در نظر گرفته می شود. کوپل مغناطیسی در این مدل، اندوکتانسها بین دورهای سیم پیچی می باشد. اندوکتانسها شامل اندوکتانس های خوی و متقابل می باشند. اندوکتانسها مغناطیس کنندگی شار مغناطیسی را بیان می کنند و تمام سیم پیچها را به هم متصل می کنند. این اندوکتانسها مقدار بالایی دارند و رفتار سیم پیچ را در سیستم قدرت تعیین می کنند. اندوکتانسها پراکندگی مبین

---

<sup>۱</sup>. Detail Ladder Network Model

شارهای پراکنده‌گی هستند و در واقع آنها هستند که رفتار گذرای سیم پیچ را تعیین می‌کنند. برای محاسبه خازنها فرض بر این است که شارهای مغناطیسی فرکانس بالا هسته را قطع نمی‌کنند و همچنین تلفات سیم پیچی ناچیز است. روش محاسبه این خازنها استفاده از خطوط انتقال چند فازه می‌باشد. در مقالاتی هم استفاده از مدل خازن دیسکی پیشنهاد شده است. مولفه‌های مقاومتی بیانگر تلفات در عایقهای میانی، جریانهای گردابی، مقاومت هادیها و اثر پوستی می‌باشند. این نکته قابل اهمیت است که با وجود اینکه مقاومت هادیها در فرکانسهای بالا بسیار قابل ملاحظه است ولی با این حال از آنها صرفظیر می‌شود. پارامتر کندوکتانس شامل تلفات خازنی در سیستم عایقی است، که مقدار آن به ضریب توان عایق، فرکانس و مولفه‌های خازنی وابستگی مستقیم دارد.



شکل (۲-۵): مدل شبکه نردنی جزئی برای سیم پیچ لایه ای [۶۰]

### [۶۳-۳-۵] مدل هیبرید

ساختمان پیچیده ترانسفورماتور و سیستم عایقی غیر یکنواخت آن مهمترین دلیل این نوع مدل سازی می‌باشد. این نکته حائز اهمیت است که در هر کدام از مدل‌سازی‌های ترانسفورماتور مانند مدل شبکه نردنی جزئی و مدل خطوط انتقال چند فازه محدودیتهای خاصی وجود دارد. بنابراین برای حذف این محدودیتها از مدل هیبرید استفاده می‌شود به این صورت که در ابتدا با استفاده از مدل شبکه نردنی جزئی پارامترهای مداری مدل هیبرید محاسبه و سپس بر اساس این پارامترها و فرمول سازی خطوط انتقال چند فازه مکان یابی خطا انجام می‌شود. محاسبه پارامترهای مدل هیبرید گذرا با استفاده از مدل‌های شبه استاتیک و قوانین الکترومغناطیس امکان پذیر است. برای تعیین این

---

<sup>۱</sup>. Hybrid Model

مدل عموما از ساختمان داده ها استفاده می شود. این روش توانایی مدلسازی انواع مختلف سیم پیچی ها مانند لایه ای ساده و درهم با سیستم عایقی یکنواخت و غیر یکنواخت و انواع مختلف سیم پیچی دیسکی را داراست، اما مهمترین مشکل در این نوع مدلسازی گستردگی پارامترهای مدلسازی می باشد. در این مدل از تکنیک های محاسباتی و بهینه سازی مدرن به همراه مدل خطوط انتقال چند فازه برای مکان یابی و چگونگی انتشار پالس استفاده می شود. روش مورد استفاده در مکان یای تخلیه محاسبه نرخ توزیع خازنی از روی توابع تبدیل است. با استفاده از مدل هیبرید توزیع ولتاژ در پاسخ به انواع مختلف ورودیها قابل آنالیز می باشد.

#### [۶۷-۴-۳-۵] مدل مشروح

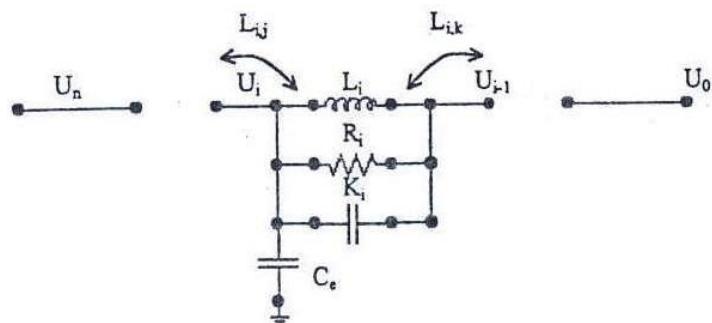
کوچکترین جزء یک سیم پیج فشار قوی، حلقه های آن است. از روی هم قرار گرفتن حلقه ها در جهت افقی، دیسکها بوجود می آیند و از اتصال دیسکها در جهت عمودی سیم پیج فشار قوی تشکیل می شود. هر دو دیسک مجاور که بر روی هم قرار گرفته اند، تشکیل یک زوج دیسک را می دهند. در مدلسازی مشروح ، اجزاء مدل در رابطه مستقیم با این واقعیتهای فیزیکی می باشند. یعنی سیم پیچی فشار قوی به اجزائی قسمت می شود. هر جزء سیم پیج دارای مفهوم فیزیکی است که آن را واحد سیم پیج می نامیم.

این روش مدل سازی جهت تعیین تنشهای عایقی داخلی سیم پیج بسیار کارآمد است، اما باید در تعیین پارامترهای مداری آن بسیار دقت شود. این پارامترها با توجه با اطلاعات مربوط به ابعاد هندسی ترانسفورماتور و مواد بکار رفته در آن تعیین می شوند. دقت مدلسازی در حوزه فرکانس وابستگی مستقیمی به مشروح بودن مدل دارد، یعنی هر چه جزئیات بیشتری در مدار آورده شده باشد حد اعتبار فرکانسی مدل بیشتر است.

شکل (۳-۵) نشان دهنده یک واحد سیم پیج فشار قوی از نوع دیسکی است و شکل (۴-۵) نشان دهنده مدار معادل این واحد است. همانگونه که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است همه المانها با عناصر متتمرکز مدل شده اند و با واحدهای دیگر نیز در ارتباط هستند.

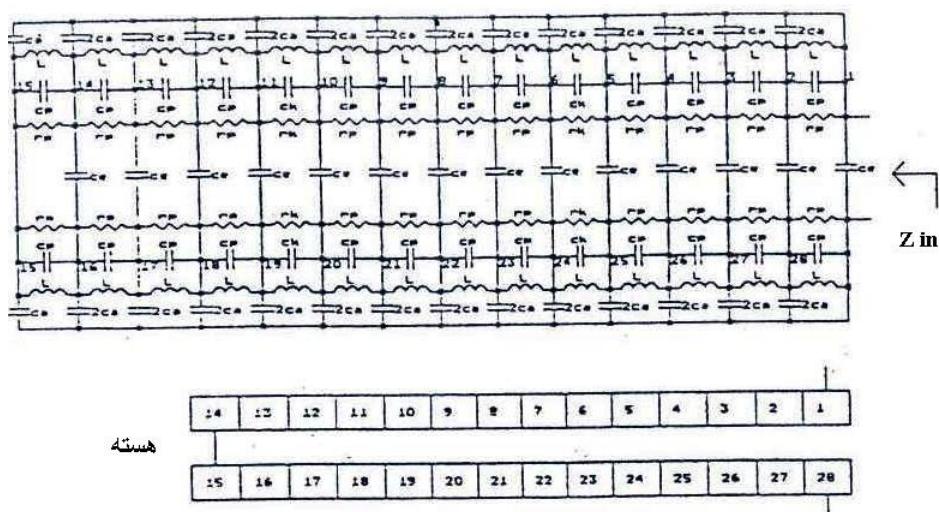


شکل(۳-۵): نمایش یک واحد به شکل دیسک از سیم پیچی نوع دیسکی [۶۳]

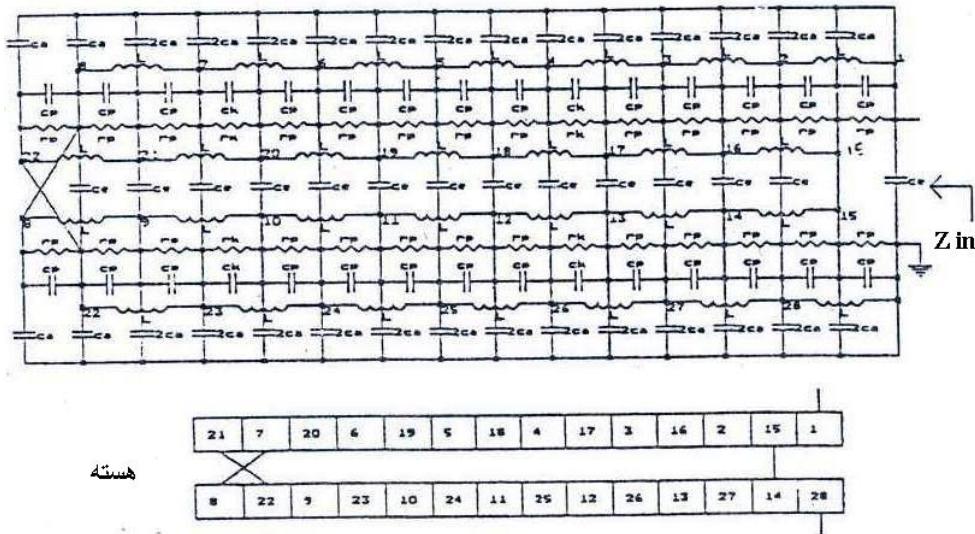


شکل(۴-۵): نمایش مدار معادل یک واحد سیم پیچ در مدل مشروح [۶۴]

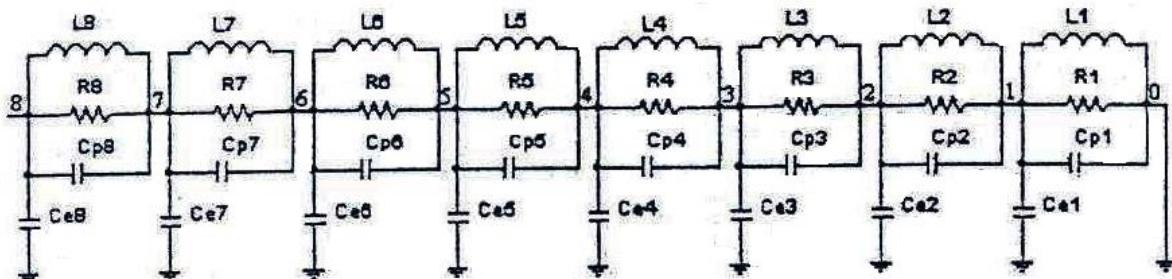
مدل واحد نشان داده شده در شکل (۴-۵) برای مدل مشروح عمومیت ندارد. چون حلقه های مجاور الکتریکی الزاماً مجاور مکانی نیستند، بنابراین در حالاتی دو سر شاخه های اندوکتانسی و ظرفیتی الزاماً به یک نقطه ختم نخواهد شد. اشکال (۴-۵، ۶-۵ و ۷-۵) به ترتیب مدار معادل یک زوج دیسک واژگون، یک زوج دیسک در هم و سیم پیچ فشار قوی را نشان می دهند.



شکل(۵): مدار معادل ۱۴ حلقه ای یک زوج دیسک واژگون [۶۴]



شکل(۶-۵): مدار معادل ۱۴ حلقه ای یک زوج دیسک در هم [۶۴]



شکل(۷-۵): مدار معادل سیم پیج فشار قوی شامل ۸ زوج دیسک سیم پیج فشار قوی [۶۴]

در واقع مساله از یک محیط پیوسته به یک محیط گستته کشانده شده است. شکل (۷-۵) حالت معمولی و ساده آن بوده و در تحلیل سیم پیج نوع دیسکی ساده مفید است. پارامترهای مدل برای واحد سیم پیج مطابق با شکل (۵-۳) به شرح ذیل تعریف می شوند.

نام: اندوکتانس معادل واحد  $\text{N}$  ام سیم پیج است که شار پراکندگی حلقه های  $\text{N}$  ام را نمایش می

دهد.

زی: القای متقابل بین واحد  $\text{N}$  و ز است.

کی: ظرفیت طولی معادل برای واحد  $\text{N}$  ام می باشد. این ظرفیت، تمامی ظرفیتهای خازنی موجود بین حلقه های واحد  $\text{N}$  ام را بصورت یک خازن باز نمایی می کند.

سی: ظرفیت خازنی بین واحد  $\text{N}$  ام و پتانسیل زمین است.

ری: تلفات الکتریکی را در عایق بندی واحد  $\text{N}$  ام مدل می کند.

برای بالا بودن اعتبار فرکانسی مدل، پریود فرکانس در حالات گذرا باید حداقل  $10 \text{ Tbig}$  برابر بزرگتر از  $T_{interest} > 10$  باشد تا شرط مشروط بودن برقرار باشد، (یعنی  $T_{interest} > 10$  به عبارت دیگر زمان عبور امواج الکترومغناطیسی روی بزرگترین جزء این مجموعه حداقل  $10$  برابر کمتر از پریود فرکانس های مورد مطالعه باشد.

برای اینکه اعتبار مدل را به حوزه های فرکانسی بالاتر بکشانیم باید مدل را مشروح تر کرد و نهایتاً واحد حلقه به حلقه را در نظر گرفت که این امر یک مزیت عمدی و همچنین یک عیب عمدی دارد. مزیت عمدی از نمایش حلقه به حلقه تحلیل و محاسبه دقیق رزونانس در حالت گذرا و فرکانس های بالاست و عیب عمدی آن وجود تعداد زیاد عناصر در مدار و نتیجتاً زمان محاسبات طولانی تر و نیازمندی به کامپیوترهای با سرعت بالامی باشد.

البته مشکل اساسی مدل مشروح مسئله تعیین پارامترهای مدل است. در مرحله طراحی پارامترهای مدل با یکی از روش های زیر تعیین می شوند.

الف- تحلیل میدان به کمک روش اجزاء محدود یا تفاضل محدود

ب- روش های تحلیلی - تقریبی

ج- روش شبیه سازی باز

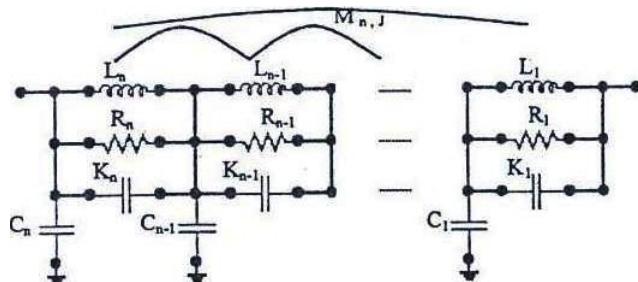
البته این پارامترها را می توان بعد از مرحله ساخت بر مبنای اندازه گیری حوزه زمان و یا حوزه فرکانس نیز بدست آورد ولی فرکانس های بالا، با شکل موجه ای پیچیده ای مواجه هستیم. در این حالت دیگر مفروضات ساده کننده مربوط به میدانهای الکترومغناطیسی صحیح نیستند ولی باید تقریب را پذیرفت و پارامترهای مدل را با تقریب در نظر گرفت. چگونگی محاسبه این پارامتر ها در ضمیمه ۱ آورده شده است.

از مهمترین مزیتها این نوع مدل سازی این است که در تمام المانها القاء متقابل در نظر گرفته شده است. برای روشن شدن مساله شکل (۸-۵) مدل مشروح ۸ واحد را نشان می دهد. بدیهی است، وابسته به نوع مطالعات واحد می توان یک حلقه، یک دیسک و یا یک زوج دیسک در نظر گرفته شود و با انتخاب واحد با توجه به نوع مطالعات می توان تنشهای ایجاد شده در قسمتهای مختلف سیم پیچ را ارزیابی نمود. این قسمتها بشرح زیر می باشند.

۱- تنشهای عایق بین حلقه های یک گروه کلاف

۲- تنشهای بین دو دیسک

۳- تنشهای بین فضای دو زوج دیسک



شکل (۸-۵): مدار معادل مدل مشروح در حالت‌های گذرا [۶۴]

پس از تخمین پارامترهای تک تک واحدها، یک مدار برای کل سیم پیچی بدست می‌آید که با استفاده از روش‌های موجود در تحلیل مدار می‌توان امپدانس دیده از ترمینال‌های سیم پیچ، فرکانس‌های تشديد تابع امپدانس ورودی و توابع انتقال ولتاژ و جريان را بدست آورد. سپس به کمک اين اطلاعات و شبیه سازی‌های لازم نقاط ضعف و قوت طراحی و همچنین امكان بررسی انواع خطاهای درونی ميسر می‌شود.

لازم به توضیح است که برخی از پارامترهای موجود در مدل مشروح وابسته به فرکانس می‌باشند. جزئیات مدل استفاده شده در ضمیمه ۲ آورده شده است.

با توجه به تمامی ملاحظات در رابطه با مدل‌های ارائه شده برای ترانسفورماتور می‌توان گفت: مدل مشروحی که بتواند فضاهای عایقی سیم پیچی را در فرکانس‌های بالا آشکار کند برای مبحث مکان یابی تخلیه جزئی قابل استفاده می‌باشد. به این منظور از مدل ارائه شده در مرجع [۶۴] استفاده می‌شود.

#### ۴-۵- نتیجه گیری

در مقایسه بین روش‌های فیزیکی مطرح شده می‌توان گفت که روش مدل‌سازی مشروح قابل انعطاف‌تر و مطمئن‌تر است و شبیه سازی آن در برنامه‌های نرم افزاری مانند MATLAB به سادگی

امکان پذیر است. نتیجه دوم این است که مدل سازی پدیده هایی مانند اشباع، هیسترزیس، تلفات مربوط به جریانهای گردابی در هسته، مدلسازی خطا های درونی و مدلسازی سیم پیچ های چند لایه چند فازه توسط آن به نحو ساده تر و موثرتری قابل انجام است. امتیاز دیگر روش مدل سازی مشروح در این است که برنامه های موجود سازندگان مبتنی بر این مدل است. بنابراین امکان هر گونه تغییر و تصحیحی در این مدل میسر و کم هزینه است با توجه به مزایای مدل مشروح نسبت به مدل خطوط چند فازه، در این تحقیق از مدل مشروح استفاده شده است..

## ۱-۶ - مقدمه

به منظور مدلسازی تخلیه جزئی در یک سیستم عایقی مدلهای استاندارد مختلفی از منبع تخلیه پیشنهاد شده است. بیشتر این مدلهای استاندارد منبع تخلیه، رفتاری استاتیکی دارند. از طرف دیگر برای مدلسازی شکست از مقاومتهای خطی ثابتی استفاده می شود. به ناچار در اینگونه مدلسازی ها از واقعیت های فیزیکی بیشماری چشم پوشی شده است. این موضوع باعث بوجود آمدن خطا در الگوریتمهای تفکیک کننده شکست و تخلیه می شود. به دلیل رفتارهای دینامیکی و تصادفی تخلیه جزئی مانند تصادفی بودن مکان حفره، تصادفی بودن مکانیزم تخلیه، تاثیرپذیری فرایند تخلیه از شکل و شرایط فیزیکی حفره، به یک مدلهایی غیرخطی برای شبیه سازی دقیقتر این پدیده احتیاج داریم. در این فصل به بهبود مدلسازی و شبیه سازی شکست-قوس الکتریکی و تخلیه الکتریکی می پردازیم. در این مدلسازیها از واقعیت های فیزیکی توسعه یافته تری برای رسیدن به نتایج واقع بینانه تر استفاده خواهد شد.

## ۲-۶ - نکات نادیده گرفته شده در مدلسازی شکست و تخلیه جزئی

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش ۱-۲-۳، ۲-۲-۳، ۳-۲-۳ و ۴-۳ چند نکته اساسی قابل بیان است.

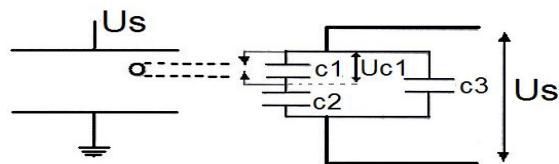
الف- به علت طبیعت پیچیده و ساختار ترکیبی عایقی و سیم پیچی ترانسفور ماتورهای قدرت، مکان یابی خطاهای گذرا و کوچک مانند شکست در بخشی از سیم پیچی و یا تخلیه های جزئی بسیار مشکل می باشد.

- ب- تاکنون مدلسازی موثری برای خطاهای گذرا و کوچک (شکست و تخلیه الکتریکی جزئی) بصورت همزمان در یک ساختار عایقی ترانسفورماتور غیر همگن صورت نگرفته است.
- ج- خطاهای دائمی یا اتصال کوتاهها (با هدایت کم و ثابت) که در پروسه های مدلسازی خط در هنگام آزمایش ضربه مورد استفاده قرار گرفته است تنها برای ساختارهای ساده سیم پیچی معتبر می باشد و این نوع مدلسازی برای شناسایی و کلاسه بندی شکل موجهای جریانی ترانسفورماتور قادر قابل استفاده نیست.
- د- بدلیل وابستگی شکل موج های تخلیه به مکان تخلیه، مدلسازی مکانی حفره امری ضروری است
- ۵- بدلیل وابستگی پدیده تخلیه جزئی به شکل حفره مدلسازی دینامیکی حفره امری ضروری است.

### ۳-۶- مدلسازی تخلیه جزئی [۶۸]

#### ۳-۱-۶- مدل سه خازنی تخلیه الکتریکی برای ولتاژ AC

در عایق های جامد و مایع مهمترین عامل بروز تخلیه های جزئی حفره های موجود در عایق هستند. در شکل (۱-۶) عایق و حفره<sup>۵</sup> داخل آن همراه با مدل ساده ای برای آن نمایش داده شده است. در این مدل خازنهای  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  خازن به ترتیب خازن معادل کل عایق، خازن حفره و خازن عایق سری با حفره هستند. مقادیر این خازنها به صورت ( $C_3 > C_1 > C_2$ ) می باشد.



شکل(۱-۶): مدل ساده شده مداری یک سیستم عایقی با یک حفره داخل آن برای ولتاژ AC [۶۸]

با اعمال ولتاژ AC با دامنه ماکزیمم  $V_0$  به دو سر عایق، یک ولتاژ طبق رابطه (۱-۶) دو سر حفره قرار می‌گیرد. همانطور که گفته شد دو شرط لازم و کافی برای وقوع تخلیه جزئی لازم است. اولاً، ولتاژ دو سر حفره از ولتاژ شکست حفره بیشتر باشد. این ولتاژ با  $V_{min}$  در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. ثانیاً، حداقل یک الکترون در مکانی مناسب برای شروع فرایند یونیزاسیون وجود داشته باشد. ظهور این الکترون یک فرایند اتفاقی است، در نتیجه وقوع تخلیه را به تاخیر می‌اندازد. این تاخیر زمانی که با  $T_L$  نمایش داده می‌شود، باعث افزایش ولتاژ دوسر حفره به اندازه  $\Delta V$  می‌شود. بعد از وقوع تخلیه ولتاژ دو سر حفره تا مقدار  $U_L$  افت می‌کند. ولتاژ شروع مجدد تخلیه یعنی  $U_L$  اغلب بسیار کوچک و قابل صرفنظر کردن است، ولی مقدار دقیق آن طبق رابطه (۲-۶) قابل محاسبه است [۶۹].

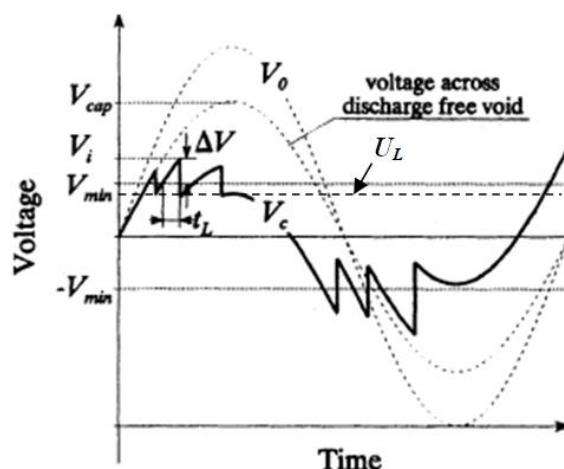
(۱-۶)

$$V_{cap} = V_0 \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

(۲-۶)

$$U_L = PDIV = 26.5(p^* t) + 0.55[KV, rms]$$

در رابطه بالا  $p$  بیانگر فشار داخل حفره بر حسب اتمسفر و  $t$  ضخامت حفره بر حسب سانتیمتر می‌باشند. هر بار که شرایط لازم و کافی برای شروع تخلیه برآورده شود، تخلیه جزئی دوباره تکرار می‌شود. این عمل عیناً در پریود منفی نیز تکرار می‌شود. تغییرات ولتاژ خازن دو سر حفره به هنگام بروز تخلیه در شکل (۲-۶) بصورت منحنی تیره رنگ نشان داده شده است.

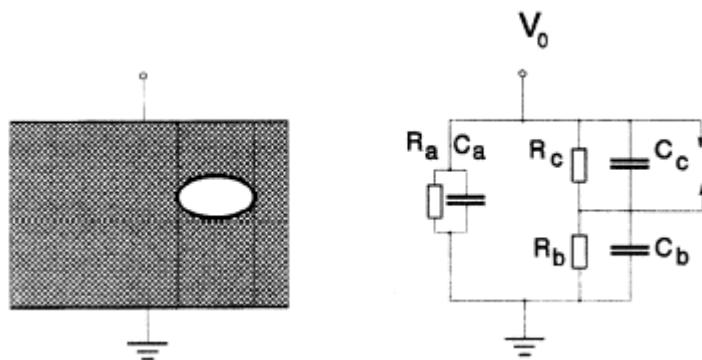


شکل(۲-۶): چگونگی شکست حفره و شکل گیری فرایند تخلیه الکتریکی در حفره داخلی عایق تحت ولتاژ

[۶۸]AC

### ۲-۳-۶- مدل سه خازنی حفره برای ولتاژ DC

برای مدلسازی تخلیه در یک حفره تحت ولتاژ DC استفاده از مدل سه خازنی شکل (۳-۶) پیشنهاد شده است. در این مدل مقاومتهای  $R_a$  و  $R_b$  به ترتیب مقاومت نشتی کل عایق، مقاومت سطحی حفره، و مقاومت نشتی سری با حفره هستند. در این مدل ثابت زمانی شارژ حفره طبق رابطه (۴-۶) قابل بیان است. وقتی ولتاژ DC به دو سر عایق اعمال می شود، ولتاژی طبق رابطه (۴-۶) دو سر حفره تشکیل می شود. با وقوع تخلیه ولتاژ دو سر حفره افت می کند. در تئوری ولتاژ دو سر حفره بعد از تخلیه طبق رابطه (۵-۶) بدست می آید. ولی در عمل ولتاژ این ولتاژ طبق رابطه (۲-۶) محاسبه می شود.



شکل(۳-۶): مدل ساده شده مداری یک سیستم عایقی با یک حفره داخل آن برای ولتاژ DC [۶۸]

(۳-۶)

$$\tau = \frac{R_a R_b (C_b + C_a)}{R_a + R_b}$$

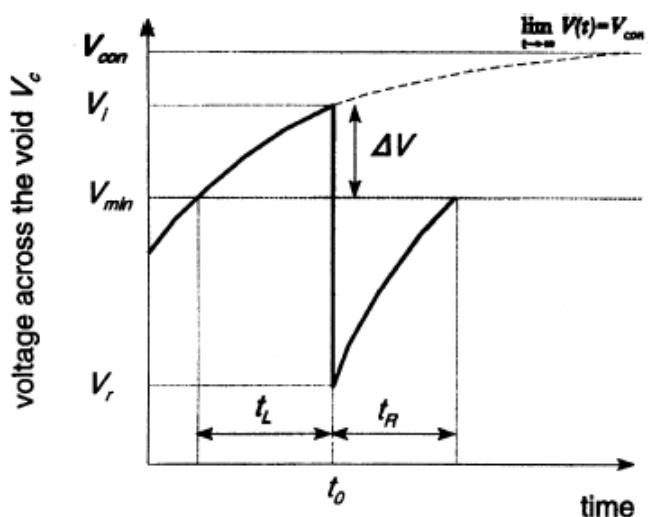
(۴-۶)

$$V_C(t) = V_{C,\infty} - (V_{C,\infty} - V_r) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

(۵-۶)

$$V_{C,\infty} = V \frac{R_C}{R_b + R_C}$$

فرایند تخلیه در عایق تحت ولتاژ DC دقیقاً شبیه به ولتاژ AC است. با این تفاوت که ولتاژ شروع مجدد تخلیه ( $U_l$ ) در تخلیه های متوالی عملاً متفاوت است. چگونگی این فرایند همچنین ولتاژ های  $V_r$  و  $V_{c,\infty}$  در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل (۴-۶): چگونگی شکست حفره و شکل گیری فرایند تخلیه الکتریکی در حفره داخلی عایق تحت ولتاژ DC [۶۸]

#### ۶-۴- گنجاندن مفهوم مکان و رشد شبیه استاتیک در مدل های حفره ای تخلیه

همانطور که اشاره شد، برای مدل سازی حفره ای در یک سیستم عایقی مدل سه خازنی یا تخلیه کامل پیشنهاد شده است. در این مدل در هنگام وقوع تخلیه انرژی ذخیره شده خازن حفره از طریق یک مقاومت موازی با آن تخلیه می شود، اما دو نکته در این مدل سازی قابل اهمیت است.

الف- تخلیه ها با افزایش دامنه ولتاژ اعمالی بر عایق شروع شده و بعد از رسیدن ولتاژ دو سر حفره به یک مقدار بسیار کوچک (نزدیک صفر) خاموش می شوند [۷۰]. در حین این فرایند، بار درون حفره با یک اتصال کوتاه از طریق یک مقاومت کوچک آزاد می شود. این مقاومت شامل عناصر و ترکیبات

ارگانیک و کربونیزه شده است [۲۳]. در تخلیه بعدی عناصر و ترکیبات ارگانیک باقیمانده از تخلیه قبلی مقاومت کوچکتری را در مسیر اتصال کوتاه قرار می دهد. بنابراین استفاده از یک مقاومت متغیر با زمان یا شیب منفی و یا بطور ساده تر دو مقاومت متفاوت برای تخلیه های مثبت و منفی به این صورت که مقاومت در هنگام تخلیه با دامنه منفی کوچکتر از مقاومت دیگر باشد پیشنهاد می شود.

ب- این مفهوم به هندسه، مکان و مواد عایقی و رسانای اطراف حفره که نقش آندی و کاتدی را در هنگام اعمال ولتاژ را بر عهده می گیرند، وابسته است . رفتار مس، بدنه و هسته در نقشهای آندی و کاتدی، وابسته به پلاریته ولتاژ اعمالی به آنها است، اما رفتار الکترودهای دو سر حفره در نقش کاتدی و آندی با اینکه وابسته به پلاریته ولتاژ اعمالی است. وقتی یک ناحیه درونی از عایق کاتد می شود و تخلیه ها در سطح عایق اتفاق می افتد رفتار عایق مانند پلاسمای شود. پلاسمایک منبع بسیار غنی از الکترونها آزاد برای تغذیه تخلیه است بصورتیکه سطح تخلیه با تغییر سطح و طبیعت پلاسمایک تغییر می کند. در نتیجه وقتی عایق نقش کاتد را بازی می کند تخلیه های بزرگتر اتفاق می افتد [۲۳]. بنابراین اگر حفره نزدیک سیم مسی بود دامنه تخلیه ها با پلاریته منفی از تخلیه های مثبت، اگر حفره نزدیک به هسته یا بدنه باشد دامنه تخلیه با پلاریته مثبت بزرگتر خواهد بود.

برای گنجاندن این مفهوم در مدلسازی مدل تخلیه پیشنهاد می شود که: زمانی که هدف مدلسازی حفره ای نزدیک سیم مسی باشد، حد ولتاژ بحرانی شکست منفی حفره بزرگتر از حد ولتاژ شکست مثبت منظور گردد. وقتی هدف مدلسازی حفره ای در لایه های درونی عایق بین بدنه یا هسته و سیم مسی است، حد ولتاژ بحرانی مثبت و منفی برابر درنظر گرفته شود؛ و زمانی که هدف مدلسازی حفره ای نزدیک بدنه یا هسته است، حد ولتاژ بحرانی شکست مثبت بزرگتر از منفی درنظر گرفته شود. با این ملاحظات مدل توسعه یافته ای وابسته به مکان برای حفره ای با ابعاد و مشخصات الکتریکی مشخص خواهیم داشت.

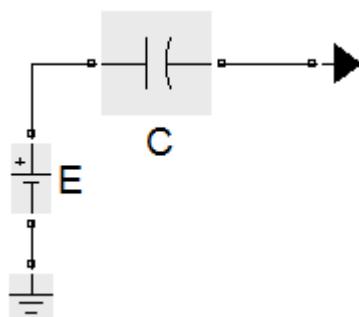
## ۶-۵- مدل منبع جریانی تخلیه جزئی

تخلیه جزئی همانند یک منبع جریان ضربه<sup>۵۸</sup> عمل می کند و بر همین اساس سه روش زیر در استانداردها و مقالات مختلف برای شبیه سازی منبع تخلیه پیشنهاد شده است [۷۱] که عبارتند از :

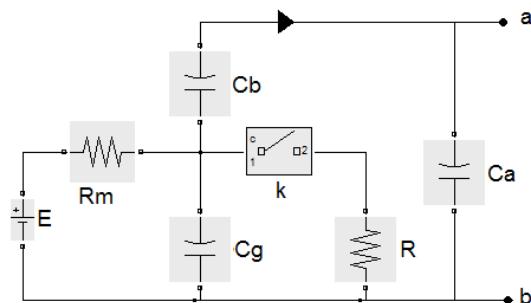
الف- در محاسبات تئوری معمولاً از یکتابع ضربه (دیراک) استفاده می شود.

ب- از داده های بدست آمده از اندازه گیری های آزمایشگاهی می توان برای شبیه سازی به استفاده کرد.

ج- در اغلب تحقیقات انجام شده، از شبیه سازی مدارهای تولید کننده پالس های ضربه جریانی استفاده می شود. چند نمونه از این مدارها در اشکال (۶-۵) تا (۶-۷) نشان داده شده اند.



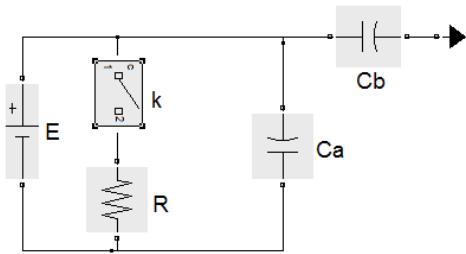
شکل (۶-۵): مدار مدل کننده پالس PD، مدل (الف)



شکل (۶-۶): مدار مدل کننده پالس PD، مدل (ب)

---

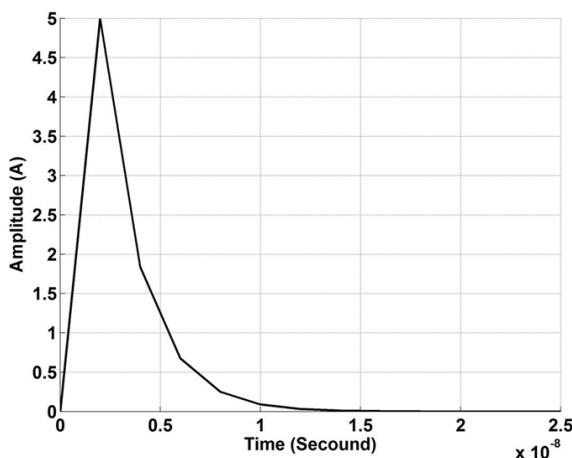
<sup>۵۸</sup>. Very steep wave-front and short duration



شکل (۷-۶): مدار مدل کننده پالس PD، مدل (ج) [۷۳]

پارامترهای مدل (الف و ب) باید مطابق با استاندارد IEEE C57, 113-1991 باشند [۷۲]. مشخصات مدل (ج) نیز ارائه شده است [۷۳]. بجز مدل های فوق، از مدارهای الکترونیکی نیز برای تولید پالس های جریانی ضربه می توان استفاده نمود.

در این تحقیق مدار (ج) در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است . شکل موج تولید شده توسط این مدار در شکل (۸-۶) نشان داده شده است. زمان خیز این پالس حدود ۲ نانو ثانیه و پهنهای پالس ۲۰ نانو ثانیه است. این پارامترها شبیه خصوصیات و نتایج ناشی از تست های آزمایشگاهی است.



شکل (۸-۶): پالس جریانی تخلیه جزئی

بدیهی است که برای تولید پالسهایی با مشخصات متفاوت مقادیر المانهای این مدار باید عوض شوند، لذا برای تسهیل در این امر از تولید کننده های پالس مصنوعی<sup>۵۹</sup> در نرم افزار MATLAB

---

<sup>۱</sup>. Signal builder

استفاده می شود. این تولید کننده پالس قابلیت تولید پالسهای تخلیه با مشخصات دلخواه را دارد. بنابراین یک منبع دینامیک از تخلیه در دست خواهیم داشت. گنجاندن مفاهیمی همچون تصادفی بودن تخلیه و یا وابستگی منبع به فرکانس در این مدل به سادگی امکان پذیر است. جزئیات این منبع در ضمیمه ۲ آورده شده است.

## ۶-۶- مدلسازی شکست

مدلسازی دقیق شکست همراه با قوس در گازها بصورت مدلهای مقاومتی و اندوکتانسی همیشه مورد توجه محققان بوده است [۷۴، ۷۵، ۷۶ و ۷۷]. اهمیت این مبحث در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند سوئیچ های فوق سریع، مدار شکن ها و کوره های القایی نشان داده شده است. در این میان مدلهای فراوانی به فرم دیفرانسیلی کامل و یا عددی توسعه یافته اند که می توان به مدلهای کشی<sup>۶۰</sup>، [۷۵]، ویاستوس<sup>۶۱</sup> و مایر<sup>۶۲</sup> [۷۶] اشاره نمود. عمدہ پارامترهای مهم در این مدلها جریان کanal، شعاع قوس، فاصله هوایی و ثابت های اتلاف توان هستند. وقت هر یک از این مدلها وابسته به جریان کanal و شرایط آزمایش است. اخیراً تحقیقاتی در زمینه مقایسه این مدلها با شرایط عملی و پیشنهادی برای اصلاح این مدلهای دینامیکی صورت پذیرفته است [۷۸].

می توان گفت به دلیل عدم وجود یک تئوری توصیفی برای تشریح رفتار فیزیکی حالت مایق، تئوری شکست الکتریکی در مایعات کمتر از گازها توسعه یافته است [۷۹]؛ و عمدتاً از توسعه مدلهای گازی در فواصل هوایی کوتاه و فشار پایین برای تخمین مدلهای شکست در مایعاتی مانند روغن استفاده شده است [۷۹]. تئوریهای بیان شده در این زمینه به چندین گروه طبقه بندی می شود. از این میان آقای تانزن<sup>۶۳</sup> بیان می کند که روند شکست ابتدا بوسیله یک مقاومت منفی بزرگ در فاز شکست شروع می شود و سرانجام با یک مقاومت کوچک مثبت در فاز قوس دنبال می شود. بنابراین دریافته می شود که استفاده از یک مقاومت خطی ثابت برای مدلسازی رفتار شکست و قوس کفايت نمی کند.

---

<sup>۱</sup>. Cassie

<sup>۲</sup>. Viastos

<sup>۳</sup>. Vayr

<sup>۴</sup>. Townsend

اولین معادلات برای تشریح رفتار مقاومتی قوس توسط کشی و مایر بیان شدند. در مدل کشی بیان شده است که مدل قوس یک چگالی جریان ثابت دارد و سطح مقطع این جریان با تغییر اندازه جریان تغییر می کند. همچنین در این مدل از یک مقاومت برای ذخیره انرژی در واحد حجم استفاده شده است. هوا و مواد دیگر از منفذ سطح مقطع قوس شارش می کنند و باعث اتلاف در واحد حجم می شود. دو عیب عمدۀ این مدل در این مبحث در عدم قابلیت قطع جریان و پایین بودن دقت آن برای جریانهای با دامنه پایین (در حد آمپر)، قابل بیان است.

در مدل مایر فرض بر این است که تلفات گرمایی تنها در اطراف قوس اتفاق می افتد و کندوکتانس قوس با انرژی ذخیره شده در آن تغییر می کند. این مدل قابلیت قطع جریان را دارد. همچنین استفاده از این مدل برای جریانهای نزدیک صفر پیشنهاد شده است [۸۰].

(۷-۶)

$$G(t) = \frac{i^2}{P_0} - \theta \frac{dG}{dt}$$

در رابطه بالا  $P_0$  ثابت تلفات توان و  $\theta$  ثابت زمانی قوس است. این ثابت زمانی معادل با انرژی ذخیره شده در واحد حجم تقسیم بر نرخ تلفات انرژی در واحد حجم می باشد. همچنین با تعیین شرایط اولیه مناسب مقاومت در فاز شکست قابل بیان است. اگرچه اعتبار این مدل برای جریان های کوچک و همچنین داشتن قابلیت قطع قوس به اثبات رسیده است، ولی گاهی در پیاده سازی این مدل در نرم افزار با مشکل مواجه می شویم، بنابراین با اندکی ملاحظه، برای شبیه سازی سه فاز شکست، قوس و قطع قوس از مقاومت سه مرحله ای به شکل رابطه (۸-۶) استفاده می کنیم.

$$R(t) = \begin{cases} R_b & t_0 \leq t < t_1 \\ \frac{I}{G(t)} & t_1 \leq t < t_2 \\ R_d & t_2 \leq t \end{cases}$$

(۸-۶)

که  $t_0$  زمان بروز شکست،  $t_1$  زمان ظهر قوس و پایان فاز شکست و  $t_2$  زمان قطع قوس با یک مقاومت بسیار بالا می باشد.

## ۷-۶- نتیجه گیری

در این فصل پس از بررسی تئوریهای کلاسیک موجود، یک مدل دینامیکی و یک مدل شبیه استاتیکی جدید برای تخلیه جزئی ارائه شد. بدنبال آن پس از بررسی رفتار شکست در مایعات و مطالعه انواع مدل‌های شکست الکتریکی، یک مدل غیر خطی برای شکست الکتریکی ارائه شد. با اینگونه مدل‌سازی‌ها به داده‌های واقع بینانه تری که در الگوریتمهای آشکارسازی خطا استفاده می‌شوند؛ دست خواهیم یافت. شناسایی دقیق الگوها و کلاسه بندی شکل موجهای جریان زمین در آزمایش ضربه بر روی یک ساختار پیچیده ترانسفور ماتور و یافتن معیارهای مکانیابی مناسب با استفاده از شبیه سازی نرم افزاری از نتایج این نوع مدل‌سازی‌ها هستند. نتایج شبیه سازی و تحلیل مدل‌های مطرح شده در فصل هشتم ارائه خواهد شد.

## ۱-۷- مقدمه

تبديلهای زمان-فرکانس<sup>۶۴</sup> و زمان-مقیاس<sup>۶۵</sup> در ۲۰ سال اخیر بطرز چشم گیری توسعه یافته است این روند تکاملی در کنار پیشرفت دستگاههای دیجیتالی، ما را قادر به تحلیل سیگنالهای تخلیه جزئی ساخته است [۸۱].

روش مرسوم برای مطالعه سیگنال تخلیه جزئی روش تحلیل فوریه<sup>۶۶</sup> می باشد. این روش پایه و اساس نمودارهای پاسخ فرکانسی و طیف فرکانسی می باشد. تبدیل فوریه برای سیگنالهای زمانی پریودیک بسیار کارساز می باشد . براساس این فرضیه : سیگنال ورودی که در حوزه زمان است می

---

<sup>۱</sup>. Time-frequency transform

<sup>۲</sup>. Time-scale transform

<sup>۳</sup>. Fourier transform

تواند به یک سری از توابع سینوسی و کسینوسی در حوزه زمان تبدیل شود. این روش که به عنوان قدیمی ترین روش تحلیل سیگنال ها شناخته شده است عملاً تنها برای سیگنالهای ایستای خطی مفید می باشد. اما این روش وقتی به سیگنال های غیرخطی و غیر ایستا اعمال می شود با محدودیتهای جدی مواجه می شود. بنابراین استفاده از تبدیل فوریه برای تحلیل این چنین سیگنالهای روش مفیدی نمی باشد. بنابراین ایده کنونی در بین مهندسان صنعت برق استفاده از تبدیل های زمان-فرکانس برای تحلیل و بررسی موثراین نوع سیگنال ها می باشد. لذا در این فصل انواع تبدیلهای زمان-فرکانس و زمان-مقیاس و همچنین کارایی آنها مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲-۷- تبدیل هیلبرت-هوانگ<sup>۶۷</sup>(HHT)

در این روش سیگنال زمانی اندازه گیری شده بوسیله توزیع هوانگ به مجموعه ای از زیر تابعها طبق معادله (۱-۷) تجزیه می شود، سپس به هر یک از این زیر توابع تبدیل هیلبرت<sup>۶۸</sup> [۸۳] (۲-۷) اعمال می شود.

(۱-۷)

$$X(t) = \sum_{j=1}^n C_j + r_n$$

(۲-۷)

$$Y(t) = \frac{I}{\pi} P \int \frac{x'(t)}{t-t'} dt'$$

در معادلات بالا  $X(t)$  سیگنال ورودی،  $C_j$  زیر توابع بدست آمده از تبدیل هوانگ و  $r_n$  باقیمانده سیگنال است. همچنین در تبدیل هیلبرت  $P$  مقدار کوشی<sup>۶۸</sup> است.

---

<sup>۶۷</sup>. Hibert-Huang Transform

لذا سیگنال تحلیلی (۳-۷) به شکل زیر قابل تعریف است.

$$Z(t) = x(t) + y(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (3-7)$$

(۳-۷-الف)

$$a(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}$$

$$\theta(t) = \operatorname{Arctan} (Y(t) / x(t))$$

که در آن  $a(t)$  دامنه و  $\theta(t)$  فاز سیگنال تحلیلی است.

فرکانس های زاویه ای لحظه ای در این تبدیل به صورت زیر قابل تعریف می باشد.

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$$

در مراجع تعاریف مختلفی برای فرکانس های لحظه ای ارائه شده است از جمله مهم ترین آنها، می توان به موارد زیر اشاره کرد [۸۴].

(۳-۷-ب)

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (\arg Z(t))$$

$$f(t) = \operatorname{img} \left( \frac{1}{Z(t)} \frac{dZ(t)}{dt} \right)$$

با تعاریف بالا باز سازی سیگنال اصلی از سیگنال تبدیل هیلبرت به صورت زیر قابل تعریف است

.(۴-۷)

(۴-۷)

$$X(t) = RP \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int w_j(t) dt}$$

که در آن  $RP$  عملگر قسمت حقیقی است.

<sup>۱</sup>. Cauchy value

در حالی که قبل<sup>۱۹</sup> باز سازی سیگنال اصلی از مولفه دامنه و فرکانس بوسیله تبدیل فوریه به صورت زیر بوده است(۵-۷).

(۵-۷)

$$X(t) = RP \sum_{j=1}^n a_j e^{i \omega_j t}$$

توزیع زمان- فرکانس- دامنه به شکل  $H(w,t)$  به طیف فرکانس- زمان- دامنه هیلبرت مشهور می باشد. ویژگی بارز این روش قابلیت تحلیل سیگنالهای غیر خطی وغیر ایستا و تعیین دامنه های حد اکثر سیگنال است. و مهمترین عیب آن شاید در پیچیدگی پیاده سازی، نداشتن عملگر های تصحیح کننده مانند عملگر حذف نویز می باشد. این روش عملا برای سیگنالی که تعداد نقاط اکسترمم آن از نقاط عبور از صفرش<sup>۲۰</sup> حداقل بیشتر از یکی باشد، کارایی ندارد.

### ۳-۷- تبدیل فوریه زمان کوتاه<sup>۲۱</sup> (STFT) [۸۵ و ۸۳]

در این روش سیگنال پیوسته یا نمونه برداری شده در حوزه زمان با استفاده از توابع پنجره ساز، پنجره ای می شود و سپس از هر یک از این پنجره ها تبدیل فوریه به عمل می آید(شکل(۱-۷)). فرم تحلیلی این تبدیل به شکل پیوسته طبق رابطه (۶-۷) محاسبه می شود..

(۶-۷)

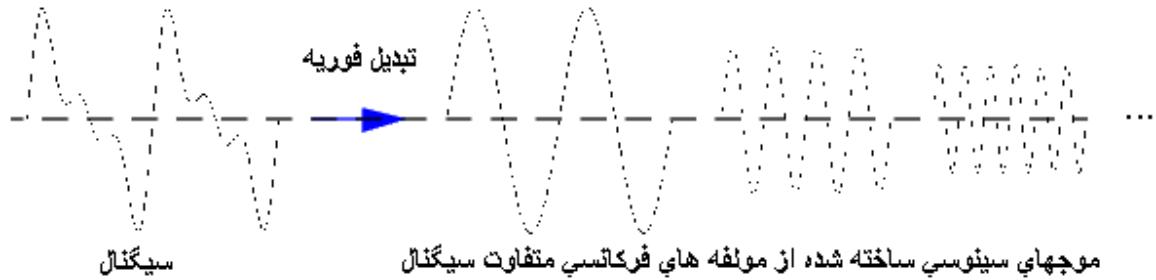
$$G_s(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(u) g(t-u) e^{-i \omega u} du$$

در رابطه بالا  $g(t-u)$  تابع پنجره ساز و  $s(u)$  سیگنال ورودی است.

<sup>۱۹</sup>. Zero crossing point

<sup>۲۰</sup>. Short Time Fourier Transform (STFT)

ضرائب  $G_s(t, f)$  وابسته به سیگنال ورودی است این ضرائب در بازه  $(t-m, t+m)$  قرار می‌گیرند. در اینجا عرض پنجره  $2m$  است.



شکل(۱-۷): نمایی شماتیک از تبدیل STFT [۸۳]

### ۷-۳-۱- طیف انرژی سیگنال نمونه برداری شده با استفاده از STFT [۸۶]

اگر سیگنال ورودی شامل دنباله  $x(n) = [x_1 \dots x_n]$  باشد و پنجره‌ای به وزن  $w(n) = [w_1 \dots w_n]$

آن را وزن دهی کند آنگاه طیف انرژی سیگنال به صورت معادله (۷-۷) قابل تعریف است:

(۷-۷)

$$s(e^{i\omega}) = \frac{\frac{1}{n} \left| \sum_{l=1}^n w_l x_l e^{-i\omega l} \right|^2}{\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n |w_l|^2}$$

### ۷-۴- تبدیل موجک گسسته (DWT) [۸۷ و ۸۸]

در این تبدیل سیگنال ورودی بوسیله تابع موجک مقیاس <sup>۷۲</sup> می‌شود، این روند با اعمال شیفت های <sup>۷۳</sup> زمانی بر روی توابع موجک، تا آخر سیگنال ادامه می‌یابد. به این ترتیب می‌توانیم تمام موج ورودی را مقیاس کنیم. این مطلب در شکل(۲-۷) نشان داده شده است. توابع موجک وابسته به

۱. Discrete Wavelet Transform

۴. Haar

۷. Mexican hot

۲. Scale

۵. Daubechies

۸. Morlet

۳. Transition

۶. Symlet

۹. Coiflet

کاربرد و خصوصیات پایه ای آنها انواع مختلفی دارند. از جمله می توان به موجک های هار<sup>۷۴</sup>، دابچیز<sup>۷۵</sup>، سیمیلت<sup>۷۶</sup>، مکزیکن هات<sup>۷۷</sup>، مورلت<sup>۷۸</sup> و کویفلت<sup>۷۹</sup> اشاره نمود.

از ویژگیهای پایه ای و بارز توابع موجک، میرایی سریع، انرژی محدود و برابر با یک، انتگرال زیر منحنی صفر و نوسانی بودن آنها می باشد. تعریف تحلیلی پیوسته این تبدیل به صورت (۸-۷) است.

(۸-۷)

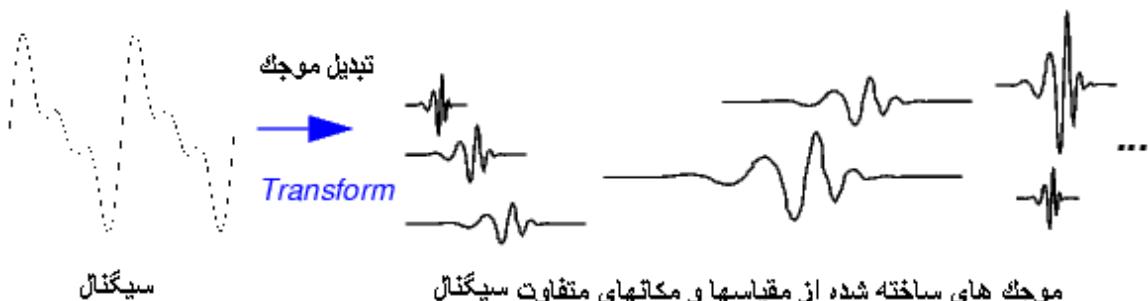
$$c(a,t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(u) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-u}{a}\right) du$$

که در آن  $a$  عملگر مقیاس و  $t$  عملگر شیفت دهنده زمانی است.  
در هر مقیاس یک فرکانس برای موج تجزیه شده به صورت زیر قابل تعریف می باشد.

(۹-۷)

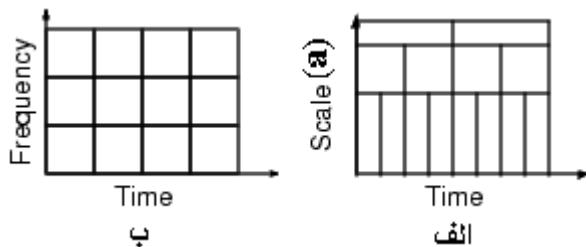
$$Fa = \frac{Fc}{a \cdot \Delta}$$

که در آن  $a$  مقیاس تابع موجک،  $\Delta$  پریود نمونه گیری و  $F_C$  فرکانس مرکزی تابع موجک می باشد.



شکل(۲-۷): نمایی شماتیک از تبدیل موجک [۸۸]

همانگونه که در شکل(۳-۷) نشان داده می شود، ضرائب  $C(a,t)$  وابسته به سیگنال ورودی و در بازه  $(t-am, t+am)$  به عرض  $2am$  است. طول پنجره در تبدیل STFT ثابت ولی طول پنجره در تبدیل موجک با تغییر مقیاس تغییر می کند.



شکل(۳-۷): مقایسه پنجره های زمان-فرکانس در تبدیل موجک (الف) و فوریه پنجره ای شده (ب) [۸۸]

#### ۱-۴-۷- مزايا و معایب تبدیل موجک گستته

انعطاف پذيری<sup>۸۰</sup> در پنجره سازی با توجه به سیگنال ورودی، استخراج مولفه های فرکانس پايان و بالاي سیگنالها، خواص نويز زدائي و فشرده سازی و پياده سازی سريع و آسان از مهمترین مزاياي اين تبدیل می باشد. اما مهمترین عيبهای آن شامل پيچيدگی در تفسير الگوهای بدست آمده از تبدیل، سردر گمی در انتخاب موجک مناسب و نداشتن رزولوشن مشخص فرکانسی است.

#### ۵-۷- تبدیل ويگنر- وايل [۸۹]<sup>۸۱</sup>

در اين تبدیل ابتدا با استفاده از تبدیل هيلبرت يك سیگنال تحليلي از سیگنال ورودی ساخته می شود و سپس تبدیل ويگنر (۱۰-۷) روی آن اعمال می شود.

(۱۰-۷)

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} Z(t + \frac{\tau}{2}) \cdot Z^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-i 2\pi f \tau} d\tau$$

<sup>۸۰</sup>. Flexibility

<sup>۸۱</sup>. Wigner–Ville Distribution (WVD)

سیگنال تحلیلی به صورت زیر می باشد. عملگر  $H$  مبین تبدیل هیلبرت می باشد.

(الف) ۱۱-۷)

$$Z(T) = x(t) + i H[x(t)]$$

(ب) ۱۱-۷)

$$\begin{cases} Z(f) = 2 \cdot x(f) & f > 0 \\ Z(f) = x(f) & f = 0 \\ Z(f) = 0 & f < 0 \end{cases}$$

در اندازه گیریهای بدون وقفه<sup>۸۲</sup> ولی همراه با تاخیر برای اینکه رزولوشن فرکانسی را بدون بر هم زدن رزولوشن زمانی بالا ببریم، می توانیم سیگنال ورودی را با یک پنجره زوج ضرب کنیم و بعد این تبدیل را اعمال کنیم.

از تبدیلات دیگر زمان فرکانس می توان به تبدیل گوبار<sup>۸۳</sup> [۹۰] و تبدیل  $\kappa - \gamma$  [۹۱] اشاره کرد. عمدۀ کاربرد این دو تبدیل در تحلیل سیگنالهای الکتروکاردیوگرافی و مخابراتی گزارش شده است. همانطور که گفته شد اساس مباحثی همچون مکانیابی، کلاسه بندی و شناخت فیزیکی خطا همانا نویز زدایی واستخراج اطلاعات پایه ای از سیگنالهای گذرا و غیر ایستا می باشد. با توجه به طبیعت ذاتی سیگنالهای تخلیه جزیی و پس از بررسی اجمالی فرمولها و مطالب ارائه شده در این زمینه می توان گفت:

که هنوز تبدیلی که دربرگیرنده سه خاصیت اصلی یعنی نویز زدایی، داشتن رزولوشن زمانی و فرکانسی مناسب و پیاده سازی آسان باشد، ارائه نشده است، لذا در ادامه این فصل به ارائه تبدیلی جدید با رزولوشن زمانی-فرکانسی مناسب و انعطاف پذیر با تغییرات سیگنالهای الکتریکی تخلیه جزئی خواهیم پرداخت و در فصل هفتم برای نشان دادن برتری این روش نسبت به روش STFT، نتایج شبیه سازی این دو با مقایسه می شوند و نهایتا نشان داده خواهد شد این روش قابلیت استخراج کل انرژی سیگنالهای تخلیه جزئی را دارد.

<sup>۸۲</sup>. Real-Time

<sup>۸۳</sup>. Gabor

## ۷-۶- تبدیل موجک- هیلبرت (WHT)<sup>۸۴</sup>

در این تبدیل سیگنال اندازه گیری شده در حوزه زمان به کمک تبدیل موجک به یک سری زیر سیگنال تجزیه می شود و سپس با استفاده از تبدیل هیلبرت اصلاح شده طیف فرکانسی مناسبی برای سیگنال ورودی بدست می آوریم. در اینجا برای درک آسانتر این تبدیل به ارائه چند مفهوم کلیدی در این رابطه می پردازیم.

## ۷-۶-۱- تجزیه چند سطحی سیگنال (MTA)<sup>۸۵</sup>[۸۷و۸۸]

### ۷-۶-۱-۱- تجزیه یک سیگنال به مجموعه ای از زیر سیگنالها

مولتی رزولوشن آنالیز عبارتست از تجزیه یک سیگنال در تعدادی سطح مشخص. در نتیجه یک مجموعه زیرسیگنال با رزولوشن زمانی و فرکانسی متفاوت بدست می آید. در هر سطح یک زیرسیگنال به نام جزئیات<sup>۸۶</sup> و یک زیرسیگنال به نام تخمین<sup>۸۷</sup> بدست می آید. تخمین بدست آمده در سطح اول به عنوان سیگنال ورودی سطح بعدی استفاده می شود. بنابراین در تجزیه یک سیگنال در ز سطح، به تعداد ز جزئیات و یک تخمین و آن هم از سطح آخر، بدست می آید. این روند کلی به تجزیه<sup>۸۸</sup> معروف است . شکل (۷-۴) نمایانگر روند تجزیه است. برای پیاده سازی سریع تجزیه چند سطحی سیگنال، استفاده از فیلتر بانکها و تبدیل موجک پیشنهاد شده است.

---

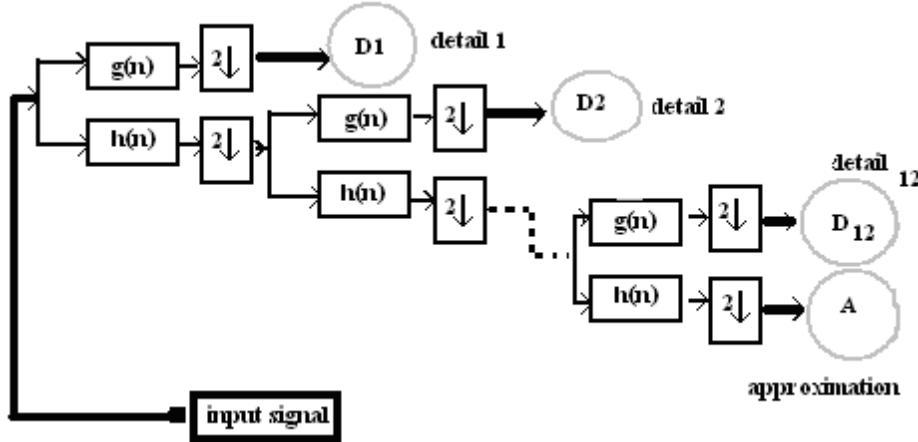
۱. Wavelet–Hilbert Transform (WHT)

۲. Multi-Resoulution Analysis (MTA)

<sup>۸۶</sup>. Detail

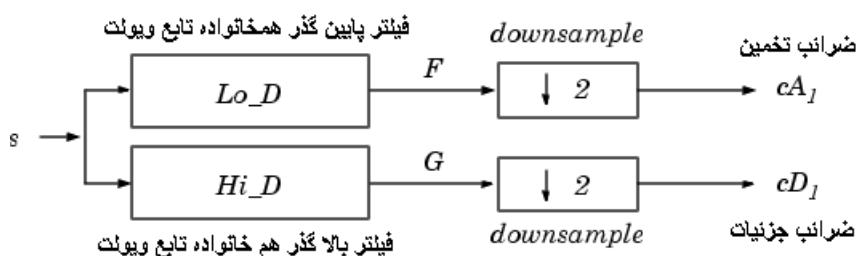
<sup>۸۷</sup>. Approximation

<sup>۸۸</sup>. Decomposition



شکل(۴-۷): شماتی توصیفی روش MTA در دوازده سطح [۸۷]

سیگنال اولیه ورودی  $n$  ورودی دارد اما همانگونه که از فیلترهای  $h(n)$  و  $g(n)$  عبور می کنند، کاهش تعداد نمونه هم در آنها اتفاق می افتد. اگر طول فیلتر های بالا گذر و پایین گذر برابر با  $N$  و طول سیگنال در سطح قبلی  $n$  باشد، آنگاه طول جزئیات و تخمین ها در سطح بعدی هر کدام به اندازه مقدار صحیح  $\left[ \left( \frac{n-1}{2} \right) + N \right]$  می شود. کاهش تعداد داده ها<sup>۸۹</sup> با بلوک ( $\downarrow 2$ ) در شکل(۵-۷) در سطح بعدی هر کدام به نشان داده شده است.



شکل(۵-۷): نمایی نزدیکتر از تجزیه در یک سطح بوسیله MTA [۸۷]

رابطه بین جزئیات و تخمین با تابعهای موجک و مقیاس بوسیله رابطه (۱۲-۷) قابل بیان است.

<sup>۸۹</sup>. Down Sampling

(۱۲-۷)

$$c_I(n) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\varphi_{I,n}(t)dt = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\varphi\left(\frac{t}{2}-n\right)dt$$

$$D_{dI}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\psi_{I,n}(t)dt = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\psi\left(\frac{t}{2}-n\right)dt$$

فیلترهای  $h(n)$  و  $g(n)$ ، توابع مقیاس  $\varphi(t)$  و  $\Phi(t,n)$  و موجک  $\psi(t)$  از یک خانواده هستند.

رابطه بین فیلترهای  $h(n)$  و  $g(n)$  با تابع های موجک  $\varphi(t)$  در معادلات (۱۳-۷) مشخص شده است.

(۱۳-۷)

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n)\Phi(n)-n \rightarrow c_I(n) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sum_k h(k)\Phi(k-2n-k)dt$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_n g(n)\Phi(n)-n \rightarrow D_{dI}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sum_k g(k)\Phi(k-2n-k)dt$$

تجزیه<sup>۹</sup> تخمین سطح اول بوسیله این ساختار طبق رابطه (۱۴-۷) می باشد. تجزیه در سطوح

بعدی به همین شکل ادامه میابد.

(۱۴-۷)

$$c_2(n) = \sum_k h(k-2n)c_I(k)$$

$$D_{d2}(n) = \sum_k g(k-2n)c_I(k)$$

## ۷-۶-۱-۲- زیر سیگنالها

حال اگر هر کدام از این سیگنال های تجزیه شده را از فیلترهای آینه ای تربیعی<sup>۹</sup> عبور داده ایم برگردان  $g'(n)$ ،  $h'(n)$ ،  $h(n)$ ،  $g(n)$  یعنی

---

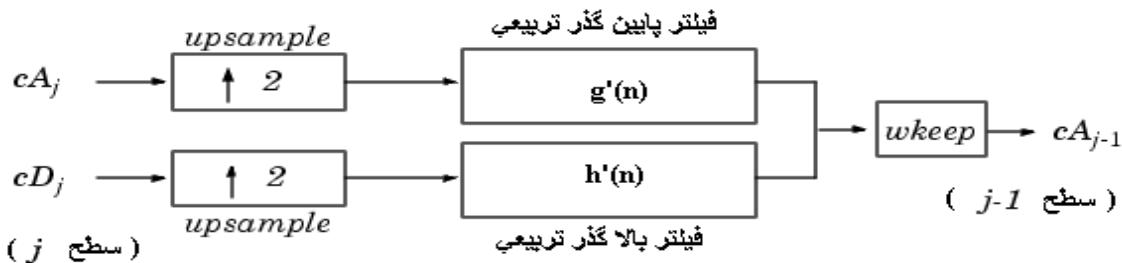
<sup>۹</sup>. Reconstruction

۱۰. Quadreture Mirror Filters

کنیم و در هر مرحله عملیات افزایش تعداد نمونه بوسیله صفر گذاری<sup>۹۲</sup> (شکل ۷-۷) را اعمال کنیم، آنگاه سیگنالهای بازسازی شده به دست می‌آیند. این روند در شکل (۶-۷) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۸-۷) نمایش داده شده مجموع تمامی سیگنالهای بازسازی شده برابر با سیگنال ورودی خواهد شد.

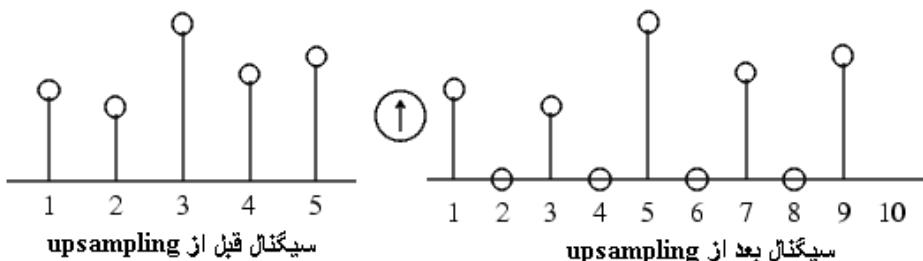
(۱۵-۷)

$$S = D_{Ir} + D_{2r} + \dots + D_{jr} + a_{jr} = a_{jr} + \sum_{m=1}^j D_{mr}$$

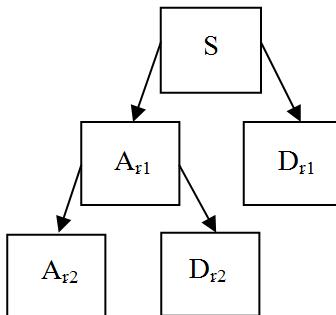


تابع Wkeep مرکز سیگنال را با طول ثابت نگه می‌دارد.

شکل (۶-۷): دیاگرام شماتیک الگوریتم بازسازی کننده در یک سطح [۸۷]

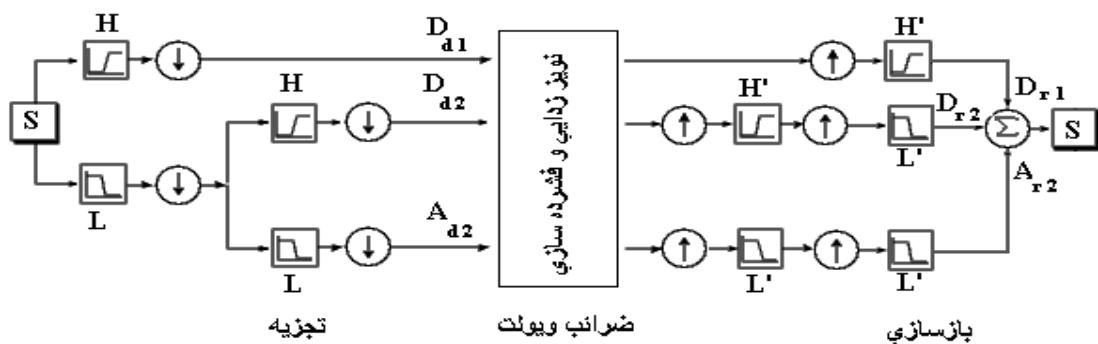


شکل (۷-۷): عملیات افزایش تعداد نمونه بوسیله صفر گذاری [۸۷]



شکل(۷-۸): دیاگرام سیگنالهای بازسازی شده در دو سطح ( $S = D_{r1} + A_{r1} = D_{r1} + A_{r2} + D_{r2}$ )

برای توصیف بهتر عملیات تجزیه و بازسازی، این عملیات در دو سطح در شکل(۹-۷) نمایش داده شده است.



شکل(۹-۷): MTA مستقیم و معکوس در دو سطح

این نکته قابل اهمیت است که در اینجا تعداد سطوح تجزیه و بازسازی برابر است و برای استخراج سیگنالهای گذراش سوار شده بر روی موج سینوسی انتخاب تعداد سطوح مناسب نقش به سزایی دارد. بدیهی است انتخاب سطوح نادرست به نتایج غیر قابل قبولی منجر می شود. نکته کلیدی در انتخاب سطوح مناسب ، تخمین و جزئیات بازسازی شده در سطح آخر است؛ به این صورت که اگر دامنه و تغییرات تخمین بازسازی شده در سطح آخر قابل صرفنظر کردن باشد و یا هر گاه هر گاه انحراف معیار دامنه تخمین بازسازی شده در سطح آخر نسبتا نزدیک صفر بود آنگاه عملیات تجزیه در همانجا متوقف می شود و عملیات بازسازی شروع می شود.

## ۶-۲- طیف زمان - فرکانس - انرژی تبدیل WHT

برای محاسبه طیف زمان - فرکانس - انرژی ابتدا طیف هیلبرت هر کدام از زیر سیگنالها که به صورت برداری سه بعدی است را بدست می آوریم، هر بعد این بردار شامل یک مولفه فرکانسی (۳-۷)، یک مولفه زمانی و یک دامنه (۳-۷-الف) است. برای حذف وابستگی این تبدیل به نوع موجک مولفه های فرکانسهای طبق رابطه (۱۶-۷) اصلاح می شوند. اگر تمامی این بردار های سه بعدی با هم اجتماع شوند و دامنه سیگنال تحلیلی با مربع دامنه جایگزین شود، طیف زمان - فرکانس - انرژی تبدیل WHT طبق رابطه (۱۷-۷) محاسبه می شود. باز سازی سیگنال ورودی از سیگنال تبدیل یافته به صورت رابطه (۱۸-۷) بیان می شود.

(۱۶-۷)

$$f_{hj}(t) = \frac{1}{2\pi \omega_c} \frac{d}{dt} (\arg Z_j(t))$$

که در آن  $\omega_c$  فرکانس مرکزی تابع ویولت بر حسب رادیان بر ثانیه و  $z_j$  سیگنال تحلیلی سطح زام است.

(۱۷-۷)

$$H(t, f) = \bigcup_{j=1}^n \left( \left( a_j \right)^2, f_{hj}(t), t \right)$$

که در آن  $a_j$  دامنه هیلبرت هر کدام از زیر سیگنالها،  $f_{hj}$  فرکانس های اصلاح شده تبدیل هیلبرت،  $n$  تعداد سطوح تجزیه و  $j$  شماره زیر سیگنال است.

(۱۸-۷)

$$X(t) = A_{jr} + \text{Real Part} \left[ \sum_{m=1}^j a_m(t) e^{i \int 2\pi f_{hj}(t) d(t)} \right]$$

## ۳-۶-۲- طیف انرژی WHT

برای محاسبه کل انرژی سیگنال در یک فرکانس خاص از معادله (۱۹-۷) استفاده می شود. در این معادله تک تک انرژی ها در سرتاسر بازه زمانی و در یک فرکانس خاص با هم جمع می شوند.

(۱۹-۷)

$$H(w)=\int_0^{\infty} H(t, f) dt$$

#### ۴-۶-۷ - کل انرژی سیگنال

برای محاسبه کل انرژی یک سیگنال استفاده از تئوری پارسوال پیشنهاد شده است. در این تئوری جذر مجموع مربع دامنه موجهای سینوسی بدست آمده از تبدیل فوریه به عنوان انرژی سیگنال شناخته شده است. کل انرژی سیگنال بر مبنای روش WHT به صورت رابطه (۲۰-۷) قابل تعریف است.

(۲۰-۷)

$$E(x(t)) = \int_0^{f_{max}} \int_0^{t_{max}} H(t, f) dt$$

#### ۷-۷ - نتیجه گیری

با توجه به طبیعت غیر ساکن و گذراي سیگنالهای تخلیه جزئی، در این فصل پس از مطالعه جامع انواع روش‌های تحلیل زمان- فرکانس، با ادغام تبدیلهای موجک و هیلبرت با استفاده همزمان از خواص آنها، تبدیلی جدید ارائه شد. از ویژه گی های بارز این تبدیل، نویززدایی، اعمال سریع و آسان، تطابق پذیری، رزولوشن زمانی بالا، حذف مولفه های فرکانسی غیر مطلوب، عدم وابستگی به نوع موجک و پنجره سازی اتوماتیک سیگنالهای پیچیده غیر ساکن می باشد.

#### ۱-۸ - مقدمه

مدلسازی موثر انواع مختلف خطاهای با توجه به شواهد تجربی حاکم بر آنها به عنوان یک اصل در کلاسه بندی و مکان یابی خطاهای شناخته شده است. طیف گسترده ای

از روش‌های شناسایی مکان و طبیعت خطا بر مبنای تحلیل مناسب سیگنال‌های خطا دار استوار شده‌اند. ولی با این وجود هنوز تبدیل موثری که قابلیت تحلیل سیگنال‌های غیر ساکن را دارد باشد در این زمینه ارائه نشده است. در این فصل، ابتدا به مقایسه نتایج تبدیل WHT و STFT می‌پردازیم، به این صورت که این تبدیل بر روی دو نوع شکل موج متفاوت تخلیه اعمال و نتایج آن با STFT مقایسه می‌شود. بدنبال آن برای مطالعه بیشتر نتایج توصیفی ارائه شده در فصل ششم به شبیه سازی مدل‌های توسعه یافته خطاهای گذرای تخلیه و شکست و آزمایش ضربه اقدام می‌شود. در نهایت جهت مکان یابی تخلیه جزئی مانند سایر تحقیقات گذشته از معیار انرژی استفاده می‌شود، اما با این تفاوت که در مدل منبع تخلیه مفاهیم تصادفی بودن و غیر ساکن بودن سیگنال تخلیه گنجانده شده است.

## ۲-۸- مشخصات ترانسفورماتور مورد مطالعه و شبیه سازی سیم پیچی فشار قوی آن

شکل (۱-۸) نشان دهنده برشی از یک ترانسفورماتور قدرت است. جهت ایجاد امکان تنظیم ولتاژ در سمت فشار قوی بخشی به نام سیم پیچ تنظیم ولتاژ<sup>۹۳</sup> اضافه شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، این بخش خود شامل دو قسمت دیگر به نامهای سیم پیچ تنظیم ولتاژ خشن<sup>۹۴</sup> و سیم پیچ تنظیم ولتاژ ظرفی<sup>۹۵</sup> است. در مجموع

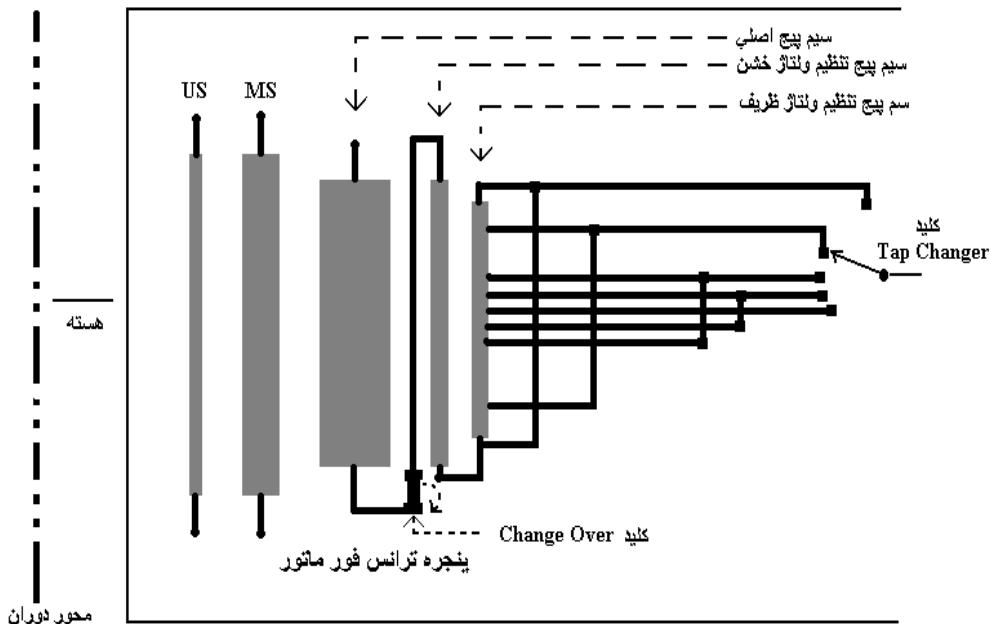
---

۱. Regulating winding

۲. Coarse regulation winding

۳. Fine regulation winding

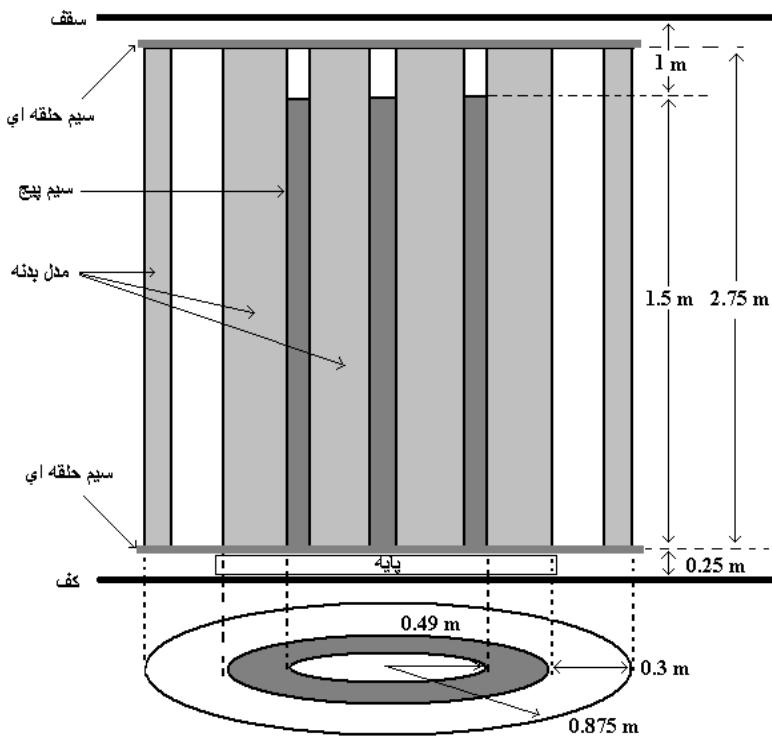
تنظیم ولتاژ در حدود ۲۰ درصد از ولتاژ فشار قوی است. با استفاده از کلید هایی می توان تمام و یا قسمتی از سیم پیچ تنظیم ولتاژ را از مدار ترانسفور ماتور خارج نمود.



شکل(۱-۸): شماتیک از سیم پیچ های یک ترانس فور ماتور قدرت [۴۲]

سیم پیچ مورد مطالعه شامل سیم پیچی فشار قوی یک ترانس ۲۳۰ به ۳۵ کیلو ولت، ۵۰ مگا ولت-آمپر است که شامل ۵۶ دیسک است. ابعاد هندسی این سیم پیچ و مدل بدنه در شکل (۲-۸) نشان داده شده است. شش زوج دیسک اول در این مدل در هم و بدن بال آن ۲۲ زوج دیسک بعدی بصورت واژگون با انواع مختلف، سیم پیچی شده اند. ابعاد تمامی زوج دیسک ها در جدول (۱-۸) آورده شده است.

بدنه ترانسفور ماتور طبیعتاً استوانه ای نیست. در اینجا هدف مدلسازی بدنه و هسته نیست، چون در حوزه فرکانس مورد مطالعه شار مغناطیسی نمی تواند فاصله بین سیم پیچ و بدنه را طی کند. برای منظور کردن اثرات زمین و بدنه، از یک خازن ( $C_e$ ) و یک مقاومت ( $R_e$ ) به موازات هم استفاده می شود. این مقاومت در بر گیرنده اثرات جریان نشتی روغن معدنی و دیگر دی الکتریکهای موجود در فاصله بین سیم پیچ فشار قوی و بدنه یا هسته است.

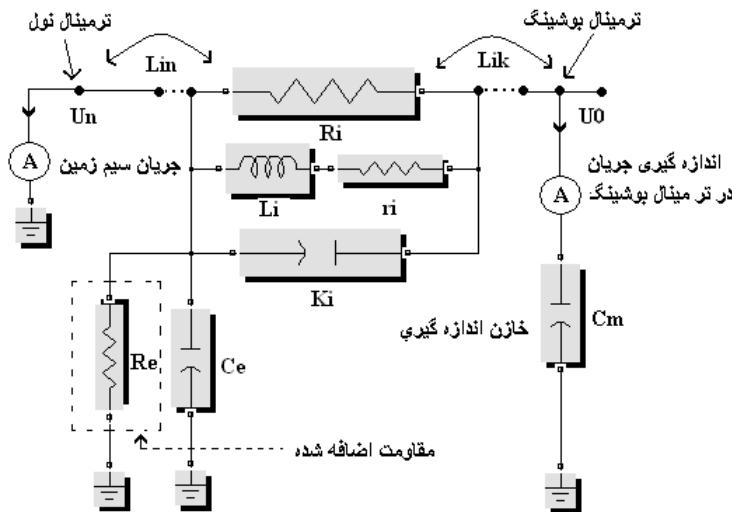


شکل(۲-۸): ابعاد سیم پیچ مورد مطالعه و مدل بدنه [۴۲]

جدول(۱-۸): اطلاعات فنی سیم پیچ فشار قوی [۴۲]

| نوع                                | روش سیم پیچی | تعداد دیسک ها | شماره دیسک از- تا | تعداد حلقه ها در هر دیسک | ارتفاع×پهنای (mm×mm) |
|------------------------------------|--------------|---------------|-------------------|--------------------------|----------------------|
| A                                  | درهم         | ۴             | ۱-۵               | ۱۳×(۱۸/۲۰)               | ۱۳×۱۵                |
| B                                  | درهم         | ۸             | ۵-۱۳              | ۱۲×(۱۲/۲۰)               | ۲.۸×۱۳.۲             |
| C                                  | واژگون       | ۴             | ۱۳-۱۷             | ۱۵×(۱۸/۲۰)               | ۲.۵×۱۷               |
| D1                                 | واژگون       | ۲۸            | ۱۷-۴۵             | ۱۹×(۱۷/۲۰)               | ۲×۲۳                 |
| D2                                 | واژگون       | ۹             | ۴۵-۵۴             | ۱۹×(۱۸/۲۰)               | ۲×۱۷                 |
| C                                  | واژگون       | ۳             | ۵۴-۵۶             | ۱۵×(۱۸/۲۰)               | ۲.۵×۱۷               |
| مجموع                              |              | ۵۶            |                   | ۱۰۰۸                     |                      |
| اجرا شده به روش English Electric * |              |               |                   |                          |                      |

نمایش دیسک به دیسک سیم پیچی و مدار اندازه گیری در ترمینال بوشینگ که شامل خازن  $C_m$  می باشد در شکل(۳-۸) نشان داده شده است. ساختار پایه این مدل زوج دیسک ها هستند. هر زوج دیسک به صورت مداری شامل سلفهای خودی و مقابله  $L_i$  و  $R_i$ ، مقاومت موازی  $R_e$ ، یک خازن سری  $K_i$ ، خازن زمین  $C_e$  و مقاومت نشتی  $R_{e0}$  مدل می شود. مقاومت اضافی  $R_{e0}$  به دلیل اهمیت وجود اثرات نشستی موجود در ترکهای عایقی احتمالی در هنگام مطالعه تخلیه جزئی به مدل اضافه شده است. این مقاومت بدون تغییر درجه سیستم باعث افزایش میرایی در سیستم می شود. مقدار المانهای این مدار در ضمیمه ۱ آورده شده است.



شکل(۳-۸): شمایی از مدار شبیه سازی شده جهت مکانیابی تخلیه جزئی

### ۳-۸- آنالیز سیگنالهای شبیه سازی شده تخلیه جزئی با استفاده از

تبديل WHT

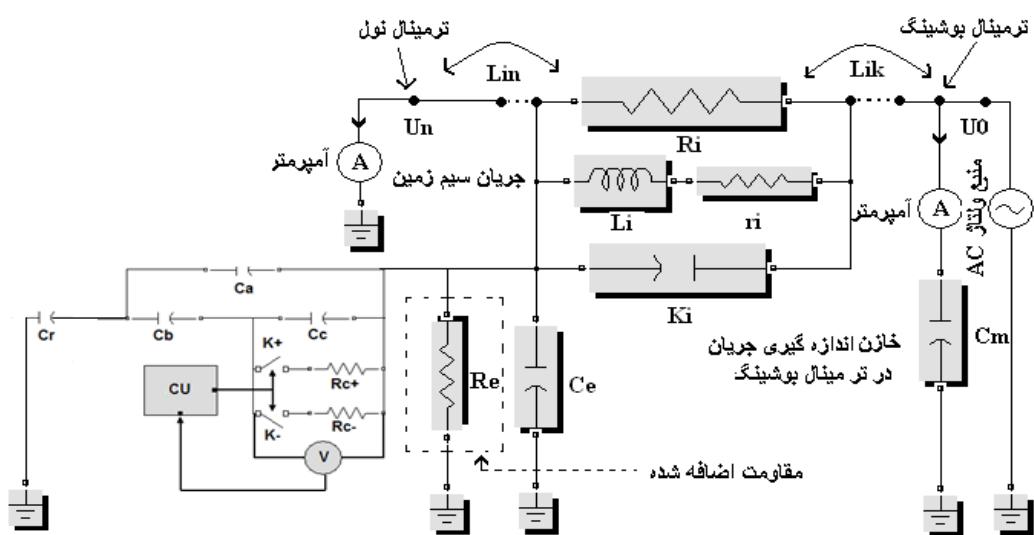
برای بررسی دقیق این تبدیل احتیاج به سیگنالهایی مناسب جهت تحلیل است. بدین منظور دو نمونه سیگنال در نرم افزار مطلب شبیه سازی شدند. اولین نمونه شامل یک

موج سینوسی است که پالسهای جریانی تخلیه بر روی آنها سوار شده اند. نمونه دوم پالسهای شبیه سازی شده تخلیه های تزریقی به گره اول مدل ترانسفورماتور و اندازه گیری شده از سر بوشینگ هستند. در این تبدیل ابتدا سیگنال ورودی را در به تعداد مناسب و مطابق با معیار ارائه شده در بخش ۷-۱-۶ تجزیه و بازسازی می کنیم و سپس تخمین بازسازی شده در سطح آخر را که به ترتیب یک موج سینوسی در نمونه اول و یک مقدار ثابت در نمونه دوم است را از مابقی سیگنال جدا می کنیم. بدنبال آن طیف زمان-فرکانس هر کدام از این جزئیات بازسازی شده را بدست می آوریم و در نهایت طیف انرژی سیگنال را محاسبه و با طیف فرکانسی STFT مقایسه می کنیم.

### ۱-۳-۸- شبیه سازی نمونه اول و تحلیل آن با استفاده از WHT و STFT

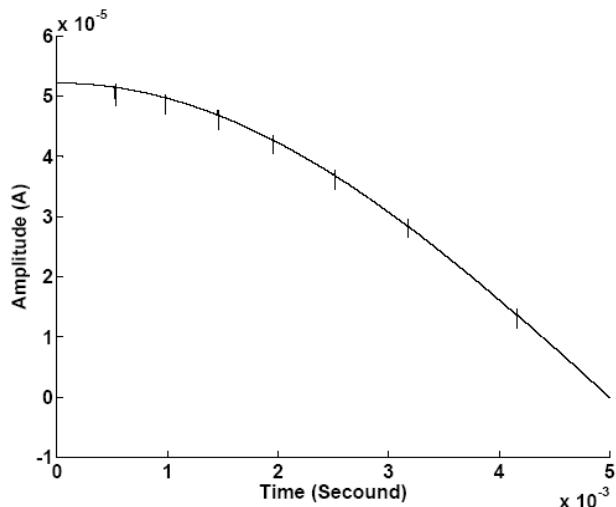
در اینجا این تبدیل را بر روی سیگنال تخلیه هایی که بر روی یک موج سینوسی سوار شده اند اعمال می کنیم. بدین منظور تخلیه هایی در مجاورت سیم پیچی فشار قوی بوسیله مدل سه خازنی تخلیه جزئی جاسازی می شود. این مدل که شامل المانهای خازنی، مقاومتی، کلیدها و یک واحد کنترل کننده <sup>۹۰</sup> است در نرم افزار MATLAB پیاده سازی و به مدل اصلی ترانسفورماتور به گره دیسک ۲۱ متصل می گردد(شکل (۴-۸)). چگونگی تولید پالسهای جریانی آزاد شده از حفره ای که بوسیله خازن <sup>C</sup> مدل شده است به این صورت است که در طول پروسه شبیه سازی ولتاژ ۲۳۰ کیلو ولت و ۵۰ هرتز به گره <sup>U۰</sup> اعمال می شود و در هر پله از زمان ولتاژ دو سر خازن <sup>C</sup> محاسبه می شود و به درون واحد CU که یک مقایسگر منطقی است فرستاده می شود، اگر پلاریته این ولتاژ مثبت و از حد ولتاژ شکست مثبت حفره بیشتر بود آنگاه فرمان وصل کلید

$K^+$  صادر می شود و هرگاه پلاریته ولتاژ منفی و قدر مطلق آن از حد ولتاژ شکست حفره بیشتر بود آنگاه فرمان وصل کلید  $K$ - صادر می شود. در این مدل مقاومت  $Rc$ - از  $Rc+$  کمتر منظور شده است. همچنین ولتاژ شکست منفی از مثبت به منظور قرار دادن حفره ای نزدیک سیم پیچی طبق تئوری شرح داده شده در فصل ششم بیشتر می باشد. قطر حفره حدود ۰/۰۵۰ میلی متر یعنی  $C_{c=}= ۰/۰۵۰$  پیکو فاراد [۲] محاسبه شده است. مدل مداری و جریانهای اندازه گیری شده از تر مینان بوشینگ این مدل به ترتیب در شکل (۴-۸) و (۵-۸) نشان داده شده است.



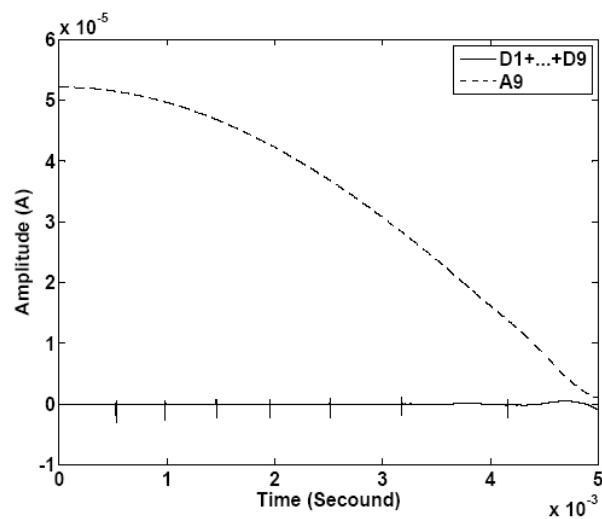
شکل (۴-۸): شبیه سازی مدل توسعه یافته حفره دردیسک دهم مدل سیم پیچی بوسیله

MATLAB



شکل(۸-۵): ربع شکل موج اندازه گیری شده بوسیله مدار اندازه گیری

سیگنال جریانی شبیه سازی شده در خازن اندازه گیری شامل یک موج سینوسی است که سیگنالهای تخلیه بر روی آن سوار شده اند. با استفاده از عملیات تجزیه و بازسازی که در بخش ۶-۱ شرح داده شد می توان سیگنال فرکانس قدرت را که برابر با تخمین باز سازی شده در آخرین سطح است را از سیگنالهای تخلیه جدا نمود، شکل (۶-۸) نمایانگر اجرای این موضوع می باشد.



شکل(۶-۸): جداسازی پالسهای جریانی تخلیه جزئی از موج جریانی با فرکانس قدرت

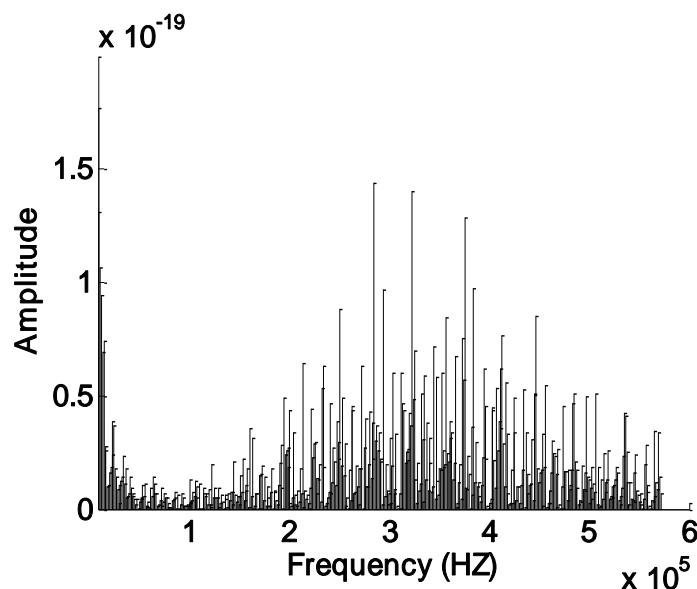
مجموع جزئیات بازسازی شده در تمام سطوح برابر با سیگنالهای تخلیه می باشد.

پنجره انتخاب شده به صورت مربعی واحد که طول آن  $80$  نمونه<sup>۹۷</sup> و پوش آن<sup>۹۸</sup>  $25$

نمونه را در بر می گیرد. طیف انرژی سیگنالهای تخلیه با استفاده از تبدیل STFT

همچنین طیف انرژی و زمان-فرکانس-انرژی تبدیل WHT به ترتیب در اشکال (۷-۸)،

(۸-۸) و (۹-۸) نشان داده شده اند.

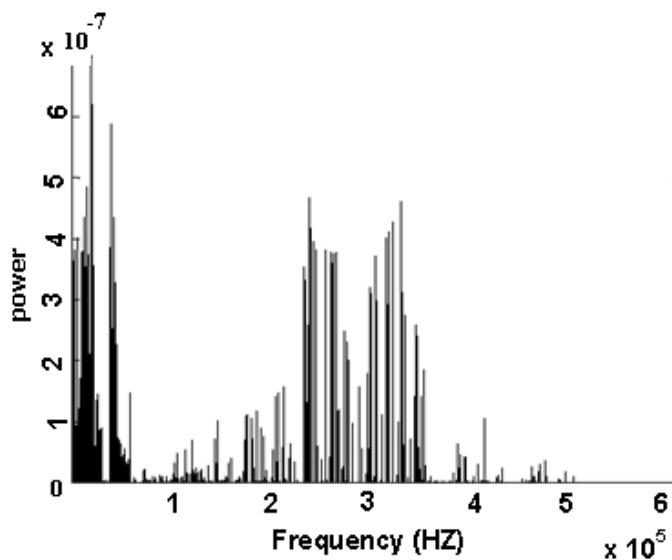


شکل(۷-۸): طیف انرژی سیگنالهای تخلیه با استفاده از تبدیل STFT

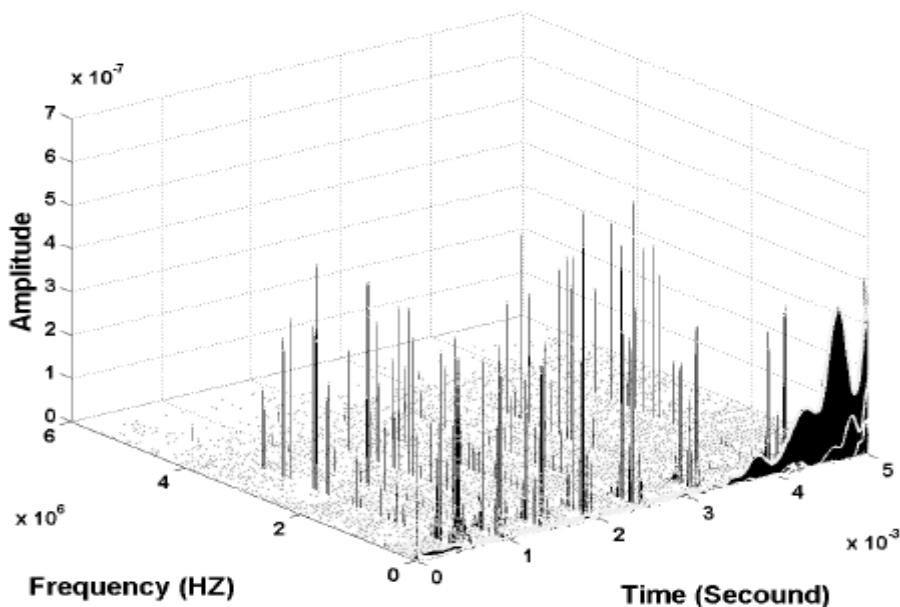
---

۱. Sample

۲. Overlap



شکل(۸-۸): طیف دامنه انرژی سیگنال با استفاده از تبدیل WHT



شکل(۹-۸): طیف زمان- فر کانس- انرژی سیگنال ورودی با استفاده از تبدیل WHT

۲-۳-۸- شبیه سازی نمونه دوم و تحلیل آن با استفاده از WHT و STFT

برای بررسی بیشتر این تبدیل ، در ابتدا به شبیه سازی سیگنالی شامل ۲۱ پالس تخلیه متوالی در گره اول ترانسفورماتور می پردازیم(شکل(۱۰-۸)). این پالسها دارای

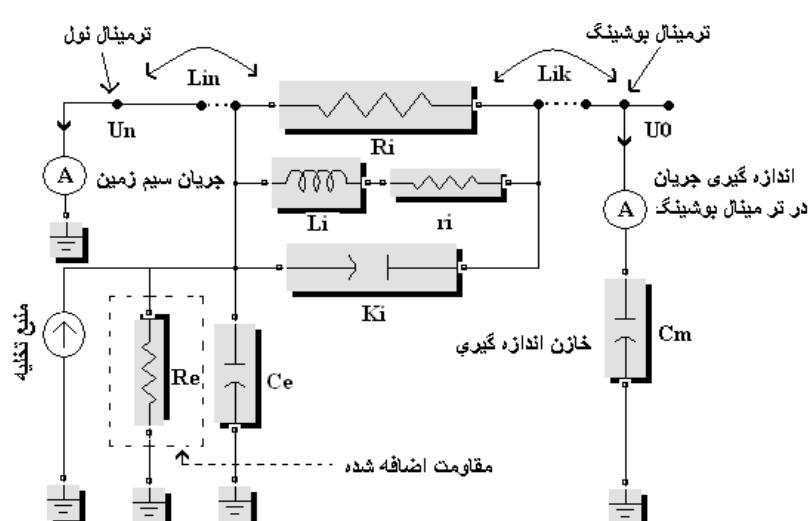
زمان صعود (از ۱۰٪ تا ۹۰٪ دامنه) ۰/۵ تا ۱۰ نانو ثانیه، پهناى پالس(دامنه بین مقادير

۱ تا ۱۰۰ نانو ثانیه، زمان نشست (از ۹۰٪ تا ۱۰٪ دامنه) ۴ تا ۴۰۰ نانو ثانیه و

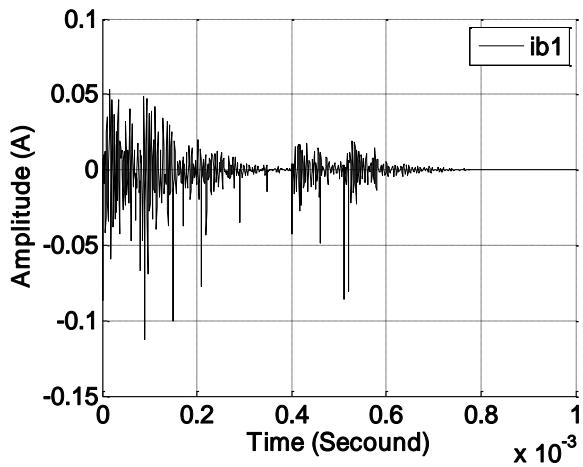
دامنه حداکثر ۲/۰ تا ۱۵ آمپر هستند. با توجه به مطالعه ارائه شده در فصل اول می توان

گفت اين شكل موج پيچide به تخليه هاي موجود در خلل تخت و مسطح در سطوح  
داخلی محصور شده توسط عایق شباهت دارد. از ویژگیهای بارز اين نوع شكل موج  
غیر ايستا بودن آن است به اين معنی که تصادفي بودن زمانی فرایند تخليه در نظر  
گرفته شده است. شكل موج جريان شببيه سازی شده در ترمinal اندازه گيري بوشينگ

در شكل(۱۱-۸) نشان داده است.



شکل(۱۰-۸): شمایی از شبیه سازی پالسهای تزریقی به سیم پیچی جهت مکانیابی تخليه جزئی



شکل(۱۱-۸): شکل موج جریان در ترمینال اندازه گیری بوشینگ به هنکام تزریق پالسهای تخلیه

همانطور که در شکل(۱۱-۸) دیده می شود. جریان اندازه گیری شده بوسیله خازن اندازه گیری سیگنال نسبتاً پیچیده ای است که تغییراتی سریع و شدید در برخی از قسمتهای آن اتفاق افتد. با استفاده از عملیات تجزیه و بازسازی، این سیگنال به دوازده زیر سیگنال تجزیه می شود. تخمین بازسازی شده از سطح یازدهم یک مقدار ثابت دارد پس نتیجه می گیریم تمامی مولفه های فرکانس بالا از سیگنال جدا شده و در زیر سیگنالها پخش شده است. شکل (۱۲-۸) نمایانگر این عملیات می باشد.

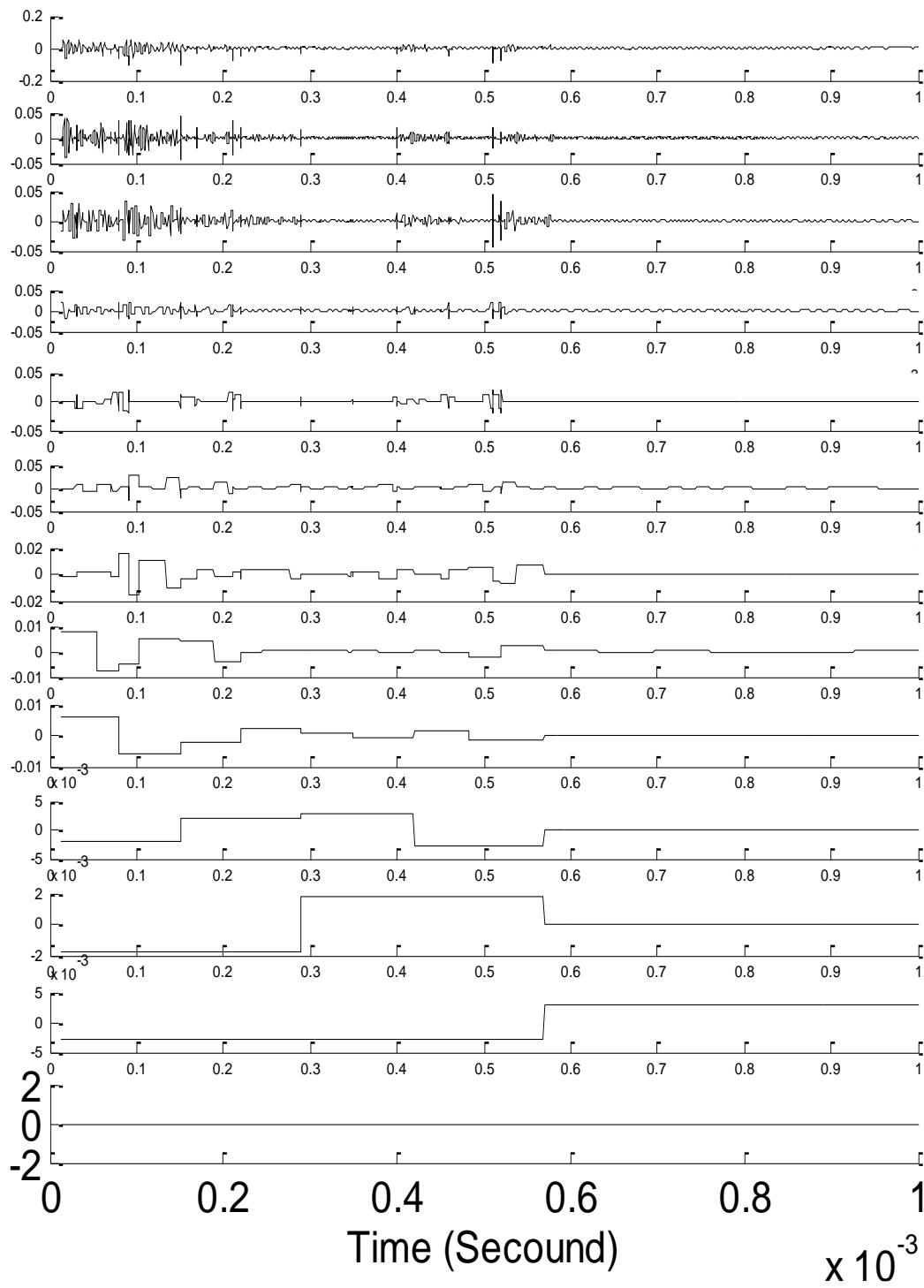
جزئیات باز سازی شده در سطوح پایین تر دارای مولفه های فرکانسی بالاتری هستند. با حرکت از سطوح پایین تر به سطوح بالاتر مولفه های فرکانس بالا از سیگنال جدا شده و مولفه های فرکانس پایین تر باقی می مانند. به این ترتیب به رزولوشن های زمانی و فرکانسی بالاتری دست می یابیم.

جزئیات و تخمین باز سازی شده در یازده سطح در شکل (۱۲-۸) نشان داده شده اند. می توان نشان داد که مجموع جزئیات و تخمین آخر باز سازی شده برابر با سیگنال ورودی است. این مطلب به وضوح در شکل (۱۳-۸) نشان داده شده است. در این شکل منحنی نقطه چین سیگنال ورودی و منحنی تیره رنگ مجموع سطح به سطح این

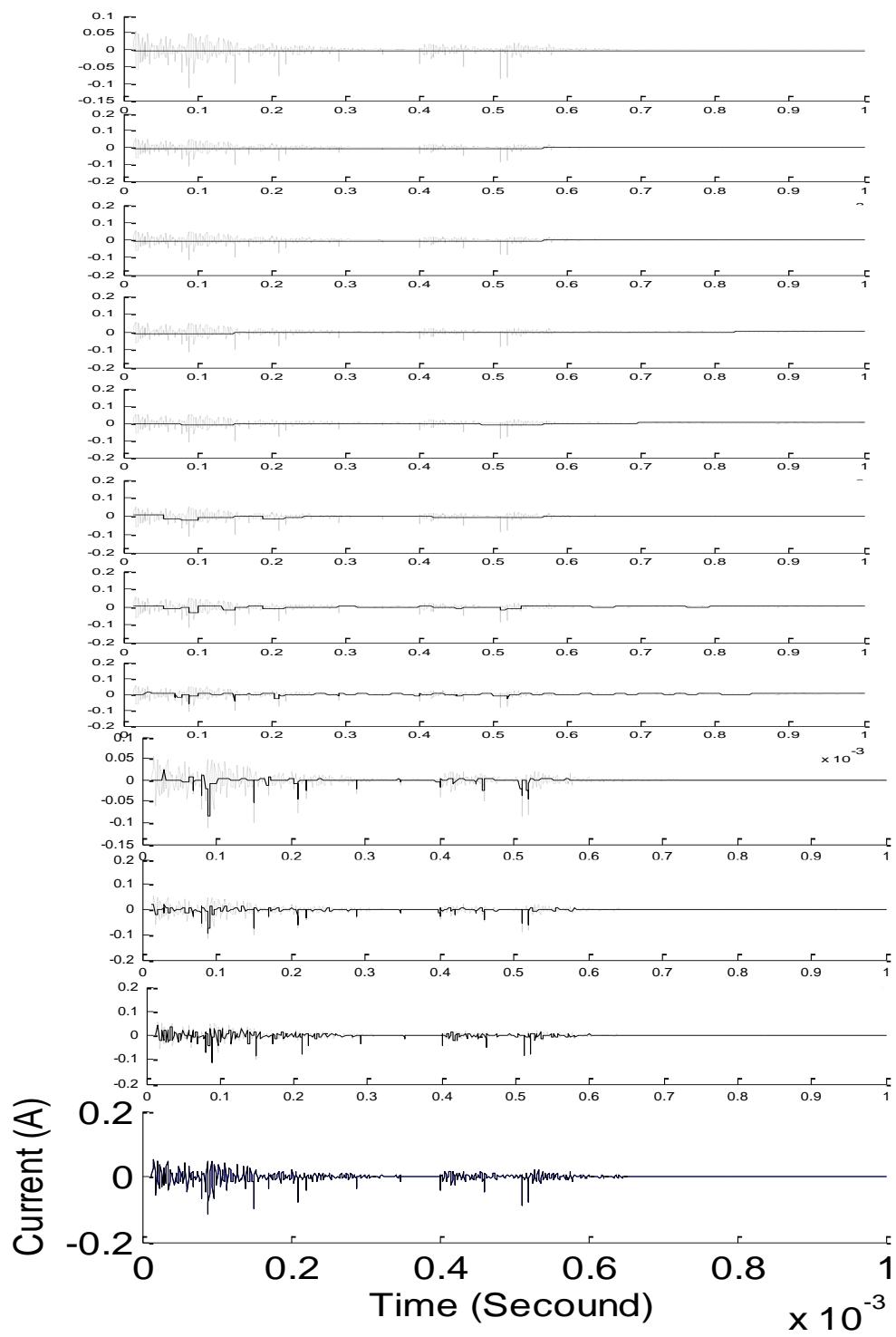
جزئیات از سطح یازدهم تا سطح اول می باشد. طبق معادله (۱۸-۷) سیگنال ورودی ساخته شده از طیف  $WHT$  به صورت زیر قابل نمایش است.

(۱-۸)

$$X(t) = A_{IIr} + \text{Real Part} \left[ \sum_{m=1}^{II} a_m(t) e^{j \int 2\pi f_h(t) d(t)} \right]$$



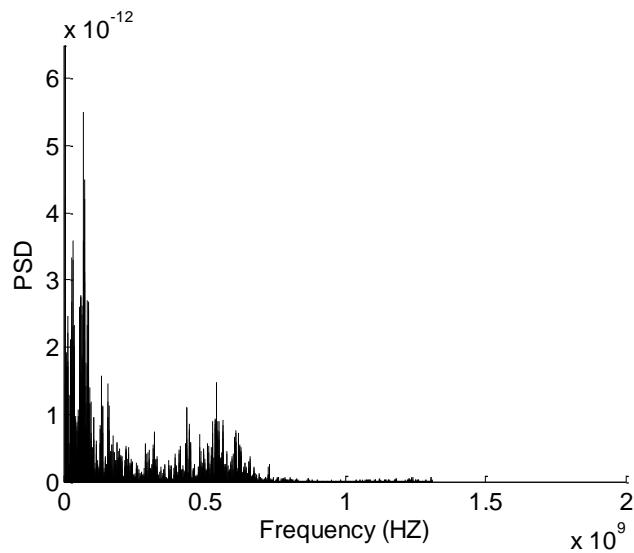
شکل(۱۲-۸): تجزیه سیگنال شبیه سازی شده بوسیله روش MTA زیر سیگنالها از بالا به پایین شامل(جزئیات بازسازی شده سطوح اول تا یازدهم) و(تخمین بازسازی سطح شده یازدهم) هستند.



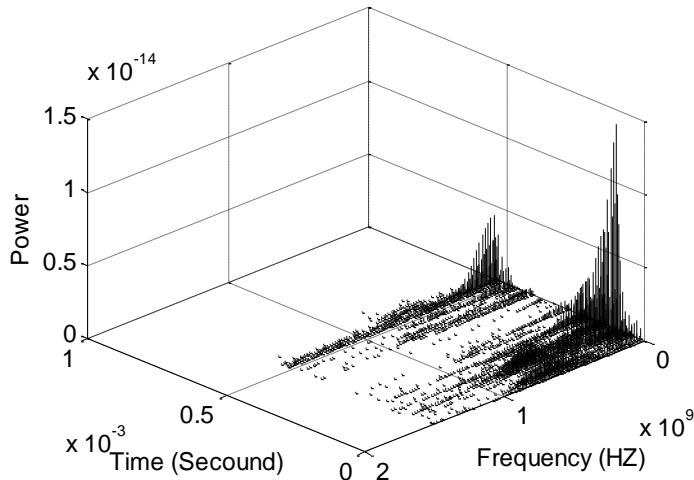
شکل(۱۳-۸): مجموع سطح به سطح زیر سیگنالها یعنی از جزئیات باز سازی شده سطح اول تا

تخمین باز سازی شده سطح یازدهم

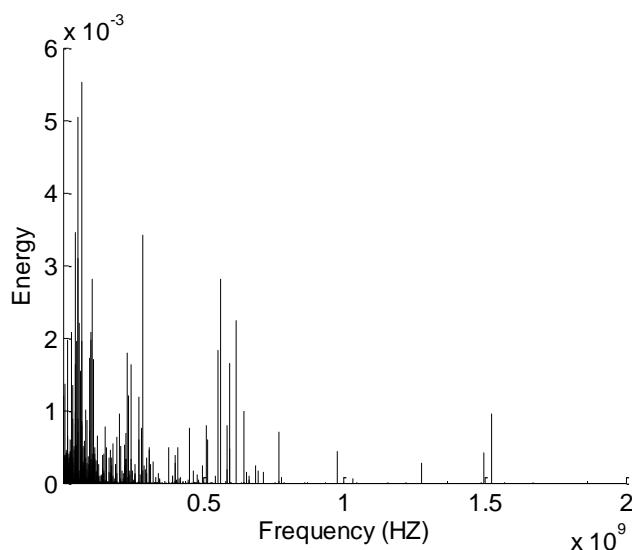
پنجره مربعی انتخاب شده برای تحلیل به روش STFT طولی ۱۸ نمونه ای و پوشی به طول ۱۰ نمونه دارد. طیف انرژی و طیف زمان-فرکانس-انرژی سیگنالهای تخلیه با استفاده از تبدیل STFT همچنین طیف انرژی و زمان-فرکانس-انرژی سیگنالهای تخلیه با استفاده از تبدیل WHT به ترتیب در اشکال شکل(۱۴-۸)، (۱۵-۸)، (۱۶-۸) و (۱۷-۸) نشان داده شده اند.



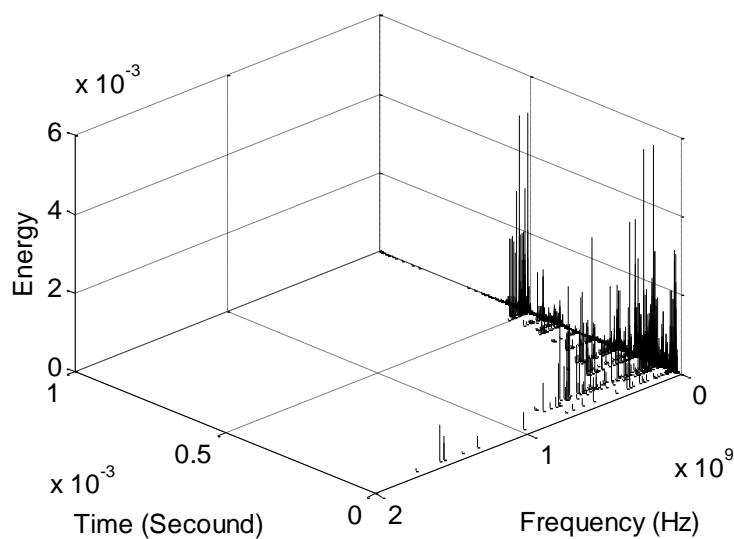
شکل(۱۴-۸): انرژی سیگنالهای تخلیه با استفاده از STFT



شکل(۱۵-۸): طیف زمان-فرکانس STFT سیگنالهای شبیه سازی شده تخلیه جزئی



شکل(۱۶-۸): انرژی سیگنالهای شبیه سازی شده تخلیه جزئی



شکل(۱۷-۸): طیف زمان-فرکانس WHT سیگنالهای شبیه سازی شده تخلیه جزئی

### ۳-۳-۸- مقایسه نتایج روش STFT و WHT

با مقایسه اشکال (۷-۸) با (۸-۸) و (۱۴-۸) با (۱۶-۸) دریافتہ می شود که طیف انرژی WHT رزولوشن بہتری نسبت به STFT دارد. پنجرہ سازی تطبیقی، حذف مولفه های فر کانسی نا خواسته و اعمال سریع و آسان از جمله مزیتهای این روش

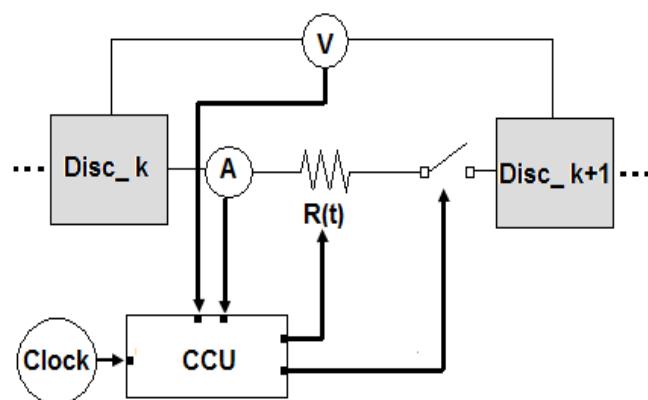
نسبت به روش STFT است. در مجموع می توان گفت این روش در عمل پتانسیل بالایی در تجزیه و تحلیل سیگنالهایی الکتریکی تخلیه جزئی در عمل دارد.

۸-۴- شبیه سازی خطاهای دائمی و گذرا در سیم پیچ تحت آزمایش ضربه

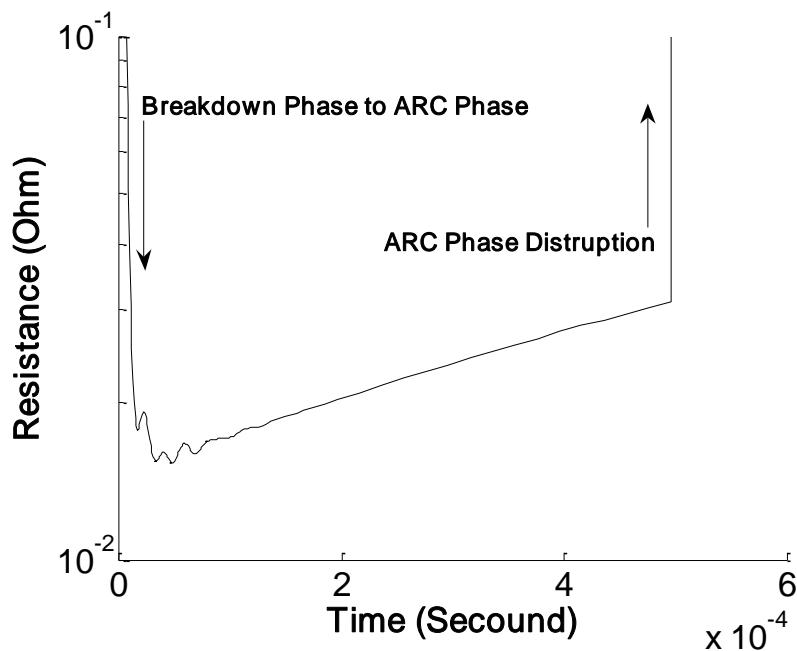
۸-۴-۱- شبیه سازی شکست و قوس

برای شبیه سازی چگونگی رفتار عمل و عکس العملی شکست، قوس و قطع قوس درطی تست ضربه چندین مرحله را دنبال می کنیم. در اولین مرحله مدل ترانسفورماتور تشریحی را در نرم افزار MATLAB بصورت دقیق پیاده سازی می کنیم. در مرحله بعدی به پیاده سازی مدل شکست، قوس و قطع قوس در یک S.Function به نام محاسبه و کنترل CCU می پردازیم(شکل(۸-۸)). در اینجا CCU وظیفه کنترل یک کلید برای اعمال رفتار شکست و همچنین کنترل یک منبع کنترل شونده با ولتاژ برای اعمال مقاومت  $R(t)$  در سه فاز شکست، قوس و قطع قوس را بر عهده دارد. ساختار گسترده مدل تشریحی ترانسفورماتور ما را قادر به اندازه گیری ولتاژ در فضای بین دو دیسک مجاور دهم و یازدهم می کند. با مشخص بودن فاصله فضای بین دو دیسک  $a$  و ولتاژ شکست روغن، ولتاژ شکست تعیین می گردد. چگونگی حرکت به فاز شکست و بعد از آن فاز قوس و بدنبال آن قطع قوس بدین ترتیب است که: در طول پروسه شبیه سازی ولتاژ، زمان و جریان اندازه گیری می شوند، سپس بصورت یک سیگنال کنترلی به واحد CCU فرستاده می شوند. بعد از دریافت این سیگنالهای کنترلی واحد CCU بطور هوشمند مقاومت شکست را طبق رابطه (۸-۶) تعیین کرده و سپس فرمان وصل کلید را می دهد. با اتمام فاز شکست و ورود به فاز قوس مقاومت طبق رابطه (۸-۶) عوض می شود. بدنبال آن قطع قوس با یک مقاومت

بسیار بالا اعمال می شود. کوپل این مقاومت غیر خطی به مدار الکتریکی بوسیله یک منبع کنترل شونده با ولتاژ به صورت  $R(t) * i(t)$  عملی می شود. رفتار این مقاومت غیر خطی در این فرایند در شکل (۱۹-۸) نشان داده شده است. در رابطه (۸-۶) مقدار  $t_1, t_0$  و  $t_2$  به ترتیب  $۲/۵, ۵/۲۰$  و  $۴۹۰$  میکرو ثانیه است. همچنین مقدار مقاومت در فاز شکست و قطع قوس به ترتیب  $۱ - \text{مگا اهم}$  و  $۵۰۰$  کیلو اهم منظور شده است.



شکل (۱۸-۸): شبیه سازی شکست، آرک و قطع آرک بین دو دیسک مجاور  $k$  و  $k+1$



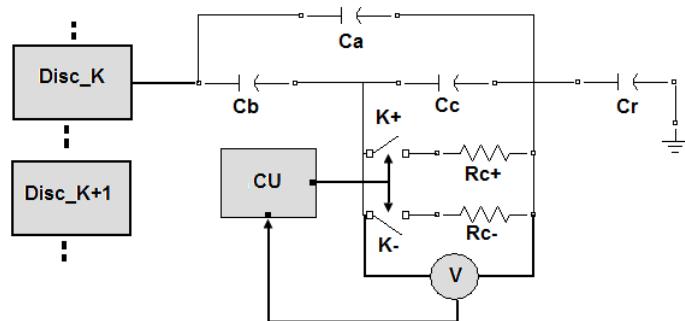
شکل(۱۹-۸): لگاریتم قدر مطلق مقاومت ( $R(t)$ ) در سه فاز شکست، آرک و قطع آرک

#### ۲-۴-۸- شبیه سازی تخلیه الکتریکی

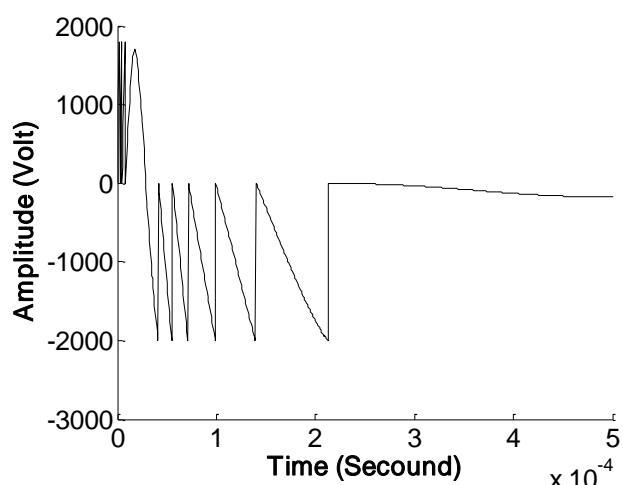
مدل تشریحی پیاده سازی شده در بخش ۲-۸ در اینجا با اعمال یک خطای تخلیه جزئی تحلیل می شود. در اینجا فرض بر مدلسازی خطای تخلیه در مجاورت سیم پیچ فشار قوی است. برای پیاده سازی این خطای مدلی از منبع تخلیه شامل المانهای خازنی، مقاومتی، کلیدها و یک واحد کنترل کننده CU در نرم افزار MATLAB پیاده سازی و به مدلی اصلی ترانس فور ماتور به دیسک ۱۰ طبق شکل(۲۰-۸) متصل می گردد. چگونگی تولید پالسهای جریانی آزاد شده از حفره ای که بوسیله خازن  $C_e$  مدل شده است به این صورت است که: در طول پروسه شبیه سازی در هر لحظه از زمان ولتاژ دو سر خازن  $C_e$  محاسبه می شود و به درون واحد CU که یک مقایسگر منطقی است، فرستاده می شود. اگر پلاریته این ولتاژ مثبت و از حد ولتاژ شکست حفره بیشتر بود آنگاه فرمان وصل کلید  $K_+$  از این واحد به کلید فرستاده می شود و هرگاه پلاریته این ولتاژ منفی و قدر مطلق آن از حد ولتاژ شکست حفره بیشتر بود آنگاه فرمان وصل به کلید  $K_-$  صادر می شود. در این مدل مقاومت  $R_{C+}$  از  $R_{C-}$  کمتر و همچنین ولتاژ شکست منفی از مثبت طبق تئوری شرح داده شده در بخش (۴-۶) بیشتر می باشد. قطر حفره حدود ۰/۰۵۰ میلیمتر یعنی  $C_e = ۰/۰۵$  محاسبه شده است. ولتاژ دو سر حفره همچنین پالسهای جریانی آزاد شده از حفره که دامنه ای حدود ۰/۵ تا ۰/۶ آمپر و پهناهی پالسی بین

۱۰۰ نانو ثانیه تا ۵/۵ میکروثانیه دارند، در شکل های (۲۱-۸ و ۲۲-۸) نشان داده شده

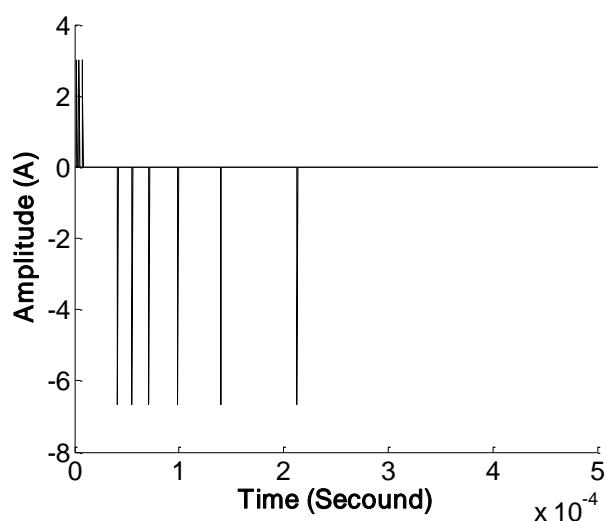
اند.



شکل (۲۰-۸): بلوک مدل توسعه یافته حفره دردیسک  $k$  ام



شکل (۲۱-۸): ولتاژ دو سر حفره تحت ولتاژ ضربه مستقل از ترانسفورماتور



شکل (۲۲-۸): جریانهای آزاد شده از حفره از طریق مقاومت‌های  $R_{c+}$  و

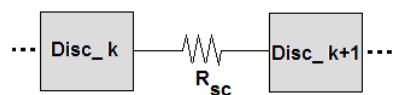
تحت ولتاژ ضربه و مستقل از ترانسفورماتور

#### ۴-۳-۸- شبیه سازی همزمان تخلیه و شکست

در این مدل فرض شده است که در طول تست ضربه، پدیده‌های شکست-قوس و تخلیه جزئی بصورت همزمان اتفاق می‌افتد. برای مدل‌سازی همزمان، این دو مدل را بصورت دقیق درون ساختار گستردگ و بدون هیچ تغییری مطابق قسمت (۱-۴-۸ و ۸-۴) پیاده سازی و برنامه شبیه ساز را به صورت قبل اجرا می‌کنیم.

#### ۴-۴- شبیه سازی اتصال کوتاه دائمی

در این حالت اتصال کوتاه در فضای بین دو دیسک بواسیله قرار دادن یک مقاومت تنها و بین دو دیسک مجاور ۱۰ و ۱۱ مدل می‌شود. این مقاومت نشان دهنده کانالهای هادی درون عایق در فضای بین دو دیسک مجاور است شکل (۲۳-۸).

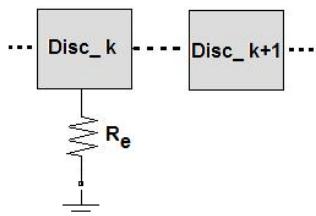


شکل (۲۳-۸): مدل اتصال کوتاه بین دو دیسک مجاور  $k$  و  $k+1$

#### ۴-۵- شبیه سازی خطای دائمی اتصال به زمین

در این حالت فرض بر این است که در انتهای یک دیسک یک میسر مقاومتی به زمین وجود دارد. در شرایط واقعی مهمترین مسیر ها شکافهای عایقی می‌باشد. برای

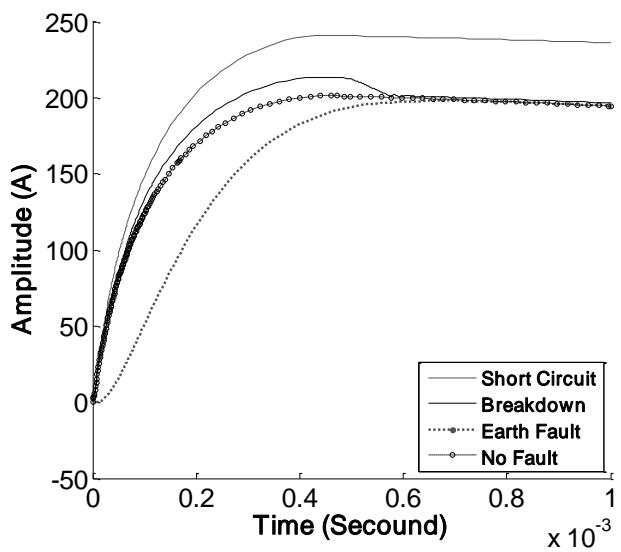
مدلسازی این حالت یک مقاومت تنها به موازات خازن انتهای دیسک دهم استفاده می شود شکل (۲۴-۸).



شکل (۲۴-۸): مدل اتصال کوتاه به زمین در دیسک k ام

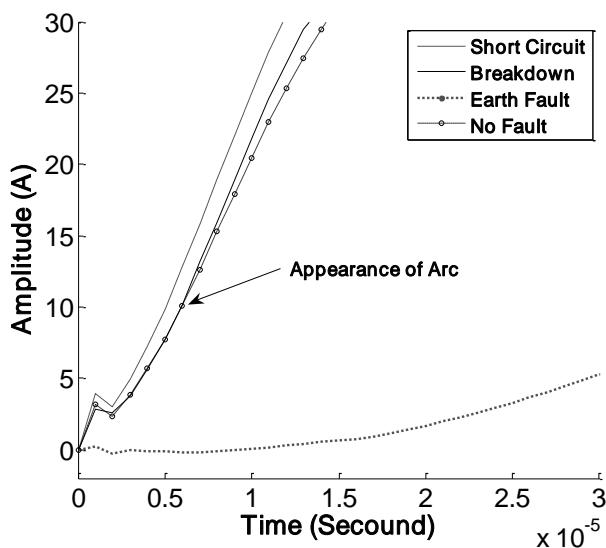
#### ۵-۸-۴-۶- نتایج شبیه سازی ۱-۴-۸ تا ۱-۴-۸

بعد از پیاده سازی مدل تشریحی ترانس فور ماتور شکل (۳-۸) و مدل های خط اطمینان بخش شبیه سازی در نرم افزار MATLAB، ولتاژ ضربه ۱,۲/۵۰ میکرو ثانیه و ۸۵۰ کیلو ولت به مدل اعمال شده و جریانها در شش حالت بدون خط، شکست - قوس، تخلیه جزئی، تخلیه جزئی - شکست - قوس، اتصال کوتاه بین دو دیسک مجاور و اتصال به زمین در سیم نول شبیه سازی می شوند. چگونگی مقایسه این جریانها با نماهای متفاوت در شکل (۳۳-۸ الی ۲۵-۸) نشان داده شده است. در این شبیه سازی ها خط در دیسک ۱۰ و بین ۱۱ و ۱۰ جایگذاری شده است. نتایج شبیه سازی مشابهی برای مکانهای دیگر مشاهده شد، بنابراین یکی از آنها نشان داده شده است.



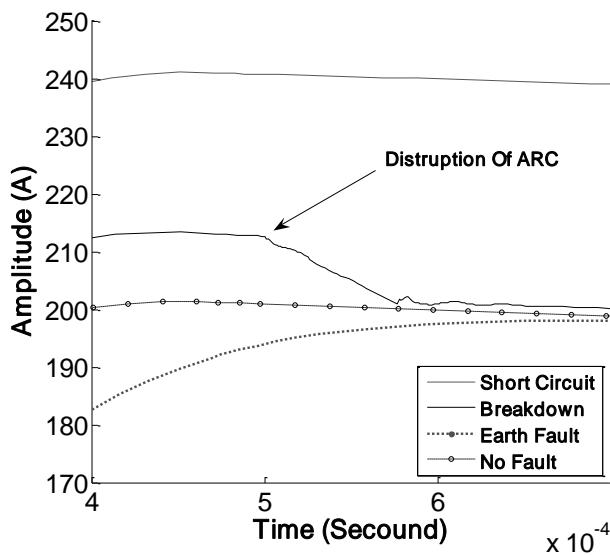
شکل(۲۵-۸): جریان سیم زمین در چهار حالت

(شکست و قوس ، اتصال کوتاه بین دو دیسک مجاور و اتصال به زمین و بدون خط)



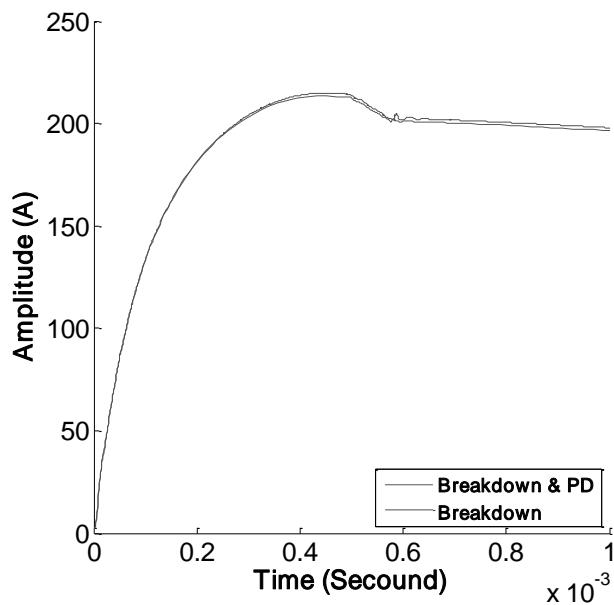
شکل(۲۶-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در چهار حالت

(شکست و قوس ، اتصال کوتاه بین دو دیسک مجاور و اتصال به زمین و بدون خط)

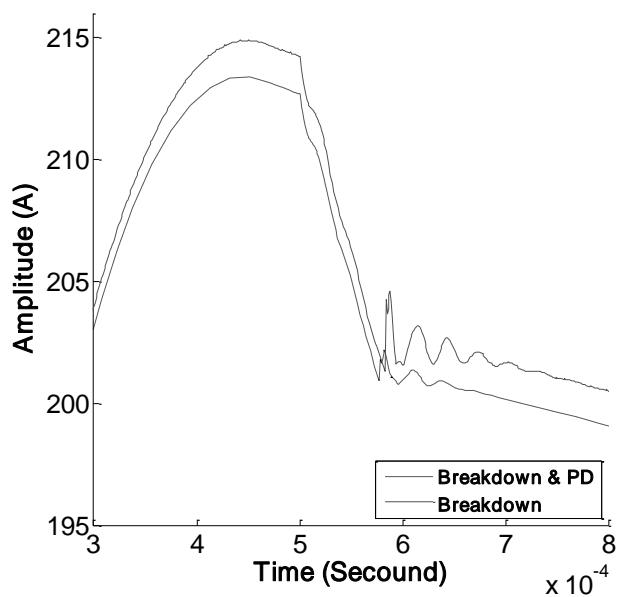


شکل(۲۷-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در چهار حالت

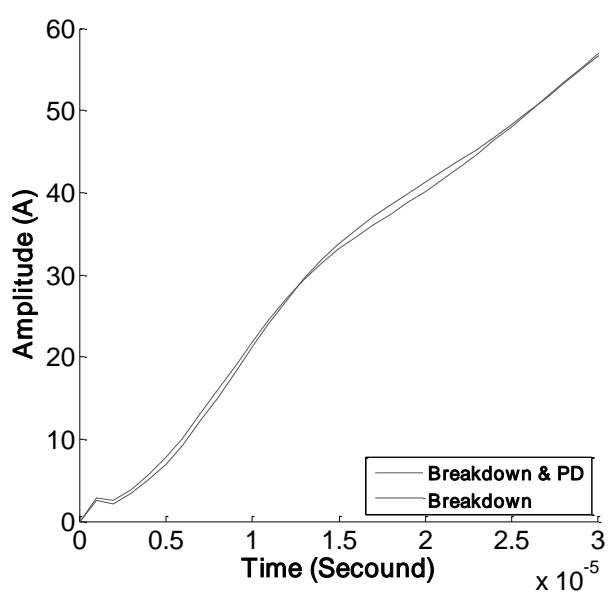
(شکست و قوس ، اتصال کوتاه بین دو دیسک مجاور و اتصال به زمین و بدون خط)



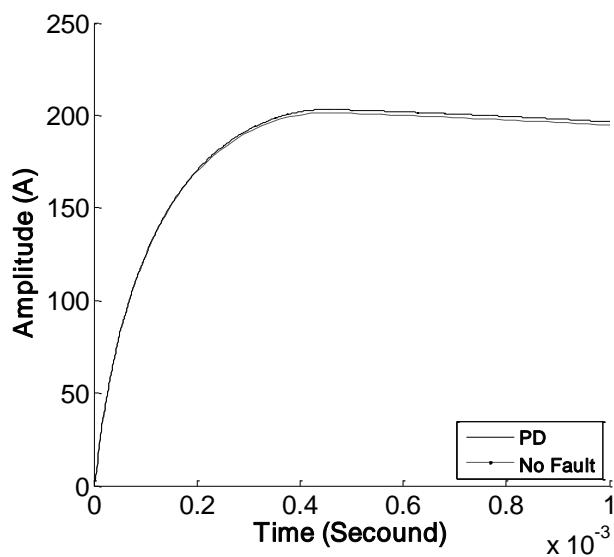
شکل(۲۸-۸): مقایسه جریان سیم زمین در دو حالت (شکست-آرك-تخلیه و شکست-آرك)



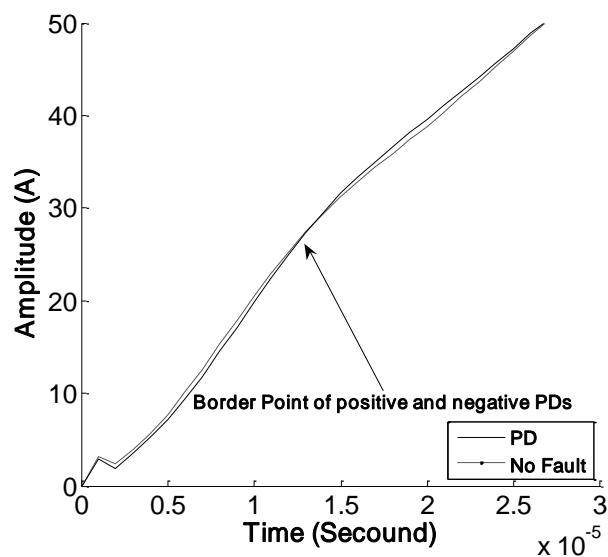
شکل(۲۹-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در دو حالت (شکست-آرک-تخلیه و شکست-آرک)



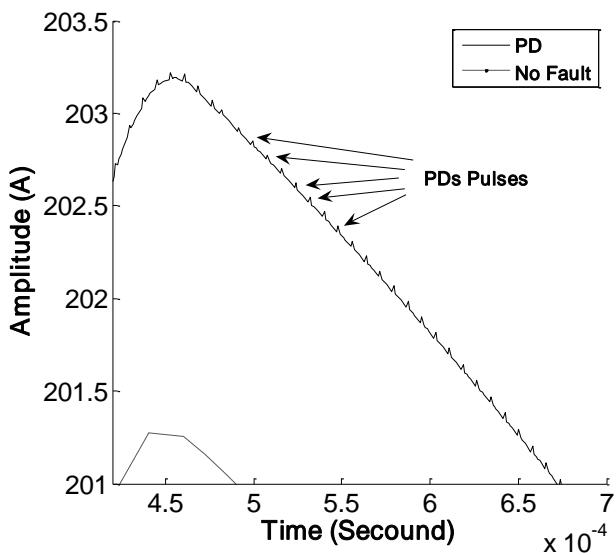
شکل (۳۰-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در دو حالت (شکست-آرک-تخلیه و شکست-آرک)



شکل(۳۱-۸): مقایسه جریان سیم زمین در دو حالت (بدون خطا و تخلیه جزئی)



شکل(۳۲-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در دو حالت (بدون خطا و تخلیه جزئی)



شکل(۳۳-۸): تصویر بزرگ شده جریان سیم زمین در دو حالت (بدون خطا و تخلیه جزئی)

با مقایسه جریانهای اشکال (۲۵-۸ تا ۳۳-۸) نکات زیر قابل استحصال است.

الف- مشاهده تمایز تخلیه از سیستم بدون خطا

ب- تمایز منطقی شکست و سیستم بدون خطا

ج- تمایز خوب و منطقی شکست و اتصال کوتاه دائمی

د- ایجاد تغییری نسبی در منحنی شکست در هنگام مدلسازی همزمان تخلیه با

شکست

ه- تعقیب صحیح و منطقی منحنی ها بعد از رفع خطا در هنگام شکست و تخلیه

ی- تمایز شدید خطاهای دائمی (اتصال کوتاه بین دو دیسک مجاور و اتصال به

زمین)

با ملاحظه این خروجی ها به نتایج مختلفی دست می یابیم. اول این است که شبیه

سازی شکست به صورت یک مقاومت خطی دقت لازم را در این پروسه بدنبال ندارد،

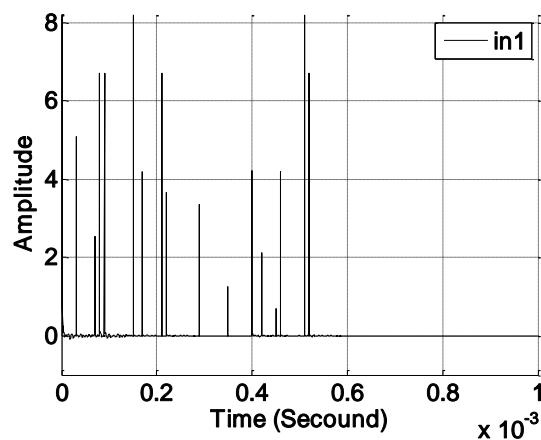
دومین نتیجه این است که میزان اختلاف پدیده تخلیه از منحنی بدون خطا در هنگام

عوض شدن پلاریته جریان تخلیه از مثبت به منفی آشکار می شود، زمانی که خطای اتصال به زمین در سیم پیچی اتفاق می افتد دامنه این شدیداً افت می کند. که این افت شدید در ابتدای شکل موج جریان برجسته تر می باشد. و آخرین نتیجه آشکار سازی خطای تخلیه حتی هنگامی که خطای بزرگتری مانند شکست در ترانس اتفاق می افتد؛ می باشد.

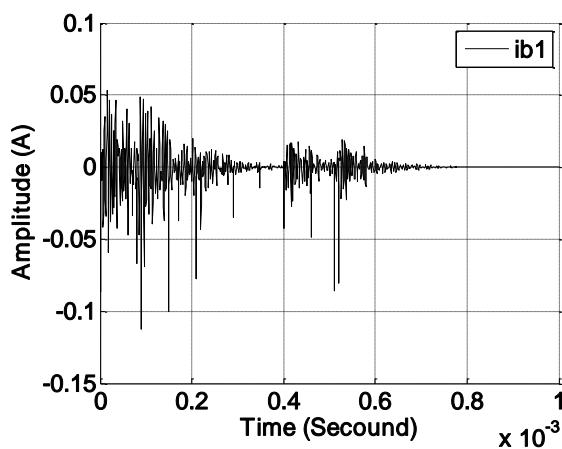
با شبیه سازی مدلها ای ارائه شده در نرم افزار MATLAB، مشاهده شد که با مدلسازی دقیق تر مدلها شکست و تخلیه طبق واقعیت های فیزیکی، می توان به تفکیک مناسب این پدیده ها اقدام کرد. همچنین نشان داده شد که پاسهای تخلیه در هنگام وقوع همزمان این پدیده و شکست در جریان سیم نول قابل مشاهده هستند. در نتیجه مدلسازی خطاهای داخلی بصورت یک مقاومت تنها به نتایج غیر واقعی منجر می شود. در اینجا می توان به قابلیت نرم افزار MATLAB در صورت استفاده مناسب و هنرمندانه از آن در شبیه سازی پدیده های گذرا ای سریع می توان اشاره نمود.

#### ۵-۸- مکان یابی تخلیه جزئی

در اکثر تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته است، تخلیه بین سیم پیچ ترانسفورماتور و زمین مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین منبع PD شبیه سازی شده بین زمین و یک نقطه از سیم پیچی قرار می گیرد. به این منظور منبع تخلیه مدل شده در بخش ۲-۳-۸ به گره های (۱، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۷) سیم پیچ تزریق می شود و سیگنالهای تولید شده در تر میانال های ترانسفورماتور ثبت می شوند. در اشکال (۸-۳۴ تا ۴۵-۸) جریانهای اندازه گیری شده از سیم نول و بوشینگ نمایش داده شده اند.

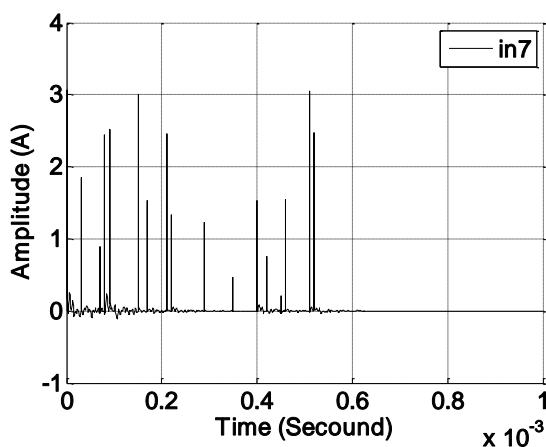


شکل(۳۴-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول

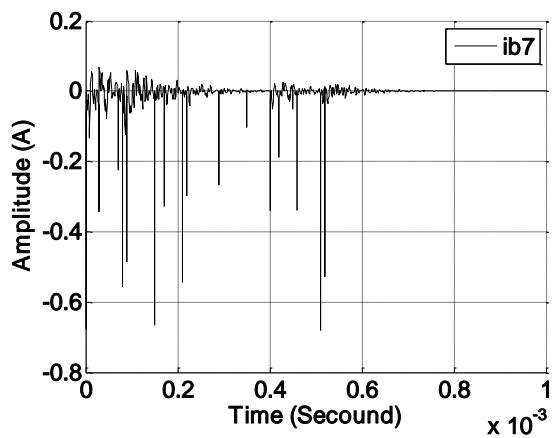


شکل(۳۵-۸): سیگنال اندازه گیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول

اول

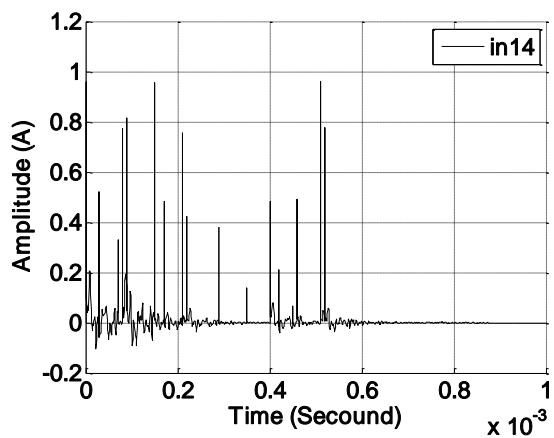


شکل(۳۶-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول

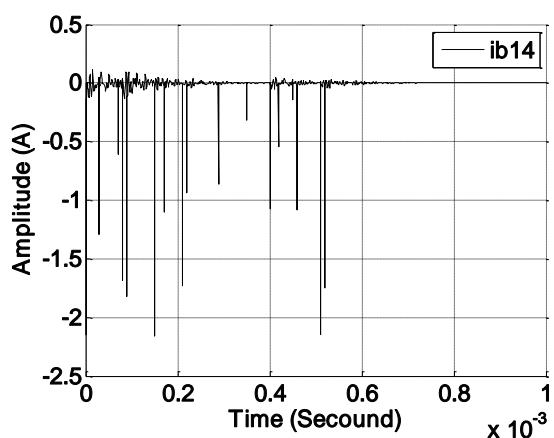


شکل (۳۷-۸): سیگنال اندازه گیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره

اول

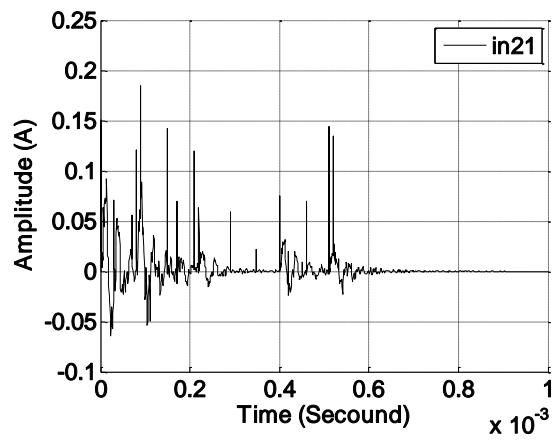


شکل (۳۸-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول

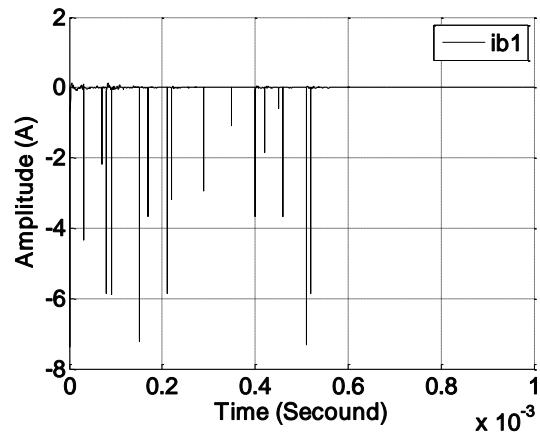


شکل (۳۹-۸): سیگنال اندازه گیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره

اول

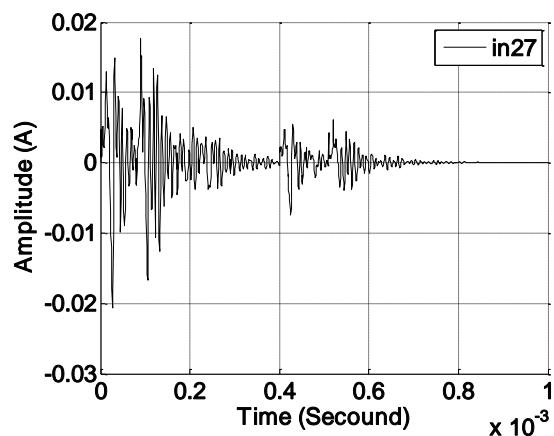


شکل(۴۰-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول

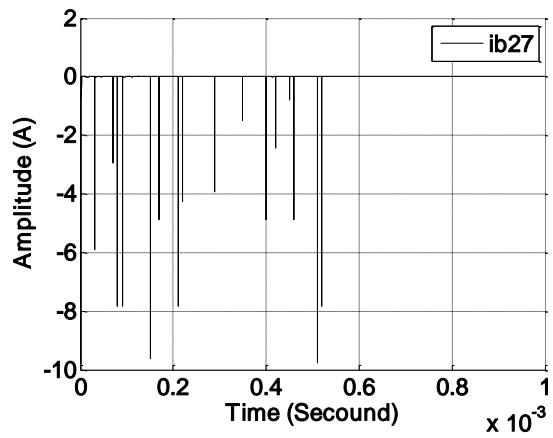


شکل(۴۱-۸): سیگنال اندازه گیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول

اول

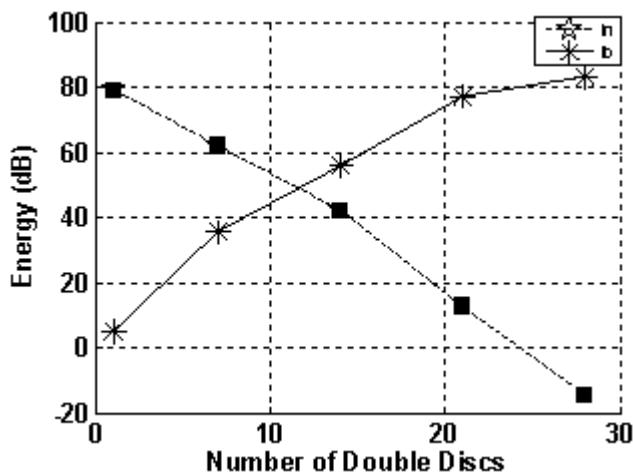


شکل(۴۲-۸): سیگنال اندازه گیری شده در نول سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول



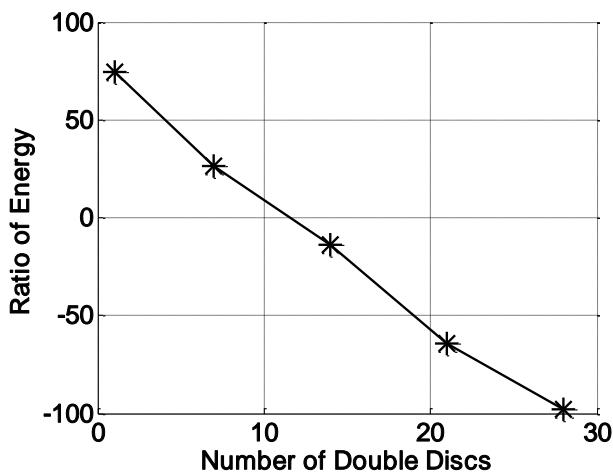
شکل(۴۳-۸): سیگنال اندازه کیری شده در بوشینگ سیم پیچی ناشی از تزریق پالس PD در گره اول

در این تحقیق جهت یافتن معیاری برای مکان یابی PD از کل انرژی هر یک از سیگنال های اندازه گیری شده که به صورت(۱۷-۷) تعریف شد، استفاده می شود. در واقع نشان داده خواهد شد که انرژی سیگنال حساسیت بالایی نسبت به توزیع PD در طول سیم پیچی دارد. در شکل (۴۵-۸) منحنی تغییرات انرژی سیگنالهای ثبت شده در سر های سیم پیچی نول و بوشینگ برحسب دسی بل(dB) نشان داده شده است.



شکل(۴۴-۸): تغییرات انرژی سیگنال از سر بوشینگ (\*) و نول(■) در طول سیم پیچی

اما در آزمایش PD شدت تخلیه نامشخص است، یعنی با توجه به مشخصات حفره و نوع PD اندازه پالسهای جریانی تولید شده متفاوت خواهد بود. بنابراین استفاده تنها از انرژی سیگنالهای ثبت شده در یکی از ترمینالهای ترانسفورماتور کافی نمی باشد، لذا از نسبت بین انرژیهای دریافتی از سیم نول و بوشینگ استفاده می شود. بنابراین در این الگوریتم مکان یابی به اندازه گیری سیگنال تخلیه از دو ترمینال احتیاج است. نرخ انرژی که به صورت نسبت انرژی دریافتی از نول و بوشینگ تعریف می شود به عنوان معیار نهایی مکان یابی تخلیه معرفی می گردد شکل(۴۵-۸).



شکل(۴۵-۸): نسبت انرژی سیگنالهای ثبت شده در طول سیم پیچی

## ۶-۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل ابتدا به مقایسه روش WHT با STFT پرداخته شد. در این مقایسه فهمیده شد که روش‌های خطی مانند STFT که بر مبنای FFT پایه گذاری شده اند طیف فرکانسی قابل قبولی برای سیگنالهای غیر ایستا ندارند. در ادامه نشان داده شد با

شبیه سازی خطاهای دائمی و گذرا با ملاحظه واقعیتهای فیزیکی آنها به نتایج واقع بینانه تری برای تفکیک خطای تخلیه جزئی از سایر خطاها در تست ضربه می‌توان مبادرت ورزید. همچنین نشان داده شد که نرخ انرژی سیگنالهای ثبت شده به عنوان معیاری محکم جهت مکان یابی تخلیه جزئی قابل استفاده می‌باشد.

## ۱-۹- نتیجه گیری

ترانسفورماتورهای قدرت قلب شکه‌های انتقال هستند. سهم بزرگی از تحقیقات و سرمایه گذاری‌ها در مبحث انتقال انرژی به این وسیله اختصاص یافته است، بنابراین بروز هر نوع خطا در آن همیشه باعث نگرانی بهره‌بردار و مشتریان برق بوده است. به منظور جلب نظر خریداران ترانسفورماتورها، آزمایش‌های مختلفی در مرحله کنترل کیفیت بر روی این وسیله انجام می‌شود. تجربه مشخص کرده است که در حدود ۳۰ درصد از خطاها بوجود آمده در مرحله بهره‌برداری خطاهای الکتریکی هستند. در این میان تخلیه جزئی به عنوان مهمترین عامل خطاهای الکتریکی بوجود آمده در سیستم عایقی شناخته شده است. این خطا معمولاً از یک نقطه ضعیف عایق مانند یک غده سلطانی شروع به رشد می‌کند و با ایجاد مسیرهای هدایتی درون سیستم عایقی باعث پوسیدگی و ضعیف شدن خواص عایقی و در نهایت از بین رفتن آن می‌شود. بنابراین شناسایی ویژگی‌های ذاتی و مکان وقوع آن به منظور جلوگیری از انتشار آسیب به قسمتهای دیگر عایق همیشه مورد توجه محققان بوده است. از جمله روش‌های آشکار سازی این خطا می‌توان به روش صوتی، شیمیایی، نوری و الکتریکی اشاره نمود. امروزه مشخص شده که روش‌های غیر از روش الکتریکی کارایی و دقت لازم را در شناسایی طبیعت و مکان خطا را ندارند.

شاید بتوان گفت تمامی الگوریتمهای کلاسه بندی و مکان یابی این نوع خطا بر مبنای مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایشات عملی و نمونه‌های شبیه سازی شده پایه گذاری شده‌اند. در این میان استفاده از انرژی‌های ثبت شده از ترمینالهای اندازه گیری به عنوان یک معیار کارآمد شناخته شده است. اما مشکلات متقابل نتایج عملی و شبیه سازی شده محدودیتهایی را در این روش پدیدار کرده است. که در این رساله به بررسی دقیق و چگونگی حل آنها اقدام شده است.

در یک جمع بندی کلی نتایج زیر حاصل شده است:

- الف- استفاده از معیار نرخ انرژی دریافتی از سیم نول و بوشینگ و بالعکس با حذف اثر شدت و نوع تخلیه می تواند در مکان یابی تخلیه مورد استفاده قرار گیرد.
- ب- مدلسازی حفره و منبع جریانی تخلیه بر اساس شواهد تجربی باعث کاهش خطای روش انرژی در مکانیابی تخلیه می شود. اما باعث بوجود آمدن مشکلاتی در زمینه تحلیل سیگنال غیر ایستای تخلیه می شود.
- ج- تبدیل WHT با بالا بردن رزولوشن زمانی-فرکانسی، پنجره سازی اتوماتیک و نویز زدایی سیگنال تخلیه کمک شایانی به تحلیل سیگنالهای غیر ایستا و حل مشکلات وابسته به آن می کند.
- د- گنجاندن مفهوم مکان و رشد شبه استاتیک در مدل سه خازنی حفره، باعث تفکیک موثرتر خطای تخلیه جزئی و سایر خطاهای گذرا و دائمی می شود.
- ه- استفاده از یک مقاومت اضافی به موازات خازن زمین در مدل تشریحی ترانس فور ماتور باعث واقعی تر شدن این مدل برای مدلسازی تخلیه می شود.

## ۲-۹- پیشنهادات

- الف- تمامی ملاحظات ثوری اعمال شده در این پایانامه جدید هستند. بنابراین بررسی صحت آنها با مقایسه نتایج عملی به عنوان اولین پیشنهاد بدیهی به نظر می رسد.
- ب- تمامی مدلها ارائه شده در این رساله خطی بودند بنابراین تحلیل سیگنالهای غیر خطی تخلیه به عنوان دومین پیشنهاد مطرح می شود.
- ج- استفاده از مدلها دینامیکی و قابل رشد منبع تخلیه به منظور شناسایی دقیق تر فیزیک تخلیه جزئی به عنوان سومین پیشنهاد ارائه می شود.
- د- استفاده همزمان از روشهای کلاسه بندی کننده و تبدیل WHT به منظور الگویابی عملی به عنوان آخرین پیشنهاد مطرح می شود.

## ض-۱- تعیین پارامترهای مدل مشروح [۶۴]

برای تحلیل مدل تشریحی شاخه های سلفی، خازنی و مقاومتی را بصورت جداگانه مورد بررسی قرار داده و نهایتاً با استفاده از قضیه جمع آثار نتیجه نهایی گرفته می شود(شکل ۸-۵). بنابراین شاخه های سلفی، خازنی و مقاومتی بطور جداگانه بررسی می گردند.

### ض-۱-۱- شاخه سلفی

برای شاخه سلفی داریم:

$$U_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + M_{n2} \frac{di_{L2}}{dt} + \dots + M_{1n} \frac{di_{Ln}}{dt} \quad (\text{ض-۱})$$

$$U_{Ln} = M_{n1} \frac{di_{L1}}{dt} + M_{n2} \frac{di_{L2}}{dt} + \dots + L_n \frac{di_{Ln}}{dt}$$

با نوشتتن ولتاژ شاخه های سلفی به شکل بردار به ترتیب ذیل داریم:

$$U_{bL} = \begin{bmatrix} U_{bL1} \\ U_{bL2} \\ \vdots \\ U_{bLn} \end{bmatrix} I_{\omega_{bL}} = \begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{i}_{L2} \\ \vdots \\ \dot{i}_{Ln} \end{bmatrix} M_{\omega} = \begin{bmatrix} L_1 & M_{1,2} & \dots & M_{1,n-1} & M_{1,n} \\ M_{2,1} & L_2 & \dots & M_{2,n-1} & M_{2,n} \\ M_{n-1,1} & M_{n-1,2} & \dots & L_{n-1} & M_{n-1,n} \\ M_{n,1} & M_{n,2} & \dots & M_{n,n-1} & L_n \end{bmatrix}$$

$$U_{bL} = M \dot{I}_{bL} \quad (\text{ض-۲})$$

در ادامه به تشریح جریان تزریقی در سلفها می پردازیم. جهت ادامه کار سعی داریم ولتاژ شاخه ها را به ولتاژ گرهها تبدیل کنیم به همن منظور ابتدا ماتریس تلاقي در شبکه سلفی را مطابق با قواعد مدار بدست آوریم.

$$A = \begin{bmatrix} +1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & +1 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & +1 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

عبارتیست از ماتریس تلاقي شبکه القائی بنابراین داریم:

$$U_{bL} = A^T U \quad (\text{ض-۳})$$

که در این رابطه  $U$  بردار ولتاژ گرههای است. پس داریم:

$$A^T U = M \dot{I}_{bL} \quad (\text{ض-}4)$$

$$M^{-1} A^T U = \dot{I}_{bL} \quad (\text{ض-}5)$$

رابطه (4-۳) را در ماتریس  $A$  ضرب می کنیم داریم:

$$AM^{-1} A^T U = A \dot{I}_{bL} \quad (\text{ض-}6)$$

$$H.U = \dot{I}_L \quad (\text{ض-}7)$$

که در رابطه اخیر  $AM^{-1} A^T = H$  و  $A \dot{I}_{bL} = \dot{I}_L$  با توجه به انتخاب انجام شده در رابطه با شماره گذاری گرهها، برای هر دو نوع زوج دیسک واژگون و درهم یکسان می باشد.

### ض-۱-۲- شاخه خازنی

مشابه شاخه سلفی می توان جریان تزریقی برای شبکه خازنی را به. شکل زیر محاسبه کرد.

$$q_i = C_{i0}(U_i - U_0) + \dots + C_{ij}(U_i - U_j) + \dots + C_{in}(U_i - U_n) \quad (\text{ض-}8)$$

$$i = 0, 1, \dots, n$$

$$U_0 = 0$$

با مرتب کردن رابطه اخیر داریم:

$$(\text{ض-}9)$$

$$q_i = -C_{i0}U_0 - C_{i1}U_1 - \dots + \left( \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n C_{ij} \right) U_i + \dots + C_{in}U_n$$

با توجه به رابطه اساسی در مدار  $q = CU$  داریم:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 1}}^n C_{1j} & -C_{12} & \dots & -C_{n1} \\ -C_{21} & \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 2}}^n C_{2j} & \dots & -C_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -C_{n1} & -C_{n2} & \dots & \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq n}}^n C_{nj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (\text{ض-10})$$

بنابراین برای جریان تزریقی داریم:

$$\dot{Q} = I_c = CU \quad (\text{ض-11})$$

با یکبار مشتق گرفتن از رابطه اخیر داریم :

$$\dot{I}_c = C\ddot{U} \quad (\text{ض-12})$$

شكل خاص ماتریس  $C$  به شکل زیر است :

$$C = \begin{bmatrix} C_1 + k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & C_2 + k_2 + k_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_{n-1} + k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & \dots & -k_n & C_n + k_n \end{bmatrix} \quad (\text{ض-13})$$

$C$  : عبارتست از ماتریس خازنی گره ها

### ض-۱-۳- شاخه اهمی

تصویر مستقیم در این مورد می توانیم نشان دهیم .

$$I_G = GU \quad (\text{ض-14})$$

$$\dot{I}_G = G\dot{U} \quad (\text{ض-15})$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} & \dots & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_n} & -\frac{1}{R_n} \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{R_n} & \frac{1}{R_n} \end{bmatrix} \quad (\text{ض-۱۶})$$

**G** : عبارتست از ماتریس هدایت الکتریکی

ماتریس **C** و **G** برای زوج دیسک در هم متفاوت هستند. در مدل سازی یک زوج دیسک اثر زوج دیسک های بالا و پایین همین زوج دیسک در فرکانس مورد نظر توسط ظرفیت های قرار گرفته در بالا و پایین مدل در نظر گرفته شده است. در واقع فرض می شود که یک سطح هم پتانسیل از بین فاصله موجود بین زوج دیسک مورد نظر و زوج دیسکهای مجاور عبور می کند.

با فرض گره  $n$  به عنوان گره ورودی و گره صفر بعنوان انتهای زمین شده سیم پیچ، برای ولتاژ گره **U** و بردار جریان (بردار تحریک) **I** داریم :

$$U = [U_1 \quad U_2 \quad \dots \quad U_{n-1} \quad U_n]^T \quad (\text{ض-۱۷})$$

$$I = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad I_n]^T \quad (\text{ض-۱۸})$$

حال می توان قانون کیرشهاf را بصورت برداری زیر نوشت :

$$I = I_C + I_G + I_L \quad (\text{ض-۱۹})$$

با توجه به روابط بدست آمده برای شاخه های سلفی، خازنی و اهمی، می توان به دستگاه معادلات دیفرانسیل خطی معمولی مرتبه دو زیر رسید که دارای **N** معادله است.

$$\dot{I} = C\ddot{U} + G\dot{U} + HU \quad (\text{۲۰-۳})$$

این معادله در تئوری ارتعاشات نیز مطرح است، سیستمهای فیزیکی که دارای این مدل ریاضی هستند، سیستمهای نوسانی میرا و در حالت  $G=0$ ، سیستم نوسانی نامیرا نامیده می شوند.

## ض-۲- تابع انتقال ولتاژ

با در نظر گرفتن تبدیل لاپلاس از رابطه (ض-۲۷) داریم :

$$s \cdot I(S) = S^2 \cdot C \cdot U(S) + S \cdot G \cdot U(S) + H \cdot U(S) \quad (\text{ض-}21)$$

$$s \cdot I(S) = (S^2 C + sG + H)U(s) \quad (\text{ض-}22)$$

رابطه فوق را می توان بصورت زیر نوشت :

$$U(s) = T(s) \cdot I(s) \quad (\text{ض-}23)$$

که در آن ماتریس  $T$  برابر است با :

$$T(s) = s(s^2 C + sG + H) \quad (\text{ض-}24)$$

مشخص است که ماتریس  $T$  در ارتباط با عکس ماتریس ادمیتانس گره هاست. رابطه (30-۳) در

شكل گسترده خود بصورت زیر است :

$$\begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ \vdots \\ U_{n-1}(s) \\ U_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1}(s) & \dots & T_{1,n}(s) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ T_{n,1}(s) & \dots & T_{n,n}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ض-}25)$$

مشخص است که بردار تحریک فقط در ستون آخر غیر صفر است و می توان نوشت :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1(s) = T_{1,n}(s)I_n(s) \\ U_2(s) = T_{2,n}(s)I_n(s) \\ \dots \\ U_{n-1}(s) = T_{n-1,n}(s)I_n(s) \\ U_n(s) = T_{n,n}(s)I_n(s) \end{array} \right. \quad (\text{ض-}26)$$

با تقسیم معادلات بر ولتاژ گره ورودی  $U_n(S)$  و جایگزین کردن جریان  $I_N(S)$  در معادلات، بر

طبق رابطه ذیل :

$$I_n(s) = \frac{U_n(s)}{Z_{in}(s)} \quad (\text{ض-}27)$$

خواهیم داشت :

$$\begin{cases} \frac{U_1(s)}{U_2(s)} = T_{1,n}(s) \frac{1}{Z_{in}(s)} \\ \dots \\ \frac{U_1(s)}{U_n(s)} = T_{1,n}(s) \frac{1}{Z_{in}(s)} \\ \dots \\ 1 = T_{n,n}(s) \frac{1}{Z_{in}(s)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_1(s) = \frac{T_{1,n}(s)}{Z_{in}(s)} \\ \dots \\ \alpha_j(s) = \frac{T_{j,n}(s)}{Z_{in}(s)} \\ \dots \\ T_{n,n}(s) = Z_{in}(s) \end{cases} \quad (\text{ض-۲۸ و ۲۹})$$

در این روابط  $ZIN(s)$  امپدانس ورودی سیم پیچ است و  $\alpha_j(s)$  تابع انتقال ولتاژ در گره  $j$  نامیده می شود در واقع تابع انتقال ولتاژ بدین مفهوم است که در صورت داشتن ولتاژ گره  $n$ ، ولتاژ گره دیگر چه مقدار می شود؟

تنش الکتریکی روی عایق‌های دو واحد سیم پیچ را که در مجاورت یکدیگر به فاصله

$$\Delta X_{j+1} = X_{j+1} - X_j \quad \text{از یکدیگر قرار دارند می توان از رابطه زیر بدست آورد.}$$

$$E(s) = \frac{U_{j+1}(s) - U_j(s)}{x_{j+1} - x_j} \quad (\text{ض-۳۰}) \quad \text{تابع تنش الکتریکی}$$

با تقسیم صورت و مخرج رابطه اخیر بر  $U_n(s)$  داریم :

$$\frac{E(s)}{U_n(s)} = \frac{\alpha_{j+1}(s) - \alpha_j(s)}{\Delta x_{j+1}} \quad (\text{ض-۳۱}) \quad \text{تنش}$$

$$\frac{E(s)}{U_n(s)} = \frac{T_{j+1,n}(s) - T_{j,n}(s)}{\Delta x_{j+1} \cdot Z_{in}(s)} \quad (\text{ض-۳۲})$$

مشخص است که حداکثر تنش الکتریکی روی عایق به ازاء صفرهای امپدانس ورودی  $Zin$  و قطبهای توابع  $T_{j,n}(S)$  و  $T_{j+1,n}(S)$  رخ می دهد بنابراین بر عکس آنچه که معمولاً بیان می شود. فرکانسهای تشدید داخلی سیم پیچ (قطبهای تابع انتقال ولتاژ  $\alpha(s)$ ) با فرکانسهای تشدید ترمینال (صفرهای امپدانس ورودی سیم پیچ  $Zin$ ) یکی نیست.

### ض-۳- مقادیر ویژه مدل مشروح

معادله بیان کننده مدل مشروح را مجدداً در نظر می گیریم :

$$\dot{I} = C\ddot{U} + C\dot{U} + HU$$

با اعمال تبدیلات :

$$\begin{cases} V = \dot{U} \\ \dot{V} = \ddot{U} \end{cases} \quad (\text{ض-33})$$

معادله را به فرم معادلات حالت می تویسیم. داریم :

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C^1 G & -C^{-1} H \\ E_n & 0_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^0 \\ C^1 \end{bmatrix} I \quad (\text{ض-34})$$

در این رابطه  $E_a$  و  $0_n$  به ترتیب ماتریس‌های واحد و صفر از بعد  $2n$  می باشند. ماتریس سیستم نیز از بعد  $2n$  است یعنی در مجموع می توان به  $2n$  مقدار ویژه  $(\lambda)$  رسید. جهت محاسبه مقادیر ویژه این سیستم می توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$|\lambda^2 C + \lambda G + H| = 0 \quad (\text{ض-35})$$

مقادیر ویژه معادله فوق عبارتند از :

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_{0,i} \quad (\text{ض-36})$$

این رابطه یک مساله تعیین صفر تابع، برای متغیر  $\lambda$  است. عیب این روش محاسبه مقادیر ویژه در ایناست که پاسخ را به فرم بسته بدست نمی دهد. بنابراین تاثیر پارامترهای مدار یعنی  $r_{pi}$ ,  $L_{pi}$ ,  $C_{pi}$  را در مقادیر ویژه نمی توان مستقیماً بررسی کرد. بنابراین در مرحله طراحی جهت بررسی آلترناتیوهای ساخت، مجبور به استفاده از شبیه سازی های متعدد هستیم. صفت مهم موجود در معادله مدل مشروح، مثبت موکد بودن ماتریس های  $G, C$  و  $H$  است. تحت این شرایط این معادله فقط مقادیر ویژه مخلوط با مقدار حقیقی منفی دارد. مشخص است که مقادیر ویژه مخلوط با توجه به رابطه زیر می توان فرکانس‌های تشدید و میرائیها را بسادگی محاسبه کرد.

$$f_{0,i} = \frac{\omega_{0,i}}{2\pi} \quad (\text{ض-37})$$

$$\zeta_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_{0,i}^2}} \quad (\text{ض-38})$$

چون ماتریس‌های  $C$ ,  $H$  و  $G$  حقیقی و مثبت موکد هستند، بنابراین می توان ثابت کرد که فرکانس‌های تشدید یا کوچک شدن مقدار ظرفیتها، اندوکتانسها و یا هدایت الکتریکی افزایش می یابند.

میرائیها با افزایش هدایتهای الکتریکی افزایش و با افزایش ظرفیتهای الکتریکی کاهش می یابند. این مساله با رفتار یک مدار تشدید موازی مطابقت کامل دارد.

## ض-۱-۲

جدول(ض-۲-۱): مشخصات پالس‌های تزریقی مصنوعی در منبع دینامیکی

| number | Appear.<br>(ms) | Rise<br>(ns) | Width<br>(ns) | Decay<br>(ns) | Peak<br>(A) |
|--------|-----------------|--------------|---------------|---------------|-------------|
| 1      | 0.001           | 0.81         | 4             | 10            | 4           |
| 2      | 0.0017          | 1.8          | 8             | 20            | 5           |
| 3      | 0.002           | 44.1         | 200           | 500           | 15          |
| 4      | 0.03            | 9            | 40            | 100           | 6           |
| 5      | 0.07            | 1.8          | 8             | 20            | 3           |
| 6      | 0.08            | 58.5         | 240           | 600           | 8           |
| 7      | 0.09            | 39.6         | 150           | 399           | 8           |
| 8      | 0.15            | 9            | 24            | 60            | 10          |
| 9      | 0.21            | 9            | 32            | 80            | 8           |
| 10     | 0.22            | 63           | 320           | 800           | 8           |
| 11     | 0.26            | 9            | 20            | 50            | 5           |
| 12     | 0.29            | 4.5          | 12            | 30            | 4           |
| 13     | 0.31            | 1.8          | 4             | 10            | 3           |
| 14     | 0.345           | 18           | 48            | 120           | 12          |
| 15     | 0.346           | 9            | 36            | 90            | 9           |
| 16     | 0.348           | 7.2          | 32            | 80            | 8           |
| 17     | 0.349           | 2.7          | 8             | 20            | 1.5         |
| 18     | 0.42            | 9            | 8             | 20            | 2.5         |
| 19     | 0.425           | 0.9          | 4             | 10            | 1           |
| 20     | 0.45            | 0.576        | 3             | 8             | 0.8         |
| ۲۱     | ۰.۴۱            | ۰.۵۵         | ۲             | ۶             | ۰.۵         |

## ض-۲-۳-مشخصات مدل ترانس فور ماتور مورد مطالعه

جدول(ض-۲-۲): پارامتر های خازنی و مقاومتی سیم پیچی فشار قوی ترانسفورماتور مورد مطالعه

| Ce     | Kd        | Kc        | Kb        | Ka        |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 9 (PF) | 0.32 (PF) | 0.31 (PF) | 3.05 (PF) | 4.47 (PF) |

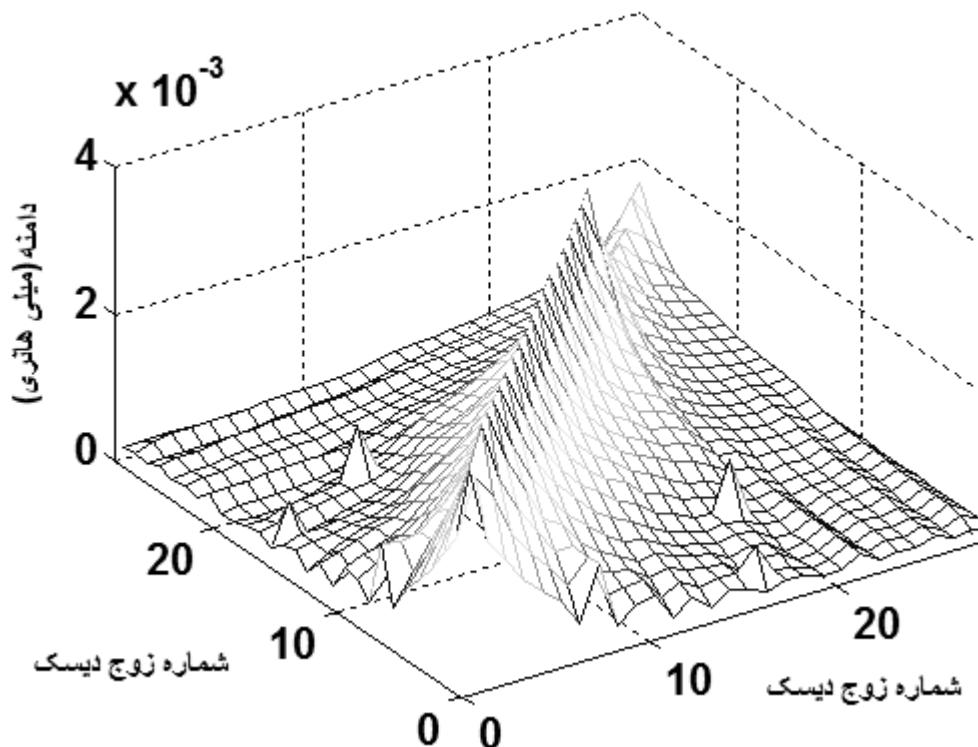
| Rd (KΩ) | Rc (KΩ) | Rb (KΩ) | Ra (KΩ) | Frequency KHz |
|---------|---------|---------|---------|---------------|
| 4970    | 5130    | 522     | 356     | 10            |
| 2480    | 2560    | 260     | 178     | 20            |
| 994     | 1000    | 104     | 71.2    | 50            |
| 497     | 513     | 52.2    | 35.6    | 100           |
| 248     | 256.7   | 26      | 17.8    | 200           |

مقدار مقاومت اضافه شده به موازات خازن  $C_e$  ۵۰۰ کیلو اهم انتخاب شده است.

## جدول ض-۲-۳-ماتریس اندوکتا نس مدل سیم پیچی فشار قوی ترانس مطالعه شده

| 7        | 6        | 5        | 4        | 3        | 2        | 1        | شماره زوچ دیسک |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| 0.000346 | 0.000727 | 0.000943 | 0.00119  | 0.001534 | 0.001843 | 0.00288  | 1              |
| 0.000748 | 0.001067 | 0.001353 | 0.001691 | 0.002292 | 0.002602 | 0.001843 | 2              |
| 0.0011   | 0.001451 | 0.001845 | 0.002328 | 0.003131 | 0.002292 | 0.001534 | 3              |
| 0.001438 | 0.001907 | 0.002437 | 0.003104 | 0.002328 | 0.001691 | 0.00119  | 4              |
| 0.001895 | 0.00244  | 0.003086 | 0.002437 | 0.001845 | 0.001353 | 0.000943 | 5              |
| 0.002411 | 0.003072 | 0.00244  | 0.001907 | 0.001451 | 0.001067 | 0.000727 | 6              |
| 0.003075 | 0.002411 | 0.001895 | 0.001438 | 0.0011   | 0.000748 | 0.000346 | 7              |
| 0.002397 | 0.001896 | 0.001572 | 0.0013   | 0.0011   | 0.001057 | 0.001103 | 8              |
| 0.001887 | 0.001545 | 0.001222 | 0.000938 | 0.000712 | 0.000473 | 0.000175 | 9              |
| 0.00154  | 0.00127  | 0.000994 | 0.000748 | 0.000605 | 0.000511 | 0.000374 | 10             |
| 0.00124  | 0.001001 | 0.000788 | 0.000639 | 0.000559 | 0.00053  | 0.000432 | 11             |
| 0.001085 | 0.000842 | 0.000621 | 0.000484 | 0.00038  | 0.000213 | 0.000064 | 12             |
| 0.000877 | 0.000703 | 0.000575 | 0.000518 | 0.000422 | 0.000345 | 0.000256 | 13             |
| 0.000758 | 0.000566 | 0.000457 | 0.000392 | 0.000319 | 0.000194 | 3.11E-05 | 14             |
| 0.000555 | 0.000424 | 0.000346 | 0.000324 | 0.000287 | 0.000242 | 0.000205 | 15             |
| 0.000466 | 0.000356 | 0.0003   | 0.000264 | 0.000242 | 0.000233 | 0.000136 | 16             |
| 0.000342 | 0.000267 | 0.000215 | 0.000142 | 0.000083 | 0.000055 | 0.000018 | 17             |
| 0.000331 | 0.000304 | 0.000271 | 0.000236 | 0.000182 | 0.000141 | 0.000105 | 18             |
| 0.000996 | 0.000262 | 0.00023  | 0.000197 | 0.000166 | 0.000091 | 0.000082 | 19             |
| 0.000202 | 0.00015  | 7.97E-05 | 0.000011 | 0.000009 | 0.000007 | 3.3E-06  | 20             |
| 0.000135 | 9.48E-05 | 0.000063 | 0.000049 | 4.19E-05 | 3.11E-05 | 1.54E-05 | 21             |
| 0.000234 | 0.000229 | 0.000211 | 0.0002   | 0.00019  | 0.000179 | 0.000157 | 22             |
| 0.000037 | 0.000014 | 9.2E-06  | 0.000007 | 5.8E-06  | 3.75E-06 | 1.43E-06 | 23             |
| 0.000132 | 0.000127 | 0.000123 | 0.000122 | 0.0001   | 0.000082 | 0.000052 | 24             |
| 0.000137 | 0.000136 | 0.000112 | 8.6E-05  | 5.68E-05 | 3.74E-05 | 1.82E-05 | 25             |
| 0.000223 | 0.000201 | 0.000187 | 0.000152 | 0.000132 | 0.000125 | 0.000104 | 26             |
| 6.95E-05 | 4.48E-05 | 2E-05    | 9.43E-06 | 7.1E-06  | 5.46E-06 | 3.33E-06 | 27             |
| 0.000177 | 0.000159 | 0.000158 | 0.000151 | 0.000154 | 0.000011 | 3.79E-05 | 28             |
| 14       | 13       | 12       | 11       | 10       | 9        | 8        | شماره زوچ دیسک |
| 3.11E-05 | 0.000256 | 0.000064 | 0.000432 | 0.000374 | 0.000175 | 0.001103 | 1              |
| 0.000194 | 0.000345 | 0.000213 | 0.00053  | 0.000511 | 0.000473 | 0.001057 | 2              |
| 0.000319 | 0.000422 | 0.00038  | 0.000559 | 0.000605 | 0.000712 | 0.0011   | 3              |
| 0.000392 | 0.000518 | 0.000484 | 0.000639 | 0.000748 | 0.000938 | 0.0013   | 4              |
| 0.000457 | 0.000575 | 0.000621 | 0.000788 | 0.000994 | 0.001222 | 0.001572 | 5              |
| 0.000566 | 0.000703 | 0.000842 | 0.001001 | 0.00127  | 0.001545 | 0.001896 | 6              |
| 0.000758 | 0.000877 | 0.001085 | 0.00124  | 0.00154  | 0.001887 | 0.002397 | 7              |
| 0.000957 | 0.00107  | 0.001276 | 0.001511 | 0.001886 | 0.002373 | 0.003075 | 8              |
| 0.001112 | 0.001262 | 0.001497 | 0.001859 | 0.0024   | 0.003075 | 0.002373 | 9              |
| 0.00128  | 0.001494 | 0.001834 | 0.002389 | 0.003073 | 0.0024   | 0.001886 | 10             |
| 0.001504 | 0.001845 | 0.002381 | 0.003075 | 0.002389 | 0.001859 | 0.001511 | 11             |
| 0.001841 | 0.002381 | 0.003069 | 0.002381 | 0.001834 | 0.001497 | 0.001276 | 12             |
| 0.002377 | 0.003065 | 0.002381 | 0.001845 | 0.001494 | 0.001262 | 0.00107  | 13             |
| 0.003075 | 0.002377 | 0.001841 | 0.001504 | 0.00128  | 0.001112 | 0.000957 | 14             |
| 0.002381 | 0.00185  | 0.001491 | 0.001244 | 0.00106  | 0.000895 | 0.00072  | 15             |
| 0.001824 | 0.001478 | 0.001248 | 0.001069 | 0.000929 | 0.000799 | 0.000633 | 16             |
| 0.001437 | 0.00125  | 0.001085 | 0.00095  | 0.000818 | 0.000643 | 0.00047  | 17             |
| 0.0012   | 0.001032 | 0.000899 | 0.000798 | 0.000702 | 0.00051  | 0.000427 | 18             |
| 0.001089 | 0.00095  | 0.000844 | 0.000742 | 0.000607 | 0.000446 | 0.000358 | 19             |
| 0.000964 | 0.00085  | 0.000761 | 0.000654 | 0.000497 | 0.000343 | 0.00025  | 20             |
| 0.000674 | 0.000596 | 0.000519 | 0.000427 | 0.000328 | 0.000237 | 0.000175 | 21             |
| 0.000553 | 0.0005   | 0.000456 | 0.000396 | 0.000312 | 0.00025  | 0.000233 | 22             |
| 0.000458 | 0.0004   | 0.000353 | 0.000249 | 0.00018  | 0.000127 | 0.000084 | 23             |
| 0.000403 | 0.000367 | 0.000317 | 0.000258 | 0.000205 | 0.000164 | 0.000141 | 24             |
| 0.000357 | 0.000316 | 0.000272 | 0.00023  | 0.000192 | 0.000162 | 0.000146 | 25             |
| 0.000398 | 0.000363 | 0.000323 | 0.000295 | 0.000275 | 0.000263 | 0.000244 | 26             |
| 0.000273 | 0.000223 | 0.000185 | 0.000155 | 0.00013  | 0.000108 | 9.06E-05 | 27             |
| 0.000312 | 0.000265 | 0.000239 | 0.000227 | 0.000217 | 0.000206 | 0.000195 | 28             |

| شماره زوچ دیسک | 21       | 20       | 19       | 18       | 17       | 16       | 15       |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1              | 1.54E-05 | 3.3E-06  | 0.000082 | 0.000105 | 0.000018 | 0.000136 | 0.000205 |
| 2              | 3.11E-05 | 0.000007 | 0.000091 | 0.000141 | 0.00055  | 0.000233 | 0.000242 |
| 3              | 4.19E-05 | 0.000009 | 0.000166 | 0.000182 | 0.000083 | 0.000242 | 0.000287 |
| 4              | 0.000049 | 0.000011 | 0.000197 | 0.000236 | 0.000142 | 0.000264 | 0.000324 |
| 5              | 0.000063 | 7.97E-05 | 0.00023  | 0.000271 | 0.000215 | 0.0003   | 0.000346 |
| 6              | 9.48E-05 | 0.00015  | 0.000262 | 0.000304 | 0.000267 | 0.000356 | 0.000424 |
| 7              | 0.000135 | 0.000202 | 0.000996 | 0.000331 | 0.000342 | 0.000466 | 0.000555 |
| 8              | 0.000175 | 0.00025  | 0.000358 | 0.000427 | 0.00047  | 0.000633 | 0.00072  |
| 9              | 0.000237 | 0.000343 | 0.000446 | 0.00051  | 0.000643 | 0.000799 | 0.000895 |
| 10             | 0.000328 | 0.000497 | 0.000607 | 0.000702 | 0.000818 | 0.000929 | 0.00106  |
| 11             | 0.000427 | 0.000654 | 0.000742 | 0.000798 | 0.00095  | 0.001069 | 0.001244 |
| 12             | 0.000519 | 0.000761 | 0.000844 | 0.000899 | 0.001085 | 0.001248 | 0.001491 |
| 13             | 0.000596 | 0.00085  | 0.00095  | 0.001032 | 0.00125  | 0.001478 | 0.00185  |
| 14             | 0.000674 | 0.000964 | 0.001089 | 0.0012   | 0.001437 | 0.001824 | 0.002381 |
| 15             | 0.000769 | 0.001102 | 0.001255 | 0.001439 | 0.001838 | 0.002363 | 0.003056 |
| 16             | 0.00088  | 0.001265 | 0.001477 | 0.001817 | 0.002375 | 0.003062 | 0.002363 |
| 17             | 0.001005 | 0.001486 | 0.001831 | 0.00237  | 0.003065 | 0.002375 | 0.001838 |
| 18             | 0.001187 | 0.001845 | 0.002385 | 0.003075 | 0.00237  | 0.001817 | 0.001439 |
| 19             | 0.001467 | 0.002403 | 0.003095 | 0.002385 | 0.001831 | 0.001477 | 0.001255 |
| 20             | 0.001789 | 0.003115 | 0.002403 | 0.001845 | 0.001486 | 0.001265 | 0.001102 |
| 21             | 0.002066 | 0.001789 | 0.001467 | 0.001187 | 0.001005 | 0.00088  | 0.000769 |
| 22             | 0.001738 | 0.001426 | 0.001163 | 0.00096  | 0.000834 | 0.000706 | 0.000623 |
| 23             | 0.001073 | 0.000906 | 0.00079  | 0.000711 | 0.00064  | 0.000569 | 0.000508 |
| 24             | 0.000873 | 0.000758 | 0.000664 | 0.000592 | 0.000533 | 0.000482 | 0.000438 |
| 25             | 0.000712 | 0.000631 | 0.000568 | 0.000512 | 0.000441 | 0.000419 | 0.000388 |
| 26             | 0.000622 | 0.000567 | 0.000519 | 0.00048  | 0.00045  | 0.000428 | 0.000415 |
| 27             | 0.000571 | 0.000519 | 0.000473 | 0.000435 | 0.000401 | 0.000367 | 0.000326 |
| 28             | 0.000528 | 0.00049  | 0.000453 | 0.000423 | 0.000399 | 0.000382 | 0.000358 |
| شماره زوچ دیسک | 28       | 27       | 26       | 25       | 24       | 23       | 22       |
| 1              | 3.79E-05 | 3.33E-06 | 0.000104 | 1.82E-05 | 0.000052 | 1.43E-06 | 0.000157 |
| 2              | 0.00011  | 5.46E-06 | 0.000125 | 3.74E-05 | 0.000082 | 3.75E-06 | 0.000179 |
| 3              | 0.000154 | 7.1E-06  | 0.000132 | 5.68E-05 | 0.0001   | 5.8E-06  | 0.00019  |
| 4              | 0.000151 | 9.43E-06 | 0.000152 | 8.6E-05  | 0.000122 | 0.000007 | 0.0002   |
| 5              | 0.000158 | 2E-05    | 0.000187 | 0.000112 | 0.000123 | 9.2E-06  | 0.000211 |
| 6              | 0.000159 | 4.48E-05 | 0.000201 | 0.000136 | 0.000127 | 0.000014 | 0.000229 |
| 7              | 0.000177 | 6.95E-05 | 0.000223 | 0.000137 | 0.000132 | 0.000037 | 0.000234 |
| 8              | 0.000195 | 9.06E-05 | 0.000244 | 0.000146 | 0.000141 | 0.000084 | 0.000233 |
| 9              | 0.000206 | 0.000108 | 0.000263 | 0.000162 | 0.000164 | 0.000127 | 0.00025  |
| 10             | 0.000217 | 0.00013  | 0.000275 | 0.000192 | 0.000205 | 0.00018  | 0.000312 |
| 11             | 0.000227 | 0.000155 | 0.000295 | 0.00023  | 0.000258 | 0.000249 | 0.000396 |
| 12             | 0.000239 | 0.000185 | 0.000323 | 0.000272 | 0.000317 | 0.000353 | 0.000456 |
| 13             | 0.000265 | 0.000223 | 0.000363 | 0.000316 | 0.000367 | 0.0004   | 0.0005   |
| 14             | 0.000312 | 0.000273 | 0.000398 | 0.000357 | 0.000403 | 0.000458 | 0.000553 |
| 15             | 0.000358 | 0.000326 | 0.000415 | 0.000388 | 0.000438 | 0.000508 | 0.000623 |
| 16             | 0.000382 | 0.000367 | 0.000428 | 0.000419 | 0.000482 | 0.000569 | 0.000706 |
| 17             | 0.000399 | 0.000401 | 0.00045  | 0.000441 | 0.000533 | 0.00064  | 0.000834 |
| 18             | 0.000423 | 0.000435 | 0.00048  | 0.000512 | 0.000592 | 0.000711 | 0.00096  |
| 19             | 0.000453 | 0.000473 | 0.000519 | 0.000568 | 0.000664 | 0.00079  | 0.001163 |
| 20             | 0.00049  | 0.000519 | 0.000567 | 0.000631 | 0.000758 | 0.000906 | 0.001426 |
| 21             | 0.000528 | 0.000571 | 0.000622 | 0.000712 | 0.000873 | 0.001073 | 0.001738 |
| 22             | 0.000569 | 0.000629 | 0.000685 | 0.000811 | 0.001001 | 0.001251 | 0.002084 |
| 23             | 0.000617 | 0.000701 | 0.000767 | 0.000936 | 0.001174 | 0.001411 | 0.001251 |
| 24             | 0.00068  | 0.000797 | 0.000892 | 0.001134 | 0.001424 | 0.001174 | 0.001001 |
| 25             | 0.000777 | 0.000954 | 0.001108 | 0.001422 | 0.001134 | 0.000936 | 0.000811 |
| 26             | 0.00095  | 0.001237 | 0.001424 | 0.001108 | 0.000892 | 0.000767 | 0.000685 |
| 27             | 0.001246 | 0.001649 | 0.001237 | 0.000954 | 0.000797 | 0.000701 | 0.000629 |
| 28             | 0.001653 | 0.001246 | 0.00095  | 0.000777 | 0.00068  | 0.000617 | 0.000569 |



شکل(ض-۲-۱): نمودار مکانی ماتریس اندوکتانس

- [۱] آ-ک-ساونی، "طراحی ساختمان و محاسبه ماشینهای الکتریکی"، ترجمه و تدوین مهندس لسانی، ۱۳۷۰.
- [۲] جعفر شیخ زاده، "مدلسازی و مقایسه رفتاری انواع سیم پیچهای دیسکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.
- [۳] Gabe paoletti, Alex Goluber "parial discharge theory and application to electrical systems" TAPPI conference, march 1999.
- [۴] D.Fink, H.W.Beary "Standard handBook for hlectrical hngineers" pages 4-117, 118, McGraw Hill Book Company, 1987.
- [۵] "Westinghouse electrical maintenance hing" P.19-24 and 15 and p 7-23, Westinghouse electric corporation printing Division, Trafford. Pa. 1976.
- [۶] J. Millman, H.Taub "pulse digital and switching wave forms" pp. 50-54, Mc Grow Hill Book Company 1965.
- [۷] C. Kane, B. Lease, A. Goluber, I. Blokhintsev, "practical application of periodic monitoring of electrical equipment for partial discharges" NETA conferences, March, 1998.
- [۸] R.H. Khawaja, W.G.Ariastina and T.R.Black burn, "partial discharge in oil-impregnated insulation", proceeding of the 7th international conferences on properties and Applications of Dielectric materials, June-1-5, Nagoya, 2003.

- [¹] P.Roman "maitainig electrical equipment for peak performance" IEEC conferences, sept., 1997.
- [¹·] P.Roman "maitainig electrical equipment for peak performance" IEEC conferences, Sept., 1997.
- [¹¹] Kind. D, Feser. K, "high voltage test techniques", 2<sup>nd</sup> edn.vieweg/SBA Publications, 1999.
- [¹²] C.J.Kim and M.H.Yoo, "distribution failure prediction and diagnosis technology," Proc.Korea Inst.Elect.engineeres, vol.45, no 5, May 1995.
- [¹³] IEC "power transformer-insulation levels and dielectric tests" IEC Publ. 76-3, 1980.
- [¹⁴] S. Arun kumar et al. "impulse testing of power transformer – Amodel refrence Approach" proc. IEEE sci. meas. Tech, (to appear)
- [¹⁵] "IEEE guide for transformer impulse tests", IEEE Std. C57.98-1993, 17 November, 1994.
- [¹⁶] B. Heller and B. Ververka "surge phenomena in electrical machine." London, LLife Book. pp. 263-298. 1998.
- [¹⁷] Lenz. M, Feser. K, "wavelet transform application during impulse tests of power transformer", Paper presened at the 13<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2003, Delf, The Netherlands, Paper P.03-11, , 25-29 August 2003.
- [¹⁸] Leibfried. T, Feser. K, "monitoring of power transformers", 1999.
- [¹⁹] Malewski. R, Gockenbach. R, Maier. R, Fellmann. K, Claudi. A , "Five years of monitoring the impulse test of power transformers with digital recorders and the transfer function method", CIGRE Session, Paris, France, paper 12-201,1992.
- [²·] Singh. BP, Bhoomaiah. A, Tiwari. RK," Interturn fault detection in power transformer using wavelet technique", Paper presented at 12<sup>th</sup> Iinternational Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2001, Bangalore, India, paper 6-24. , 20-24 August 2001.
- [²¹] Lenz. M, Feser. K, Gharepetian. GB , "detection and localization of short circuit in transformer winding based on wavelet analysis", 12<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2001, Bangalore, India, Paper 6-20, and 20-24 August, 2001.
- [²²] Purkait. P, Chakravorti. S, "pattern classification of impulse faults diagnosis in transformers during impulse tests", Power Eng Soc Winter Meet 3:2181-2186, 2002.
- [²³] Gabe. paoletti, Alex. Goluber, "partial discharge theory and application to electrical systems" TAPPI conference, March 1999.
- [²⁴] Purkait. P, Chakravorti. S, "an expert system for fault diagnosis in transformer during impulse tests", Power Eng Soc Winter Meet 3:2181-2186, 2000.

- [၁၅] De. A, Chatterjee. N, "recognition of impulse fault pattern in transformers using Kohonen's self-organizing feature map", IEEE Trans Power Delivery 17:489-494, 2002.
- [၁၆] C.Kumaravelu, R. Sarathi, V Jayashankar, S usa and K.Vdayakumar" partial discharge during impulse test" IEEE Anunal conference on Electrical insulation and Dielectric phenomena, pp.7803- 7910, 2003.
- [၁၇] "partial discharge measurements" IEC 60270, 3<sup>rd</sup> edition, 1997.
- [၁၈] G.C.Stone,"practical techniques for measuring pd in operating equipment", IEEE Electrical Insulation magazine, vol, 7, no, 4.pp, 9-19, 1991.
- [၁၉] T.H.Crowly, "automated diagnosis of large power transformers using adaptive model-based monitoring", IEE's technical report TR 90-003, June, 1990.
- [၁၁] Michel. Duval, "a review of fault detectable by gas-in-oil analysis in Transformers", IEEE electrical insulation magazine May/June 2002, Vol. 18. No. 3.
- [၁၂] Sumiko.Sakaguchi and Mitsutoshi Oyama "Application of Maxwell solvers to Pd propagation \_ part III: PD propagation in GIS"
- [၁၃] D.Aschenbrenner, H.G. Kranz "diagnosis potential of different partial discharge feature of diverse Pd defect in N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> mixture"proceeding of the 7<sup>th</sup> international conference on properties and application of dielectric material, June 1-5, Nagoya, 2003.
- [၁၄] Thomas M. Bilodeau, Gerald J "the design of a novel high speed partial discharge diagnosis system"
- [၁၅] "IEEE trial\_use Guide for the detection of acoustic emission from partial discharges in oil immersed power transformer" IEEE STD C.57.127-2000.
- [၁၆] Qingguo.Chen, Xixiu Gong, "The UHF method for measurement of partial discharge in oil immerged insulation" proceeding of the 7<sup>th</sup> international conference on properties and application of dielectric material, June 1-5, Nagoya, 2003.
- [၁၇] Junfeng.Gui, Whensheng. Gao "locating partial discharge in power transformer by electrical method" proceeding of the 7<sup>th</sup> international conference on properties and application of dielectric material, June 1-5, Nagoya, 2003.
- [၁၈] Xiaoning.Wang, Deheng. Zhu, Fuqi Li "analysis and rejection of noises from partial discharge (PD) on site testing environment" proceeding of the 17<sup>th</sup> international conference properties and application of dielectric material, June 1-5 Nagoya, 2003.
- [၁၉] J.Cameron "advanced PD Inference in on field measurements" part I: noise rejection
- [၁၀] Detlev.W, Gross," signal transmission and calibration of on-line partial discharge measurements".
- [၁၁] N. C. Sahoo, M. M. A. Salama and R. Bartnikas, "Trends in partial discharge Pattern Classification:A Survey", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2; April 2005.

- [۴۱] Raja k, Devaux F and Lelaidier S, "recognition of discharge source using UHF PD signatures" IEEE Electrical Insulation Magazin, vol. 18, No.5, September/ Octobor, pp. 8-14, 2002.
- [۴۲] C.R.Lee, Wei Wang, Z.G. Tang, Y.S. Ding " PD pattern recognition in trans former using UHF technology", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indiana polis, IN, USA, 19-2 September 2004.
- [۴۳] P. Morshuis, "assessment of dielectric degradation by dltra-wide-band PD detection", IEEE trans. DEI, VoI. 2, pp. 744-760, 1995.
- [۴۴] J. C. Devins, " the physics of partial discharges in solid dielectrics," IEEE.Trans., Elect.Insul., Vol. 19, pp. 475- 495, 1984.
- [۴۵] اصغر اکبری، "اندازه گیری و بازشناسی تخلیه های جزئی و اتباط آن با نوع عیب در عایق تجهیزات فشار قوی" ،پایانمه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی، ۱۳۷۶
- [۴۶] Jufeng Gui, Wensheng Gao, Kexiong Tan, Shengyou Gao, "locating partial discharge in power transformer by electrical method".proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on Properties and Application of Dielectric Material.June 1-5, Nagoya, 2003.
- [۴۷] A.Akbari, P.Werle, H.Borsi, E.Gockenbach, "transfer function-based partial discharge localization in power transformers:A Feasibility Study",IEEE electrical insulation magazine,p.22-23, 2002.
- [۴۸] P.Werle, A.Akbari, H.Borsi, E.Gockenbach, "localization and evaluation of Partial discharge on power transformer using sectional winding transfer function",12<sup>th</sup> ISH, international symposioum on high voltagee, Bangalore, India, August 2001.
- [۴۹] S. N. Hettiyawatte, Z.D .Wang, P.A. Crossely, A. Darwin,G.Edwards,"experimental investigation into the propagation of partial Discharge pulses in transformers ",IEEE 2002.
- [۵۰] ح. زارعی، "بررسی و مقایسه سیگنالهای تخلیه جزئی و پارازیت در حوزه زمان و فرکانس" ، پایانمه کارشناسی، دانشگاه صنعت آب و برق، زمستان ۸۱ .
- [۵۱] K.N.Smith, R.A.Perez," locating partial discharge in power generating system using neutral networks and wavelet", annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena.IEEE, wave, 2002.
- [۵۲] ۴ P.werle, A. Akbari, H.Borsi, E.Gockenbach" a continues parameter High frequency model based on trawelling ware for transformer Diagnosis purpose" IEEE international symposium on Electrical insulation, Boston MA usa, April 7-10, 2002.
- [۵۳] A. morched L.martf. J. ottenrager "a High frequency transformer model for the Emtp.
- [۵۴] Jarier A. Quintana, "detailed lossy-transformer model, phD-Thesis, Rensselaer polytechnic inistitue Troy, Ny. may 2000.

- [۵۵] Robert Michael marko, thermal modeling of a natural –convection-cooled oil-immersed distribution transformer, master thesis, university of manitoloa/ conaday, 1997.
- [۵۶] D.J.Wilcox, W.G.Gurely, T.P.McHale and M.Conton, "application of modified model theory in the modeling of practical transformers". IEE proceeding –C, vol.139. No. 69, November 1992.
- [۵۷]. M.Vakilian, a nonlinear lumped parameter model for transient studies of single phase core from transformers, ph.D. Thesis, Rensselaer polytechnic inistitue, Troy. NY., 1993.
- [۵۸]. F.de Leon and A.sernlyen, "complete transformer model for electromagnetic transients, "IEEE transactions on power delivery, vol. 9, No.1. pp. 231-239 junuary 1994.
- [۵۹] Z.D. wang, P.A. Crossely, K.J. cronick" a simulation model for propagation of partial discharge pulses in transformers", proceeding of international conference on power system technology, Beijing , China, pp.151-155, August 18-21, 2003.
- [۶۰] LV. Fangcheng, Liu Yunpeng, Liu Lei and Li chengrong, "pulse propagation model of partial discharge in transformer winding", international symposium on electrical insulation, june 5-9, 2005 Japan.
- [۶۱] M. T. Mehrjerdi and M. Vakilian, "a method for calculation of transformer detailed model parameter during Lightning surges", 6<sup>th</sup> Iranian Electrical Engineering conf., pp.87-92 ,April 1998.
- [۶۲] S. N. Hettiyawatte, P. A. Crossely, Z. D. Wang, A. Darwin, G. Edwards" simulation of a transformer winding for Partial Discharge Studies", IEEE power eng., soc. Winter, Meeting, vol.2,pp.1394-1399,2002.
- [۶۳] Mohammad S. Naderi, M. Vakilian, T. R. Blackburn, B. T. Phung,Mehdi. S. Naderi and A. Nasiri , "a hybrid transformer model for determination of partial discharge location in transformer winding", IEEE. transaction On Dielectric and Electrical Insulation. Vol.,4,no.2; April 2007.
- [۶۴] گثورک قره پتیان " مدلسازی سیم پیچی ترانسفورماتور برای حالات گذرای خیلی سریع " پایان نامه دکتری دانشکده برق دانشگاه تهران. ۱۳۷۶.
- [۶۵] Degenef. RC, "a general method for determining resonance in transformer winding", IEEE Trans. Power Appar. Syst. 96:423-430, 1997.
- [۶۶] Gharehpetian. GB, Mohseni. H, Gehnen. M, Moeller. K, "resonance phenomena in inhomogeneous transformer winding due to fast transients", 9<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Graz, Austria, paper 6756. 28 August-1 September ,1995.

- [<sup>7V</sup>] Gharepetian. GB, Mohseni. H, Moeller. K, "hybrid modeling of inhomogeneous transformer winding for very fast transient overvoltage studies", IEEE Trans. Power Delivery, 13:157-163, 1998.
- [<sup>7A</sup>] Peter H.F. Morshuis and Johan J. Smit, "partial discharges at dc Voltage: Their Mechanism, Detection and Analysis", IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation Vol. 12, No. 2; April 2005.
- [<sup>79</sup>] H. Hall and R. Russck, 1954, PIEE, Vol.101, ptII, 47-55.
- [<sup>V+</sup>] R. H. Khawaja, W.G. Ariastina, " partial discharge behaviour in oil-impregnated insulation", 7th int. conf. on dielec. Material, June 1-5, 2003.
- [<sup>V1</sup>] Xuzhu Dong, Deheng Zhu, Changchang Wang, Kexiong Tan, "simulation of transformer PD pulse propagation and monitoring for 500KV substation." IEEE transaction on dielectrics and electrical insulation, Vol.6, No.6, December 1999
- [<sup>VY</sup>] IEEE C57.113-1991, IEEE guide for partial discharge measurement in liquid-filled power transformer and shunt reactor, IEEE Power Engineering Society, 1992.
- [<sup>VY</sup>] Z .D. Wang, P.A. crossley, K. J. Cronik,D.H Zho," an algorithm for partial discharge location in distribution power transformer".IEEE2000.
- [<sup>Vf</sup>] Mayr. O, "Beirtrage zur Theorie des ststischen und des dynamischen Lichtbogen", Aach Elektrotech Berlin 37:588-608, 1943.
- [<sup>Vd</sup>] Cassie. AM, "Arcrupture and circuit severity: a new theory", CIGRE Rep. 102, Paris, France, 1939.
- [<sup>Vf</sup>] A. E. Vlastos, "the resistance of sparks, J.Appl.Phys" vol.43, no. 4, pp. 1986-1989, Apr.1972.
- [<sup>VW</sup>]S. I. Barranik et al., "resistance and inductance of gas arc," Sov.Phys.\_Tech.Phys.,vol. 19,pp.1499-1453, May 1975.
- [<sup>VH</sup>] Raul. Montano, Marley. Becerra, Vernon. Cooray, Mahbubr. Rahman and Prasanna. Liyanage,"resistance of spark channels" IEEE trans., plasma sci., vol. 34, no. 5, Oct. 2006.
- [<sup>V9</sup>] Kuffel. E, Zaengl. WS, "high voltage engineering fundamentals", Pergamon Press, Oxford. 1984
- [<sup>H+</sup>] Tseng KJ, Wang Y, Vilathgamuwa. DM, "an experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronic simulations", IEEE trans. Power Electron, 1997.
- [<sup>H1</sup>] C. caironi, "interest & utility of time frequency and time scale transform in partial discharge analysis" in proc, IEEE int, symp., electrical insulation, April 2002, pp 516-522.

- [^γ] Xiadong wang, Baoqing Li, Zhiwei Liu, Harry T. Roman, onofrio L. Russo, ken K. chine and Kenneth farmer , "analysis of partial discharge signal using the Hilber-Huang Transform ", IEEE trans, power delivery, vol., 21.3. July 2006.
- [^δ] A.V.Oppenheim, and R.W. Schafer, discrete-time signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989, pp. 713-718, pp.775-777.
- [^ε] Zhao Zhijin and Shang junna "a new method for modulation types recognition based on the time frequency representation" IEEE Ices., 02, pro 2002.
- [^δ] Rabiner, L.R., and R.W. Schafer, digital processing of speech signals, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1978.
- [^†] Welch, P.D, "The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms," IEEE Trans. audio electroacoustics, Vol. AU-15, pp. 70-73, June 1967.
- [^ν] Cohen, A., I. Daubechies, B. Jawerth, P. Vial , Multiresolution analysis, wavelets and fast wavelet transform on an interval, CRAS Paris, Ser. A, t. 316, pp. 417-421,1993.
- [^η] Coifman, R.R., Y. Meyer, M.V. Wickerhauser , Wavelet analysis and signal processing in Wavelets and their applications,"M.B. Ruskai et al. (Eds.), pp. 153-178, Jones and Bartlett, 1992.
- [^η] Boul Alen and peter J. Black" An Effective Real –time Implementation of winger – will Distribution. IEEE trans. power. Del., 2003.
- [^η] Osama A. Ahmad and mostafa M. fahmy "critically sampled Gabor transform with localized biorthoGonal function" IEEE, 1998.
- [^η] Michel Daoud Ya comb, Gustaro Fraidenraich "The symmetrical  $\gamma - \kappa$  distribution" IEEE, 2004.