



دانشگاه مازندران

موضوع:

اندازه‌گیری و شبیه سازی تاثیر مولفه های هارمونیک بر تلفات  
ترانسهای توزیع و ارائه مدل مناسب برای محاسبه تلفات

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد  
رشته مهندسی برق - گرایش قدرت

استاد راهنما:

دکتر عبدالحسین طحانی

استاد مشاور:

دکتر حسن آبروش

نگارش:

سید محمد باقر ساداتی

شهریورماه ۱۳۸۷

## چکیده

بارهای غیرخطی و تجهیزاتی از شبکه که دارای مشخصه غیرخطی هستند عامل اصلی اعوجاج شکل موج سینوسی ولتاژ و جریان در شبکه های برق می باشند که با تغییر شکل موج، هارمونیک ها را ایجاد می کنند. با افزایش روز افزون بارهای غیرخطی اندازه گیری، تجزیه و تحلیل دقیق هارمونیک ها امری ضروری به نظر می رسد تا از تلفات انرژی، ضایعات و اثرات مخرب آن بر تجهیزات شبکه جلوگیری بعمل آید. یکی از عناصر مهم شبکه ترانسفورماتور توزیع می باشد که در زمره اساسی ترین و با ارزش ترین تجهیزات در شبکه های برق رسانی هستند و کارکرد صحیح آنها نقش مهمی در ضریب اطمینان شبکه دارد. امروزه بار ترانسفورماتورها- که در فرکانس نامی عمل می کنند- به تدریج هارمونیک شده است. مولفه این هارمونیکها بر تلفات ترانسفورماتورها تاثیر گذاشته و آنها را افزایش می دهد. در چنین شرایطی ترانسفورماتورها زودتر از موعد مقرر معیوب می شوند و یا می سوزند. بنابراین نیاز است وقتی ترانسفورماتور تحت بار هارمونیک قرار می گیرد تلفات و ظرفیت آن به دقت محاسبه شود تا هرچه بهتر و بهینه تر از ظرفیت آن استفاده شود.

در این پایان نامه سعی بر آن است که تاثیر مولفه های هارمونیک بر تلفات ترانسفورماتور ها خصوصا تاثیر هارمونیک جریان - که در شبکه چشمگیرتر و بیشتر می باشد- بر تلفات اهمی، تلفات گردابی سیم پیچ ها و دیگر تلفات پراکنده بررسی شود. همچنین مدلی از ترانسفورماتور با توجه به تلفات پراکنده در محیط هارمونیک ارائه می شود.

در نهایت تلفات یک دستگاه ترانسفورماتور ۱۵ کیلوولت آمپر تحت بار هارمونیک با تنظیم Set up آزمایشگاهی در واحد تعمیرات ترانسفورماتور شرکت توزیع نیرو برق مازندران، اندازه گیری می شود.

## فهرست مطالب

ج	فهرست شکل ها
خ	فهرست جدول ها
۱	۱- هارمونیک و منابع ایجاد آن
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- توصیف هارمونیک
۴	۳-۱- مجموع اغتشاشات هارمونیک، توان و ضریب قدرت
۶	۴-۱- منابع هارمونیک
۷	۱-۴-۱- کوره های قوس الکتریکی
۸	۲-۴-۱- جریان تحریک ترانسفورماتورها
۱۱	۵-۱- استانداردهای هارمونیک
۱۲	۱-۵-۱- محدودیتهای اغتشاشات هارمونیک ولتاژ
۱۲	۲-۵-۱- محدودیتهای اغتشاشات هارمونیک جریان
۱۴	۲- تلفات ترانسفورماتورها و تاثیر هارمونیک بر آن
۱۵	۱-۲- مقدمه
۱۶	۲-۲- تلفات ترانسفورماتورها
۱۷	۳-۲- تلفات بارداری
۱۷	۱-۳-۲- تلفات اهمی
۱۹	۲-۳-۲- تلفات جریان گردابی سیم پیچ ها
۱۹	۱-۲-۳-۲- اثر پوستی در سیم پیچ ها
۲۲	۲-۲-۳-۲- اثر مجاورت
۳۰	۳-۳-۲- دیگر تلفات پراکنده در ترانسفورماتور
۳۳	۴-۲- تلفات بی باری
۳۳	۱-۴-۲- تلفات هیستریزیس
۳۵	۲-۴-۲- تلفات جریان گردابی (فوکو) در هسته
۳۸	۵-۲- تاثیر هارمونیک شبکه بر تلفات ترانسفورماتور
۳۸	۱-۵-۲- تاثیر هارمونیک بر تلفات بی باری
۳۸	۱-۱-۵-۲- تاثیر هارمونیک ولتاژ
۳۹	۲-۱-۵-۲- تاثیر هارمونیک جریان

۴۰	۲-۵-۲- تاثیر هارمونیک بر تلفات بارداری
۴۰	۲-۵-۲-۱- تاثیر هارمونیک جریان بر تلفات $dc$
۴۱	۲-۵-۲-۲- تاثیر هارمونیک جریان بر تلفات گردابی سیم پیچ ها
۴۴	۲-۵-۲-۳- تاثیر هارمونیک جریان بر دیگر تلفات پراکنده
۴۴	۲-۵-۴- محاسبه تلفات بار داری در بار هارمونیکی
۴۵	۲-۵-۵- دستورالعمل پیشنهادی برای ارزیابی عمر ترانسفورماتورها
۴۶	<b>۳- مروری بر کارهای انجام شده</b>
۴۷	۴-۱- مقدمه
۴۸	۳-۲- مروری بر کارهای انجام شده
۶۴	<b>۴- ارائه مدل مناسبی از ترانسفورماتور در محیط هارمونیکی</b>
۶۵	۴-۱- مقدمه
۶۶	۴-۲- نظریه ترانسفورماتور
۶۶	۴-۲-۱- ترانس ایده آل
۶۹	۴-۲-۲- ترانسفورماتور واقعی
۷۰	۴-۲-۳- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی تحت بار هارمونیکی
۷۴	۴-۲-۳-۱- پارامتر تلفات جریان گردابی سیم پیچ ها
۷۵	۴-۲-۳-۲- مقاومت دیگر تلفات پراکنده
۷۶	۴-۲-۳-۳- مدار معادل پیشنهادی ترانسفورماتور
۷۷	<b>۵- اندازه گیری ها، محاسبات و شبیه سازی</b>
۷۸	۶-۱- مقدمه
۷۹	۵-۲- Setup تست
۷۹	۵-۲-۱- ترانسفورماتور
۸۰	۵-۲-۲- بار هارمونیکی
۸۰	۵-۲-۳- سیستم نمایش و ثبت اطلاعات
۸۱	۵-۳- انجام آزمایش
۸۱	۵-۴- نتایج آزمایش ها
۸۱	۵-۴-۱- آزمایش اول
۸۲	۵-۴-۲- آزمایش دوم
۸۴	۵-۴-۳- آزمایش سوم

۸۵	۴-۴-۵- نتایج تمامی آزمایشها
۸۷	۵-۵- محاسبه تلفات بر اساس استانداردهای موجود
۸۷	۱-۵-۵- آزمایش اول
۸۹	۲-۵-۵- آزمایش دوم
۹۱	۳-۵-۵- آزمایش سوم
۹۳	۶-۵- محاسبه ظرفیت ترانسفورماتور تحت بارهای هارمونیکی
۹۴	۷-۵- محاسبه تلفات بر اساس شبیه سازی
۹۸	۸-۵- مقایسه بین نتایج
۱۰۰	۶- نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۰۳	مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نمونه ای از موج غیر سینوسی با هارمونیک اول و پنجم ۴
- شکل ۱-۲: شکل موج های نمونه ولتاژ و جریان کوره الکتریکی ۷
- شکل ۱-۳: منحنی حلقه هیستریزیس ۹
- شکل ۱-۴: ترانسفورماتور تک فاز ۱۰
- شکل ۱-۵: شار و منحنی مغناطیسی و جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور (بدون هیستریزیس) ۱۰
- شکل ۱-۶: شار و منحنی مغناطیسی و جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور (با هیستریزیس) ۱۱
- شکل ۲-۱: تقسیم بندی تلفات ترانسفورماتور ۱۶
- شکل ۲-۲: جریان عبوری از رسانا ۱۸
- شکل ۲-۳: هادی حامل جریان ۲۰
- شکل ۲-۴: فاکتور اثر پوستی و فاکتور اثر مجاورت  $G$  بر حسب  $\frac{d}{\delta} = \left(\frac{d}{\Delta}\right)$  ۲۲
- شکل ۲-۵: بوجود آمدن جریان گردابی در اثر پدیده مجاورت ۲۳
- شکل ۲-۶: هادی ای که میدان مغناطیسی را قطع می کند و جریان گردابی در آن بوجود می آید ۲۵
- شکل ۲-۷: میدان مغناطیسی پراکنده در یک سیم پیچی ۲۹
- شکل ۲-۸: میدان الکترو مغناطیسی تولید شده به وسیله جریان بار در ترانسفورماتور ۳۱
- شکل ۲-۹: دیگر تلفات پراکنده بعنوان تابعی از قدرت ترانسفورماتورها در دمای ۸۵ درجه ۳۱
- شکل ۲-۱۰: نسبت دیگر تلفات پراکنده به تلفات بار بعنوان تابعی از قدرت ترانسفورماتور ۳۲
- شکل ۲-۱۱: مشخصه منحنی هسته ترانسفورماتور دارای حلقه هیستریزیس ۳۴
- شکل ۲-۱۲: سطح مقطع یک ورقه از هسته حامل جریان فوکو ۳۶
- شکل ۲-۱۳: جریان گردابی تولید شده در یک لایه موروک از هسته بوسیله میدان مغناطیسی متغیر با زمان ۳۶
- شکل ۳-۱: تنظیمات آزمایشگاهی برای محاسبه تلفات ۴۹
- شکل ۳-۲: ولتاژ و جریان ورودی برای ۲۰۰ ولت ۴۹
- شکل ۳-۳: تغییرات  $PF$  و  $CF$  به ازای تغییرات ولتاژ ورودی ۵۰
- شکل ۳-۴: بار غیر خطی تغذیه شده توسط منبع سینوسی ۵۱
- شکل ۳-۵: شکل موج ولتاژ و جریان هارمونیک در حالت ۳ ۵۲
- شکل ۳-۶: مقاومت  $AC$  سیم پیچ ها بعنوان تابعی از مجذور فرکانس ۵۴

- شکل ۳-۷: تنظیمات آزمایشگاهی با منبع تغذیه غیرسینوسی و بار غیرخطی ۵۶
- شکل ۳-۸: تلفات هسته در ۴ حالت ۵۷
- شکل ۳-۹: تلفات سیم پیچ اولیه در ۴ حالت ۵۷
- شکل ۳-۱۰: تلفات سیم پیچ ثانویه در ۴ حالت ۵۷
- شکل ۳-۱۱: فاکتور تلفات جریان گردابی اصلاح شده به عنوان تابعی از مرتبه هارمونیک برای هادی های مسی با ضخامتهای مختلف ۶۱
- شکل ۳-۱۲: فاکتور تلفات گردابی به صورتی تابعی از مرتبه هارمونیک ۶۳
- شکل ۴-۱: ترانسفورماتور تکفاز ایده آل بدون بار ۶۷
- شکل ۴-۲: مدار معادل ترانسفورماتور تکفاز ایده آل ۶۹
- شکل ۴-۳: ترانسفورماتور تکفاز واقعی ۶۹
- شکل ۴-۴: مدار معادل یک ترانسفورماتور تکفاز واقعی ۷۰
- شکل ۴-۵: مدار معادل ترانسفورماتور تحت بار هارمونیکی ۷۴
- شکل ۴-۶: مدار معادل اصلاح شده ترانسفورماتور ارجاع داده به طرف اولیه ۷۶
- شکل ۵-۱: نحوه قرار گیری ترانسفورماتور ۷۹
- شکل ۵-۲: تصویری از دستگاه پاورآنالیزر ۸۰
- شکل ۵-۳: شکل موج ولتاژ و جریان دو سر بار در آزمایش اول ۸۲
- شکل ۵-۴: شکل موج ولتاژ و جریان دو سر بار در آزمایش دوم ۸۳
- شکل ۵-۵: شکل موج ولتاژ و جریان دو سر بار در آزمایش سوم ۸۴
- شکل ۵-۶: افزایش تلفات تحت بار هارمونیکی ۱ ۸۶
- شکل ۵-۷: افزایش تلفات تحت بار هارمونیکی ۲ ۸۶
- شکل ۵-۸: افزایش تلفات تحت بار هارمونیکی ۳ ۸۷
- شکل ۵-۹: بلوک مشتق دوم بر اساس تعریف ریاضی ۹۷
- شکل ۵-۱۰: شبیه سازی مدار معادل ترانسفورماتور ۹۸
- شکل ۵-۱۱: مقایسه تلفات تحت بار سینوسی ۹۹
- شکل ۵-۱۲: مقایسه تلفات تحت بار هارمونیکی ۹۹

## فهرست جدول‌ها

۸	جدول ۱-۱: ولتاژ هارمونیکی تولید شده در کوره ذوب قراضه و کوره گرم کننده
۱۲	جدول ۱-۲: محدودیتهای هارمونیکی ولتاژ بر اساس استاندارد ۵۱۹-۱۹۹۲
۱۳	جدول ۱-۳: محدودیتهای هارمونیکی جریان بر اساس استاندارد ۵۱۹-۱۹۹۲
۴۹	جدول ۱-۳: نتایج آزمایشگاهی تحت بار هارمونیکی
۵۲	جدول ۲-۳: نتایج آزمایشگاهی تحت بار هارمونیکی
۵۴	جدول ۳-۳: کاهش جریان و توان نامی ترانسفورماتور تحت بار هارمونیکی
۵۵	جدول ۳-۴: جریان مجاز و تلفات ترانسفورماتور
۵۸	جدول ۳-۵: مقایسه روش محاسباتی و شبیه سازی
۸۲	جدول ۱-۵: نتایج اندازه گیری تلفات ترانسفورماتور در آزمایش اول
۸۳	جدول ۲-۵: نتایج اندازه گیری تلفات ترانسفورماتور در آزمایش دوم
۸۴	جدول ۳-۵: نتایج اندازه گیری تلفات ترانسفورماتور در آزمایش سوم
۸۵	جدول ۴-۵: نتایج آزمایشهای انجام شده
۸۷	جدول ۵-۵: مشخصات ترانسفورماتور ۱۵ کیلوولت آمپر
۸۷	جدول ۵-۶: مراتب هارمونیکی بار ۱
۸۸	جدول ۵-۷: فاکتور هارمونیکی تلفاتی گردابی سیم پیچ ها و دیگر تلفات پراکنده بار ۱
۸۹	جدول ۵-۸: تفکیک تلفات ترانسفورماتور تحت بار سینوسی و هارمونیکی
۸۹	جدول ۵-۹: مراتب هارمونیکی بار ۲
۹۰	جدول ۵-۱۰: فاکتور هارمونیکی تلفاتی گردابی سیم پیچ ها و دیگر تلفات پراکنده بار ۲
۹۱	جدول ۵-۱۱: تفکیک تلفات ترانسفورماتور تحت بار سینوسی و هارمونیکی
۹۱	جدول ۵-۱۲: مراتب هارمونیکی بار ۳
۹۲	جدول ۵-۱۳: فاکتور هارمونیکی تلفاتی گردابی سیم پیچ ها و دیگر تلفات پراکنده بار ۳
۹۲	جدول ۵-۱۴: تفکیک تلفات ترانسفورماتور تحت بار سینوسی و هارمونیکی
۹۳	جدول ۵-۱۵: مقادیر تلفات به صورت پریونیت
۹۴	جدول ۵-۱۶: تفکیک تلفات ترانسفورماتور تحت بار نامی و هارمونیکی برای هر سه بار
۹۴	جدول ۵-۱۷: جریان مجاز و ظرفیت ترانسفورماتور تحت سه بار هارمونیکی
۹۵	جدول ۵-۱۸: پارامترهای ترانسفورماتور برای شبیه سازی
۹۷	جدول ۵-۱۹: تفکیک تلفات ترانسفورماتور تحت بار نامی و هارمونیکی بر اساس شبیه سازی

## ۱-۱- مقدمه

اغتشاش و هارمونیک<sup>۱</sup> در شکل موج‌های ولتاژ و جریان از اوایل ورود برق  $ac$  در شبکه وجود داشت اما امروزه وسایل تولید کننده هارمونیک به سرعت در حال افزایش می باشد. در این وسایل از دیودها، تریستورها و ترانزیستورهای قدرت استفاده می شود. به سبب فواید زیاد این نیمه هادیها بارهای الکترونیک قدرت در آینده زیاد مورد توجه قرار می گیرند و در تمام سطوح قدرت از سطوح ولتاژ پایین تا سطوح ولتاژ بالا یافت می شوند. بنابراین در این فصل در ابتدا نظریه اساسی هارمونیک و روابط اصلی مربوط به هارمونیک ها بیان می شود. فرمول مجموع اغتشاشات هارمونیک<sup>۲</sup> نیز بیان شده و در مورد چگونگی تاثیر هارمونیک بر توان و ضریب توان نیز مطالبی بیان می شود. منابع هارمونیکی که در شبکه موجود می باشند معرفی می شوند. شکل موج های هارمونیکی جریان و ولتاژ که توسط این منابع تولید می شوند نیز نشان داده می شود. در آخر استانداردهایی بیان می شود تا اثر هارمونیک ولتاژ و جریان بر سیستم و مصرف کنندگان محدود شود.

---

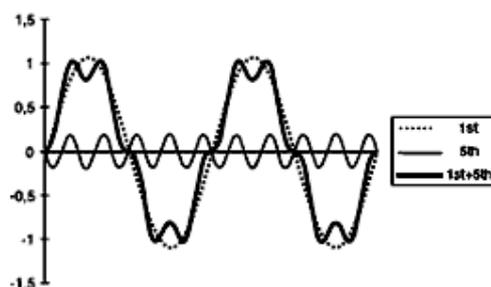
<sup>1</sup> Harmonics and distortion

<sup>2</sup> Total harmonic distortion

## ۱-۲- توصیف هارمونیک

شبکه ایده‌آل شبکه‌ای است که در آن انرژی الکتریکی به صورت ولتاژ و جریان سینوسی در فرکانس ثابت و سطوح ولتاژ مشخص از سوی نیروگاه‌ها به مراکز مصرف منتقل شود. اما در عمل وجود عناصر و تجهیزات با مشخصه غیرخطی به خصوص ادوات الکترونیک قدرت در بخش‌های مختلف تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی موجب پیدایش اعوجاج‌هایی در شکل موج سینوسی جریان و ولتاژ شبکه می‌شوند. پیشرفت سریع نیمه‌هادی انقلابی را در کنترل فرآیندهای صنعتی و تبدیل انرژی به وجود آورده است. نیمه‌هادی‌ها در مدارهای کلیدزنی، کنترل موتورهای جریان مستقیم و متناوب، جوشکاری کوره‌های الکتریکی، مولدهای برق بدون وقفه، لوازم خانگی و... مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آن جهت که نیمه‌هادی‌ها در هر نقطه از شکل موج ولتاژ ناگهان روشن یا خاموش می‌شوند حالت‌های گذرای با فرکانس نوسان بالا و دامنه میرا شونده پدید می‌آورند. اگر در هر پریود، عمل کلیدزنی در نقطه مشابهی انجام شود حالت گذرا شکلی متناوب به خود می‌گیرد. چنین سیگنال‌های غیرسینوسی را می‌توان با استفاده از بسط سری فوریه به صورت مجموعی سینوسی بیان نمود که به هارمونیک‌های شبکه موسومند که فرکانس آنها مضرب صحیحی از فرکانس شبکه می‌باشد. بنابراین منابع هارمونیکی مشخصه غیرخطی دارند و فرکانسی تولید می‌کنند که مضربی از فرکانس اصلی یا فرکانس شبکه هستند. مولفه اصلی یا همان هارمونیک اول فرکانس شبکه می‌باشد که توسط ژنراتورهای الکتریکی تولید می‌شود. هارمونیک دوم فرکانسی دو برابر فرکانس اصلی دارد و هارمونیک سوم فرکانس‌اش سه برابر فرکانس هارمونیک اول می‌باشد، در واقع هارمونیک  $n$ ام فرکانسی  $n$  برابر فرکانس اصلی دارد. بنابراین با مولفه اصلی  $50$  هرتز فرکانس هارمونیک دوم  $100$  هرتز و هارمونیک سوم  $150$  هرتز می‌باشد. هنگامی که اثر سلف‌ها و خازن‌های شبکه نیز مدنظر قرار گیرد اهمیت اعوجاج هارمونیکی دو چندان می‌شود.

در حقیقت چون سیگنال اعوجاج یافته دارای مولفه هایی با فرکانس های متفاوت می باشد در یکی از فرکانس ها امکان ایجاد تشدید بین یکی از خازن ها و سلف های معادل شبکه وجود دارد که به تبع آن دامنه هارمونیک مربوط به فرکانس تشدید نیز افزایش می یابد. شکل ۱-۱ شکل موجی را برای توصیف هارمونیک نشان می دهد.



شکل ۱-۱: نمونه ای از موج غیر سینوسی با هارمونیک اول و پنجم

### ۱-۳- مجموع اغتشاشات هارمونیک، توان و ضریب قدرت [۴]

منابع هارمونیکی که در شبکه وجود دارند از دلایل نگران کننده می باشند. بنابراین پارامترهای شبکه با این مشکلات هارمونیکی سروکار دارند. در ادامه پارامترهایی نظیر مجموع اغتشاشات هارمونیک، توان ظاهری، توان اکتیو، توان راکتیو و ضریب قدرت در حضور هارمونیک توصیف می شوند. برای موجهای جریان و ولتاژ منبع ( $I_s$  و  $V_s$ ) که از شکل طبیعی شان خارج شوند و به صورت غیر سینوسی باشند مقدار موثر به صورت زیر توصیف می شود:

$$I_s = \sqrt{I_{so}^2 + \sum_{h=1} I_{sh}^2} \quad (1-1)$$

$$V_s = \sqrt{V_{so}^2 + \sum_{h=1} V_{sh}^2} \quad (2-1)$$

$I_{so}$  مقدار موثر مؤلفه  $dc$  جریان،  $V_{so}$  مقدار موثر مؤلفه  $dc$  ولتاژ،  $V_{sh}$  مقدار موثر ولتاژ هارمونیک در

فرکانس هارمونیکی  $h$  و  $I_{sh}$  مقدار موثر جریان هارمونیکی در فرکانس هارمونیکی  $h$  می باشد. این روابط

برای محاسبه مجموع اغتشاشات هارمونیک مورد استفاده قرار می گیرد. از طرفی در اغلب شکل موج های جریان یا ولتاژ متناوب مقدار متوسط یا مقادیر  $dc$  برابر با صفر می باشد.

در این صورت روابط مجموع اغتشاشات هارمونیک جریان و ولتاژ به صورت زیر توصیف می شوند:

$$\%THD_i = 100 \times \sqrt{\sum_{h=1} \left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}}\right)^2} \quad (3-1)$$

$$\%THD_v = 100 \times \sqrt{\sum_{h=1} \left(\frac{V_{sh}}{V_{s1}}\right)^2} \quad (4-1)$$

متوسط توان تحویلی به بار با منبع ولتاژ سینوسی و جریان غیرسینوسی برابر است با:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_s i_{s1} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2} V_{s1} \sin \omega_1 t \cdot \sqrt{2} I_{s1} \sin(\omega_1 t - \phi) dt = V_{s1} I_{s1} \cos \phi_1 \quad (5-1)$$

$V_{s1}$  مقدار موثر ولتاژ منبع سینوسی،  $I_{s1}$  مقدار موثر مولفه اصلی جریان غیرسینوسی و  $\phi_1$  زاویه فاز بین ولتاژ  $V_s$  و مولفه اصلی جریان  $I_{s1}$  می باشد. در واقع مولفه های جریان فرکانس هارمونیک در متوسط توان حقیقی کشیده شده از منبع تاثیری ندارند و تنها مولفه اول در این توان تاثیر گذار می باشد. مولفه های هارمونیک با مقادیر بالا در مقدار توان راکتیو تاثیر دارند چون که توان راکتیو حاصلضرب ولتاژ و جریان در یک فرکانس هارمونیک معین در سینوس زاویه بین ولتاژ و جریان در همان فرکانس هارمونیک معین می باشد:

$$Q = \sum_h V_h I_h \sin \phi_h \quad (6-1)$$

$V_h$  مقدار موثر هارمونیک ولتاژ،  $I_h$  مقدار موثر هارمونیک جریان در فرکانس هارمونیک  $h$  و  $\phi_h$  زاویه فاز بین ولتاژ و جریان  $V_h$  و  $I_h$  می باشد. مولفه های هارمونیک با مقادیر بالا در مقدار توان ظاهری نیز تاثیر دارند چونکه مولفه توان راکتیو را افزایش می دهند. توان ظاهری تولید شده توسط ولتاژ و جریان موثر برابر است با:

$$S = V_s I_s \quad (7-1)$$

بنابراین ضریب قدرت شبکه نیز به صورت زیر توصیف می شود:

$$pf = \frac{P}{S} \quad (8-1)$$

$$pf = \frac{V_s I_{s1} \cos \varphi_1}{V_s I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \varphi_1$$

شکل موج غیرسینوسی جریان سبب می شود که مقدار  $\frac{I_{s1}}{I_s}$  کمتر شده و نهایتاً ضریب قدرت نیز کاهش می یابد. در مدارهای خطی با جریان و ولتاژ سینوسی ضریب قدرت همان  $\cos \varphi$  می باشد اما در مدارهای غیرخطی با ولتاژ و جریان های هارمونیک ضریب قدرت دیگر برابر با  $\cos \varphi$  نمی باشد. در این مدارها  $\cos \varphi_1$  ضریب قدرت جابجایی نامیده می شود. بنابراین ضریب قدرت واقعی معین شده در رابطه ۸-۱ شاخص واقعی اندازه شبکه برای تغذیه کردن بارهای معین می باشد.

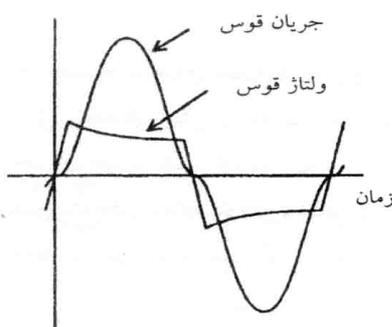
#### ۴-۱- منابع هارمونیک

یک بار غیرخطی وقتی تولید می شود که جریان بار متناسب با ولتاژ لحظه ای نباشد. جریانهای غیرخطی حتی وقتی که ولتاژ منبع یک موج سینوسی کامل باشد می توانند غیرسینوسی باشند. در حالت کلی منابع هارمونیک به ۳ دسته تقسیم می شوند:

- ۱- بارهای خانگی مثل گیرنده های تلویزیونی، لامپهای فلورسنت و ...
- ۲- بارهای تجاری و صنعتی مثل مبدل های دیودی و تریستوری، کوره های القایی و ...
- ۳- وسایل و تجهیزات کنترلی مثل ترانسفورماتورها، جبران کننده های استاتیکی و ...

۱-۴-۱- کوره‌های قوس الکتریکی<sup>۳</sup> [۵] و [۱]

در عمل به دلیل متغیر بودن طول قوس الکتریکی حین عمل ذوب، هارمونیک‌هایی که توسط کوره‌های ذوب قراضه و گرم کننده تولید می‌گردند به طور پیوسته در حال تغییر هستند. مقدار تولید هارمونیک بسته به نوع کوره‌ها هارمونیک سوم ولتاژ می‌باشد. در ضمن اعوجاج کلی هارمونیک تولید شده توسط این کوره‌ها به خصوص هنگامی که الکترودهای آنها در ابتدای کار داخل قطعات آهن قراضه قرار می‌گیرند به شدت نامنظم و غیرقابل پیش بینی است. از طرف دیگر هارمونیک‌های غالب ولتاژ در کوره‌های گرم کننده هارمونیک‌های سوم و پنجم می‌باشند. از آنجا که در این کوره‌ها حمامی از فلز مذاب تشکیل می‌شود اعوجاج کلی هارمونیک‌های آنها منظم و با ثبات تر است. شکل ۱-۲ شکل موجهای نمونه ولتاژ و جریان قوس را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: شکل موج‌های نمونه ولتاژ و جریان کوره الکتریکی [۱]

جرقه‌های نامنظم در کوره باعث می‌شود تا هدایت جریان در نیم سیکل مثبت و منفی یکسان نباشد و همین امر موجب می‌شود تا در شبکه‌های متصل به کوره‌های الکتریکی نیز آلودگی هارمونیک وجود داشته باشد. بیشترین مقادیر نمونه مولفه‌های هارمونیک ولتاژ قوس در جدول ۱-۱ ارائه گردیده‌اند. کلیه مقادیر این جدول برحسب درصدی از مولفه اصلی ولتاژ قوس می‌باشد.

<sup>3</sup> Arc furnaces

این جریان های هارمونیکی به داخل سیستم تزریق شده و اگر تشدید در هیچ یک از فرکانسهای هارمونیکی وجود نداشته باشد مشکلی ایجاد نخواهد شد اما اگر تشدید در یکی از فرکانسهای هارمونیکی وجود داشته باشد جریان هارمونیکی مربوطه می تواند باعث تحریک مدار تشدید شده و ولتاژهای بسیار بزرگی را تولید نماید. این امر به تجهیزات نصب شده در سیستم صدمه وارد کرده و باعث خرابی آنان خواهد شد.

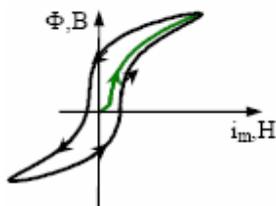
مرتبه هارمونیک	کوره ذوب قراضه (%)	کوره گرم کننده (%)
۲	۵	۲
۳	۲۰	۱۰
۴	۳	۲
۵	۱۰	۱۰
۶	۱/۵	۱/۵
۷	۶	۶
۸	۱	۱
۹	۳	۳
۱۱	۲	۲
۱۳	۱	۱

جدول ۱-۱: ولتاژ هارمونیکی تولید شده در کوره ذوب قراضه و کوره گرم کننده [۱]

#### ۱-۴-۲- جریان تحریک ترانسفورماتورها [۲]

در ترانسفورماتورها برای ایجاد کوپل بهتر بین سیم پیچی ها از مواد مغناطیسی استفاده می کنند تا از این طریق جریان تحریک مورد نیاز برای عملکرد ترانسفورماتور را بکاهند. مواد فرومغناطیسی که برای این منظور مورد استفاده قرار می گیرند شامل حوزه های مغناطیسی زیادی می باشند. در مواد فرومغناطش شده حوزه مغناطیسی بصورت تصادفی در جهت های دلخواه قرار دارند و در نتیجه شار مغناطیسی در این مواد صفر می باشد. وقتی که این مواد در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرند تمام حوزه های

مغناطیسی به راحتی در جهت میدان مغناطیسی اعمال شده قرار می گیرند. حوزه های مغناطیسی به میدان مغناطیسی اعمال شده اضافه می شوند و منجر به چگالی شار بیشتری نسبت به زمانی که میدان مغناطیسی اعمال شده وجود نداشت، می شوند. بنابراین ضریب نفوذپذیری برابر با نسبت چگالی شار مغناطیسی به میدان مغناطیسی بکاربرده شده می شوند که در مقایسه با ضریب نفوذپذیری خلا بزرگتر می باشد. وقتی میدان مغناطیسی بکار رفته افزایش یابد تمامی حوزه ها نهایتاً در یک جهت قرار می گیرند و افزایش مجدد، چگالی شار مغناطیسی را دیگر افزایش نمی دهد. در این حالت گفته می شود ماده فرو مغناطیسی به اشباع رسیده است. وقتی میدان مغناطیسی به صفر کاهش یابد حوزه های مغناطیسی جهت خود را از دست نمی دهند. این اثر بیانگر پدیده هیستریزیس می باشد. تاثیر اشباع و هیستریزیس روابط غیرخطی بین چگالی شار و میدان مغناطیسی اعمال شده را سبب می شود. منحنی  $B-H$  با حلقه هیستریزیس در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



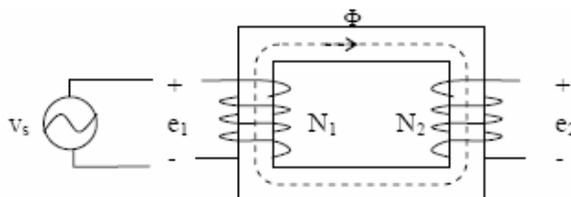
شکل ۱-۳: منحنی حلقه هیستریزیس

با توجه به شکل ۱-۴ ترانسفورماتور تکفاز با دو سیم پیچی در حالت بی باری قرار دارد، ولتاژ تغذیه سینوسی به سیم پیچ اولیه اعمال می شود و قانون القای فاراده را برقرار می سازد:

$$v_1 = e_1 = E_m \sin \omega t = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (9-1)$$

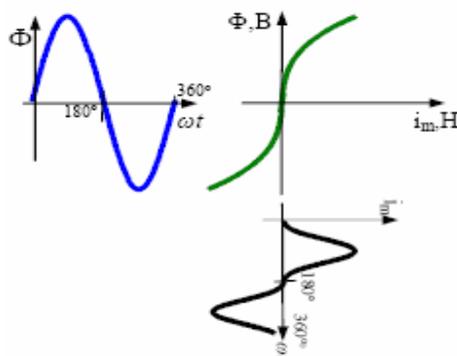
شار اصلی که در هسته گردش می کند از طریق انتگرال گیری از رابطه ۱-۹ حاصل می شود (با فرض اینکه شار پس ماند صفر باشد):

$$\phi = -\int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1 \omega} \cos \omega t = \phi_m \cos \omega t \quad (10-1)$$

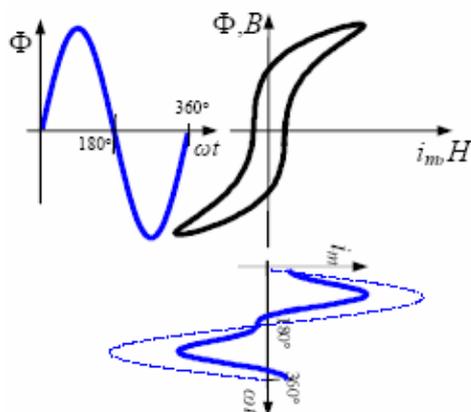


شکل ۱-۴: ترانسفورماتور تک فاز

ولتاژ سینوسی اولیه یک شار سینوسی در بی باری تولید می کند. اما جریان اولیه بخاطر اینکه شار بطور خطی متناسب با جریان مغناطیس کنندگی نمی باشد، سینوسی نیست. برای یک هسته ایده آل بدون تلفات هستیرزیس، شار و جریان مغناطیس کنندگی با منحنی مغناطیس کنندگی شکل ۱-۵ رابطه دارند. برای این شکل شار تولید شده بوسیله ولتاژ اولیه سینوسی بر حسب زمان رسم شده است و برای هر مقدار از شار جریان مغناطیسی از منحنی مغناطیس کنندگی حاصل می شود. جریان مغناطیس کنندگی نتیجتاً شکل موج غیر سینوسی دارد. وقتی که تاثیر هستیرزیس در نظر گرفته می شود، جریان مغناطیس کنندگی در مقادیر ماکزیمم دیگر همانند شکل ۱-۶ متقارن نیست. شکل‌های ۱-۵ و ۱-۶ نشان می دهد اغتشاش در جریان مغناطیس کنندگی اصولاً هارمونیک های مضرب سه و اساساً هارمونیک سوم را شامل می باشد.



شکل ۱-۵: شار و منحنی مغناطیسی و جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور (بدون هستیرزیس) [۲]



شکل ۱-۶: شار و منحنی مغناطیسی و جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور (با هیستریزیس) [۲]

### ۱-۵- استانداردهای هارمونیک

تجهیزات الکترونیک قدرت و دیگر منابع هارمونیکی اغتشاشاتی در شکل موج های جریان و ولتاژ شبکه ایجاد می کنند که تاثیر نامطلوبی بر شبکه دارند. بنابراین استانداردهایی بیان شده است تا اثرات هارمونیک بر شبکه و مصرف کنندگان آن محدود شود. استانداردها برای تعیین سطوح مجاز جریان و ولتاژ هارمونیکی مورد استفاده قرار می گیرند.

۱-۵-۱- محدودیتهای اغتشاشات هارمونیک ولتاژ<sup>۴</sup> [۵]

محدودیت های اغتشاشات هارمونیک ولتاژ براساس روشهای پیشنهاد IEEE در جدول ۱-۲ شرح داده شده است. این مقادیر باید به عنوان مقادیر طراحی شبکه در بدترین حالت در نظر گرفته شود.

ولتاژ باس	ماکزیمم اغتشاشات هارمونیک ولتاژ $(100 \times \sqrt{\sum_{h \neq 1} (\frac{V_{sh}}{V_{s1}})^2})$
۶۹ کیلو ولت به پایین	٪۰.۵
۶۹۰۰۱ ولت تا ۱۶۱ کیلو ولت	٪۰.۲/۵
بالتر از ۱۶۱۰۰۱ ولت	٪۰.۱/۵

جدول ۱-۲: محدودیتهای هارمونیکی ولتاژ بر اساس استاندارد ۵۱۹-۱۹۹۲ [۵]

۱-۵-۲- محدودیتهای اغتشاشات هارمونیک جریان<sup>۵</sup> [۵]

یک مصرف کننده که باعث اغتشاشات هارمونیکی می شود باید در سطح جریان قابل قبولی در هر نقطه از سیستم عمل کند. استاندارد ۵۱۹-۱۹۹۲ IEEE محدودیتهای اغتشاشاتی هارمونیک را پیشنهاد می کند که ماکزیمم اغتشاشات جریان مجاز برای مصرف کنندگان در جدول ۱-۳ آمده است. این جدول محدودیت های جریان هارمونیک را بر اساس اندازه بار به اندازه شبکه بیان می کند. با توجه به این جدول اندازه بار مصرف کننده که با توجه به اندازه شبکه کاهش می یابد، مجاز است درصد جریان هارمونیکی بیشتری به سیستم تزریق کند.

<sup>4</sup> Harmonic Voltage Distortion Limits

<sup>5</sup> Harmonic current distortion limits

ماکزیم اغتشاشات هارمونیک جریان بر اساس درصدی از $I_L$ در حضور هارمونیک های فرد					
۶۹ کیلو ولت $V \leq 110$ ولت					
$35 < h$	$23 < h < 35$	$17 < h < 23$	$11 < h < 17$	$h < 11$	$I_{sc}/I_L$
۰/۳	۰/۶	۱/۵	۲	۴	کوچکتر از ۲۰
۰/۵	۱	۲/۵	۳/۵	۷	۵۰-۲۰
۰/۷	۱/۵	۴	۴/۵	۱۰	۱۰۰-۵۰
۱	۲	۵	۵/۵	۱۲	۱۰۰۰-۱۰۰
۱/۴	۲/۵	۶	۷	۱۵	بزرگتر از ۱۰۰۰
۱۶۱ کیلو ولت $V \leq 900$ ولت					
۰/۱۵	۰/۳	۰/۷۵	۱	۱	کوچکتر از ۲۰
۰/۲۵	۰/۵	۱/۲۵	۱/۷۵	۳/۵	۵۰-۲۰
۰/۳۵	۰/۷۵	۲	۲/۲۵	۵	۱۰۰-۵۰
۰/۵	۱	۲/۵	۲/۷۵	۶	۱۰۰۰-۱۰۰
۰/۷	۱/۲۵	۳	۳/۵	۷/۵	بزرگتر از ۱۰۰۰
۱۶۱ کیلو ولت $V \leq 161$					
۰/۱۵	۰/۳	۰/۷۵	۲	۲	کوچکتر از ۵۰
۰/۲۲	۰/۴۵	۱/۱۵	۲/۵	۳	بزرگتر از ۵۰
ماکزیم اغتشاشات هارمونیک جریان در حضور هارمونیکهای زوج به ۲۵٪ مقادیر بالا محدود می شود.					
ماکزیمم جریان اتصال کوتاه بر روی ماکزیمم جریان بار مورد تقاضا $I_{sc}/I_L$					

جدول ۱-۳: محدودیت‌های هارمونیکی جریان بر اساس استاندارد ۵۱۹-۱۹۹۲ [۵]