

بررسی اثرات هارمونیک های ولتاژ و جریان بر روی ترانسفورماتورهای قدرت

تهیه کننده:

علی محیاپور

چکیده :

در این پایان نامه (پژوهش) به مطالعه ارتباط بین منحنی مغناطیس شونده‌گی هسته ترانسفور ماتور و ناپایداریهای هارمونیکی ناشی از آن می پردازیم. سپس انواع هارمونیک های ولتاژ و جریان و اثرات آنها را بر روی سیستم های قدرت ، در حالات مختلف مورد بررسی قرار می دهیم. در قسمت بعد به بررسی چگونگی حذف هارمونیک ها در ترانسفور ماتور های قدرت با استفاده از اتصالات ستاره ومثلث سیم پیچی ها می پردازیم. و در نهایت نیز جبرانکننده های استاتیک و فیلتر ها را به منظور حذف هارمونیک های سیستم قدرت مورد مطالعه قرار می دهیم.

کلمات کلیدی :

ناپایداری هارمونیکی ، منحنی مغناطیس شونده‌گی ، فیلترها ، سیستم قدرت ، هارمونیک ولتاژ و جریان ، جبران ساز استاتیک

این پروژه شامل پنج فصل است که :

فصل اول: در مورد شناخت ترانسفورماتور و آشنایی کلی با اصول اولیه ترانسفورماتور

اصول کار و مشخصات اسمی ترانسفورماتور و چگونگی تعیین تلفات در ترانسفورماتور و ساختمان و وسایل حفاظتی بکار رفته در ترانسفورماتور بحث می کند .

فصل دوم: در مورد رابطه بین $B - H$ و منحنی مغناطیس شونده تلفات پس ماند

هسته جریان تحریکی در ترانسفورماتورها و ناپایداری هارمونیک مرتبط با هسته و چگونگی ایجاد ناپایداری کنترل ناپایداری و آنالیز هارمونیک جریان مغناطیس کننده و عناصر اشباع را مورد بررسی قرار می دهد .

فصل سوم: در این فصل با هارمونیکهای جریان ولتاژ اثرات آنها و هارمونیکهای جریان در

یک سیستم خازن و یک سیستم پس از نصب خازن و عیوب هارمونیکهای جریان و هارمونیکهای ولتاژ و چگونگی تعیین آنها را مورد بررسی قرار می دهد .

فصل چهارم: در این فصل به بررسی عملکرد هارمونیک در ترانسفورماتور می پردازیم و

انواع آن در اتصالات ترانس را مورد بررسی قرار می دهیم و هارمونیک سوم در ترانسفورماتور و ایجاد سیم پیچ ثالثیه یا پایدارکننده برای حذف هارمونیک و همچنین تلفات هارمونیکها در ترانسفورماتور می پردازیم .

فصل پنجم: در این فصل به منظور حذف هارمونیکها و اثرات آنها در سیستمهای قدرت، به مطالعه

جبرانکننده های استاتیک می پردازیم. امروزه در سیستم های قدرت مدرت جبران کننده های استاتیک بعنوان کامل ترین جبران کننده ها مطرح هستند.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
1	مقدمه
6	فصل اول: شناخت ترانسفورماتور
7	1-1 مقدمه
7	1-2 تعریف ترانسفورماتور
7	1-3 اصول اولیه
7	1-4 القاء متقابل
9	1-5 اصول کار ترانسفورماتور
12	1-6 مشخصات اسمی ترانسفورماتور
12	1-6-1 قدرت اسمی
12	1-6-2 ولتاژ اسمی اولیه
12	1-6-3 جریان اسمی

- 12-6-1 فرکانس اسمی 12
- 13-6-1 نسبت تبدیل اسمی 13
- 13-7-1 تعیین تلفات در ترانسفورماتورها 13
- 13-7-1 تلفات آهنی 13
- 13-7-2 تلفات فوکو در هسته 13
- 14-7-3 تلفات هیستریزیس 14
- 16-7-4 مقدار تلفات هیستریزیس 16
- 16-7-5 تلفات مس 16
- 17-8-1 ساختمان ترانسفورماتور 17
- 17-8-1 مدار مغناطیسی (هسته) 17
- 17-8-2 مدار الکتریکی (سیم پیچها) 17
- 18-8-2-1 تپ چنجر 18
- 18-8-2-2 انواع تپ چنجر 18
- 19-8-3 مخزن روغن 19
- 19-8-3 مخزن انبساط 19
- 19-8-4 مواد عایق 19
- 20-8-4 الف - کاغذهای عایق 20
- 20-8-4 ب - روغن عایق 20
- 20-8-4 ج - پوشینکهای عایق 20
- 21-8-5 وسایل حفاظتی 21

الف - رله بوخهلتس	21
ب - رله کنترل درجه حرارت سیم پیچ	22
ج - ظرفیت سیلی گازل	23
1-9 جرقه گیر	24
10-1 پیچ ارت	24
فصل دوم: بررسی بین منحنی B-H و آنالیز هارمونیک جریانی مغناطیس کننده 26	
2-1 مقدمه	27
2-2 منحنی مغناطیس شوندگی	27
2-3 پس ماند (هیستریزیس)	30
2-4 تلفات پس ماند (تلفات هیستریزیس)	32
2-5 تلفات هسته	32
2-6 جریان تحریک	33
2-7 پدیده تحریک در ترانسفورماتورها	33
2-8 تعریف و مفهوم هارمونیک ها	36
2-8-1 هارمونیک ها	36
2-8-2 هارمونیک های میانی	37
2-9 ناپایداری هارمونیک مرتبط با هسته ترانس در سیستمهای AC-DC	37
2-10 واکنشهای فرکانسی AC-DC	37
2-11 چگونگی ایجاد ناپایداری	39
2-12 تحلیل ناپایداری	40

- 13-2 کنترل ناپایداری 41
- 14-2 جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور 42
- 14-2-1 عناصر قابل اشباع 42
- 14-2-2 وسایل فرومغناطیسی 43
- فصل سوم : تأثیر هارمونیکهای جریان ولتاژ روی ترانسفورماتورهای قدرت..... 46**
- 3-1 مقدمه 47
- 3-2 مروری بر تعاریف اساسی 47
- 3-3 اعوجاج هارمونیکها در نمونه هایی از شبکه 49
- 3-4 اثرات هارمونیک ها 51
- 3-5 نقش ترمیم در سیستمهای قدرت با استفاده از اثر خازنها 52
- 3-5-1 توزیع هارمونیکهای جریان در یک سیستم قدرت بدون خازن 52
- 3-5-2 توزیع هارمونیکهای جریان در یک سیستم پس از نصب خازن 52
- 3-6 رفتار ترانسفورماتور در اثر هارمونیکهای جریان 54
- 3-7 عیوب هارمونیکها در ترانسفورماتور 54
- 3-7-1 هارمونیکهای جریان 54
- (1) اثر بر تلفات اهمی 54
- (2) تداخل الکترومغناطیسی با مدارهای مخابراتی 54
- (3) تأثیر بر روی تلفات هسته 55
- 3-7-2 هارمونیک های ولتاژ 55
- (1) تنش ولتاژ روی عایق 55

- 55 (2) تداخل الکترواستاتیکی در مدارهای مخابراتی
- 56 (3) ولتاژ تشدید بزرگ
- 56 3-8 حذف هارمونیکها
- 56 (1) چگالی شار کمتر
- 57 (2) نوع اتصال
- 57 (3) اتصال مثلث سیم پیچی اولیه یا ثانویه
- 57 (4) استفاده از سیم پیچ سومین
- 57 (5) ترانسفورماتور ستاره - مثلث زمین
- 58 3-9 طراحی ترانسفورماتور برای سازگاری با هارمونیک ها
- 59 3-10 چگونگی تعیین هارمونیکها
- 59 3-11 اثرات هارمونیکهای جریان مرتبه بالا روی ترانسفورماتور
- 60 3-12 مفاهیم تئوری
- 60 3-12-1 مدل سازی
- 61 3-13 نتایج عمل
- 62 3-14 راه حل ها
- 62 3-15 نتیجه گیری نهایی
- 63 فصل چهارم: بررسی عملکرد هارمونیک ها در ترانسفورماتورهای قدرت
- 64 4-1 مقدمه
- 64 4-2 پدیده هارمونیک در ترانسفورماتور سه فاز
- 68 4-3 اتصال ستاره

- 1-3-4 ترانسفورماتورهای با مدار مغناطیسی مجزا و مستقل 68
- 2-3-4 ترانسفورماتورها با مدار مغناطیسی پیوسته یا تزویج شده 71
- 4-4 اتصال Y_y ستاره با نقطه خنثی 72
- 4-5 اتصال Dy 72
- 4-6 اتصال yd 73
- 4-7 اتصال Dd 74
- 4-8 هارمونیک های سوم در عمل ترانسفورماتور سه فاز 74
- 4-9 سیم پیچ ثالثیه یا پایدارکننده 76
- 4-10 تلفات هارمونیک در ترانسفورماتور 77
- 1-10-4 تلفات جریان گردابی در هادی های ترانسفورماتور 77
- 2-10-4 تلفات هیستریزیس هسته 77
- 3-10-4 تلفات جریان گردابی در هسته 78
- 4-10-4 کاهش ظرفیت ترانسفورماتور 79
- فصل پنجم: جبران کننده های استاتیک 80**
- 5-1 مقدمه 81
- 5-2 راکتور کنترل شده با تریستور TCR 81
- 1-2-5 ترکیب TCR و خازنهای ثابت موازی 87
- 5-3 راکتور اشباع شده SCR 88
- 1-3-5 شیب مشخصه ولتاژ 89
- نتیجه گیری 91

92 منابع و مآخذ

94 چکیده به زبان انگلیسی

فهرست تصاویر

صفحه	عنوان
6	فصل اول
8	شکل 1-1: نمایش خطوط شار
9	شکل 1-2: شمای کلی ترانسفورماتور
1	شکل 1-3: رابطه فوران و نیروی محرکه مغناطیسی
1	شکل 1-4: نمایش منحنی های هیسترزیس
5	شکل 1-5: نمایش بوشینگ های عایق
0	شکل 1-6: یک نمونه رله
2	شکل 1-7: رله کنترل درجه حرارت سیم پیچ ها
2	
3	

شکل 8-1: ظرف سیلی کاژل

2

3

شکل 9-1: شمای کلی یک ترانسفورماتور با مخزن روغن و سیستم جرقه گیر

2

4

شکل 10-1: نمایش پیچ ارت

2

5

فصل دوم

2

6

شکل 1-2: نمایش شدت جریان در هسته چنبره شکل

2

8

شکل 2-2: منحنی مغناطیس شونده گی

2

9

شکل 3-2: منحنی مغناطیس شونده گی

2

9

شکل 2-4: منحنی های هیسترزیس

3.....
1

شکل 2-5: حلقه های ایستا و پویا

3.....
2

شکل 2-6: شکل موج جریان مغناطیس کننده

3.....
4

شکل 2-7: شکل موج جریان تحریک با پسماند

3.....
5

شکل 2-8: شکل موج شار ϕ برای جریان مغناطیس کننده سینوسی

3.....
6

شکل 2-9: نمایش هارمونیک های توالی مثبت و منفی

3.....
8

شکل 2-10: ترکیب dc توالی منفی تولید شده توسط مبدل HVDC

3.....
9

شکل 2-11: نمایش امپدانس های AC, DC در روش سیستم حوزه فرکانس

4.....
0

شکل 2-12: مقایسه حالات مختلف اشباع

4.....
1

شکل 2-13: مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور

4.....
2

شکل 2-14: جریان مغناطیس کننده ترانس و محتوای هارمونیک آن

4.....
3

شکل 2-15: مدار معادل T برای یک ترانسفورماتور

4.....
4

شکل 2-16: منحنی شار مغناطیسی بر حسب جریان ترانسفورماتور

4.....
4

شکل 2-17: نمونه شکل موج جریان مغناطیسی برای یک ترانسفورماتور

4.....
4

فصل _____ سوم

4.....
6

شکل 3-1: مولدهای هارمونی جریان

4.....
7

شکل 3-2: هارمونیک پنجم با ضریب 35٪

4.....
8

شکل 3-3: طیف هارمونیک ها

5.....
0

شکل 3-4: جریان تحمیل شده روی جریان اصلی

5.....
0

شکل 3-5: طیف هارمونیک ها

5.....
0

شکل 3-6: جریان تحمیل شده روی جریان اصلی

5.....
0

شکل 3-7: مسیر هارمونیکی جریان در سیستم بدون خازن

5.....
2

شکل 3-8: مسیر هارمونی های جریان در سیستم پس از نصب خازن

5.....
3

شکل 9-3: تداخل الکترو استاتیکی با مدارهای مغناطیسی

5.....

5

شکل 10-3: ولتاژ تشدید بزرگ در اثر هارمونیک سوم

5.....

6

شکل 11-3: ترانسفورماتور ستاره مثلث زمین، برای حذف هارمونیک های مضرب 3

5.....

8

شکل 12-3: طراحی ترانسفورماتور برای سازگاری با هارمونیک ها

5.....

8

شکل 13-3: مدار معادل ساده شده سیم پیچ ترانسفورماتور

6.....

0

شکل 14-3: توزیع ولتاژ در طول یک سیم پیچ

6.....

1

فصل ————— چ ————— ارم

6.....

3

شکل 1-4: نمودار برداری ولتاژهای مؤلفه اصلی، سوم، پنجم و هفتم

6.....
5

شکل 2-4: نمودار برداری ولتاژهای اصلی، هارمونیک پنجم و هفتم

6.....
6

شکل 3-4: نمایش نیروی محرکه الکتریکی emf اتصال ستاره در هر لحظه

6.....
6

شکل 4-4: نمایش هارمونیک های سوم در اتصال مثلث

6.....
6

شکل 5-4: مربوط به نوسان نقطه خنثی

7.....
0

شکل 6-4: مسیر پاره‌های هارمونیک سوم (مضرب سه) در ترانسفورماتورهای سه فاز

نوع هسسته ای
7.....
1

شکل 7-4: ترانسفورماتور با اتصال Y-y بدون بار

7.....
5

شکل 4-8: سیم پیچ سومین (ثالثیه)

7
7

فصل پنجم

8
0

شکل 5-1: ساختمان شماتیک TCR

8
1

شکل 5-2: منحنی تغییرات $B_L(\sigma)$ بر حسب زاویه هدایت σ و زاویه آتش σ

8
3

شکل 5-3: مشخصه ولتاژ- جریان TCR

8
4

شکل 5-4: یک نمونه صافی با استفاده از L.C

8
5

شکل 5-5: حذف هارمونیک سوم با استفاده از مدار TCR با اتصال سِتاره

8
6

شکل 6-5: حذف هارمونیک های پنجم و هفتم با استفاده از مدار TCR با اتصال ستاره

8
6

شکل 7-5: بررسی اختلال در شبکه قدرت قبل و بعد از استفاده از جبران کننده با خازن

8
7

شکل 8-5: منحنی مشخصه ولتاژ- جریان SR

8
8

شکل 9-5: حذف هارمونیک های شبکه قدرت با استفاده از راکتور اشباع شده SR

8
8

شکل 10-5: منحنی مشخصه ولتاژ- جریان SR با خازن اصلاح شیب

8
9

شکل 11-5 : حذف هارمونیکهای شبکه قدرت با استفاده از راکتور اشباع شده SR

8
9

شکل 12-5: منحنی مشخصه ولتاژ - جریان SR با خازن اصلاح شیب

9
0

فهرست جداول

صفحه	عنوان
.....	فصل دوم.....
جدول 1-2: مقادیر هارمونیک ها در جریان مغناطیسی یک ترانسفورماتور	
4.....	
	5

مقدمه :

در سیستم های قدرت پیشرفته انرژی الکتریکی توسط ژنراتورهای سه فاز تولید می شود که پس از انتقال به صورت سه فاز توزیع می شود . به دلایل اقتصادی از ایستگاه تا مصرف ولتاژ چندین بار افزایش و کاهش می یابد . در هر باز افزایش و کاهش ولتاژت سه فاز مورد نیاز است . بدین جهت در سیستم های قدرت سه فاز از تعداد زیادی ترانسفورماتور سه فاز استفاده می شود . برای هر تبدیل ولتاژ از مقداری به مقدار دیگر ممکن است از سه واحد ترانسفورماتور تک فاز یا یک واحد ترانسفورماتور سه فاز استفاده شود . در ترانسفورماتورهای قدرت و توزیع جریان تحریک تنها درصد کوچکی (2 تا 6٪) از جریان نامی است . پدیده هارمونیک در ترانسفورماتورهای قدرت بسیار مهم است . زیرا تحت شرایط معینی هارمونیک های جریان تحریک باعث عمل عمدی تجهیزات حفاظتی می گردند ممکن است باعث تداخل در مدارهای مخابراتی شوند . نظر به این مسئله مهندسين مخابرات و سیستم انرژی باید قادر به بررسی و

حذف چنین شرایط باشند. از این رو هارمونیک در ترانسفورماتور از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

اولین مورد از مشکلات اعوجاجات هارمونیکی در سال 1893 در شهر هارتفورد امریکا پیش آمد، به این صورت که یک موتور الکتریکی با گرم شدن زیاد باعث خرابی عایق بندی خود شد. پس از آزمایشات معلوم شد که علت این امر تشدید ایجاد شده در خط انتقال، ناشی از وجود هارمونیکها بوده است.

مشکل بعدی، یک ژنراتور سه فاز 125 هرتز با ولتاژ $3/8$ کیلوولت ساخت شرکت جنرال الکتریک امریکا بود. در این مورد همه محاسبات با تقریبهای خوبی انجام شده بود ولی باز هم تشدید در خط انتقال بود. با محاسبه اندوکتانس و ظرفیت خازنی خط انتقال و احتمالاً اندوکتانس بار، مشاهده شد که در فرکانس حدود 1600 هرتز (هارمونیک سیزدهم) در خط تشدید ایجاد می شود. شکل موجهای ولتاژ ژنراتور نیروگاه و موتور سنکرون دارای مؤلفه های هارمونیکی قابل توجه بودند.

این فرایند محاسبات و اندازه گیری توسط یک موج نمای ساده در آن سال انجام شد که شکل موج را به صورت نقطه به نقطه از طریق قطع و وصل مرتب یک زبانه، نمونه گیری می کرد. امروزه با استفاده از هارمونیک سنجهای دیجیتال و با بکارگیری الگوریتم های سریع " تبدیل فوریه گسسته " می توان بصورت بدون وقفه اعوجاجات هارمونیکی را اندازه گیری کرد.

دو سال بعد از اولین مورد مشاهده مشکلات هارمونیکی، شرکتهای وستینگهاوس و جنرال الکتریک، طرحهای جدیدی را برای ژنراتورها معرفی نمودند که در این طرح ها، از سیم پیچهای

غیر متمرکز در آرمیچر استفاده کردند و به تبع آن شکل موج را بهبود بخشیده و به اصطلاح سینوسی تر کردند.

مشکل دیگر هارمونیکها در شکل موج ژنراتورها، مربوط به جریان بسیار زیاد نول ژنراتورهایی بود که به صورت موازی نصب و مستقیماً زمین می شدند. امروزه این مساله کاملاً شناخته شده است و مربوط به هارمونیک سوم ولتاژ و صفر بودن توالی این هارمونیک در ماشینهایی می باشد که به صورت ستاره بسته شده اند.

مشکل دیگر، "همانگی هارمونیک" یا همان "ضریب تداخل تلفنی TIF" می باشد.

- فیلتر کردن هارمونیکها :

از اولین سالهایی که مشکلات اعوجاجات هارمونیک شناخته شدند، از خازن شانت *shunt* برای بهبود ضریب توان در سیستم های الکتریکی استفاده می شد. امروزه بسیاری از این خازنها به یک سلف سری مجهز و تبدیل به یک فیلتر هارمونیک تک تنظیمه شده اند .

- هارمونیکها در شبکه قدرت :

اکثر اعوجاجات ایجاد شده در شکل موجهای ولتاژ و جریان شبکه قدرت ناشی از بارهایی هستند که دارای مشخصه غیر خطی بوده و یا در آنها از عناصر الکترونیک قدرت استفاده می شود. پیشرفت سریع نیمه هادیها انقلابی در کنترل فرآیندهای صنعتی و تبدیل انرژی بوجود آورده است .

از آن جهت که نیمه هادیهای قدرت در هر نقطه از شکل موج ولتاژ به ناگهان روشن یا خاموش می شوند، حالتی گذرائی با فرکانس نوسان بالا و دامنه میرا شونده پدید می آورند . اگر در هر پریود عمل کلید زنی در نقطه مشابهی انجام شود، حالت گذرا شکلی متناوب به خود

می گیرد. همچنین سیگنالهای غیر سینوسی را می توان با استفاده از بسط سری فوریه بصورت مجموعی از امواج سینوسی بیان نمود که به " هارمونیکهای شبکه قدرت " موسومند و فرکانس آنها مضرری صحیح از فرکانس قدرت می باشد. هنگامی که اثر سلفها و خازنهای شبکه نیز مد نظر قرار گیرد ، اهمیت اعوجاجات هارمونیکی دو چندان می شود . در حقیقت چون سیگنال اعوجاج یافته دارای مؤلفه هایی با فرکانس های متفاوت می باشد ، در یکی از این فرکانسها امکان ایجاد تشدید بین یکی از خازنها و سلف معادل شبکه وجود دارد که به تبع آن ، دامنه هارمونیک مربوط به فرکانس تشدید افزایش نیز می یابد.

– منابع تولید هارمونیکها :

منابع تولید هارمونیکها به دو گروه « غیر وابسته » و « وابسته » به عناصر نیمه هادی

تقسیم می شوند . منابع غیر وابسته به عناصر نیمه هادی عبارتند از :

— اعوجاجات موجود در شکل موج ولتاژ ماشینهای الکتریکی که معمولاً ناشی از عدم

توزیع یکنواخت سیم پیچ های این ماشینها و وجود شیارها می باشد .

– یکنواخت نبودن رلوکتانس فاصله هوایی بین دو قطب در ماشین سنکرون .

– اعوجاج شار مغناطیسی ناشی از تغییرات ناگهانی بار در ماشین سنکرون .

– توزیع غیر سینوسی شار مغناطیسی در فاصله هوایی ماشین سنکرون .

– جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتورها .

– وجود بارهای غیر خطی نظیر دستگاههای جوش کاری ، کوره های الکتریکی و غیره .

منابع وابسته به عناصر نیمه هادی عبارتند از :

– تجهیزات کنترلی موتورهای مانند کنترل کننده های سرعت برای سیستم های حمل و نقل

برقی .

– سیستم انتقال انرژی جریان مستقیم (HVDC) .

– برقراری ارتباط بین دو نیروگاه بادی و خورشیدی و سیستم توزیع .

— کنترل کننده های ولتاژ ساکن (SVC) که بطور گسترده به عنوان منبع توان راکتیو

جایگزین کندانسورهای سنکرون شده اند.

– وسایل نقلیه الکتریکی که با استفاده گسترده از آنها مقدار قابل توجهی انرژی برای شارژ

کردن باتریها لازم می باشد.

— مبدل‌های فرکانسی که در ماشین‌هایی که سرعت کم و گشتاور بالا دارند کاربرد فراوان

دارند.

- عناصر حرارتی کوره‌های بزرگ که به روش *PBM* کنترل می‌شوند.

- آثار هارمونیکها :

برخی از آثار سوء هارمونیکها در شبکه قدرت که ناکنون گزارش شده اند به قرار زیر می باشند :

- خرابی بانک خازنی بدلیل شکست عایقی یا افزایش بیش از حد توان راکتیو .

— تداخل با سیستم های کنترل اعوجاج و PLC و در نتیجه عدم کارکرد صحیح این سیستم ها که وظیفه انجام اعمالی چون کلید زنی از راه دور ، کنترل بار و اندازه گیری را بر عهده دارند.

- تلفات اضافی و ایجاد حرارت زیاد در ماشینهای سنکرون و القائی .

— اضافه ولتاژها و جریانهای اضافی در سیستم که ناشی از تشدید ولتاژها و جریانهای هارمونیکی در شبکه هستند .

- شکست عایقی در کابل ها به خاطر اضافه ولتاژهای هارمونیکی در سیستم .

- تداخل با سیستم های مخابراتی .

- خطا در دستگاههای اندازه گیری الکتریکی که به روش القا کار می کنند.

- عملکرد اشتباه رله ها ، بخصوص در سیستم های استاتیکی و میکرو پروسسوری .

- تداخل در سیستم های کنترل موتور بزرگ و سیستم های تحریک در نیروگاهها .

- نوسانات مکانیکی در ماشینهای سنکرون و القائی .

- عملکرد نا پایدار مدارهای آتش بخصوص مدارهایی که بر اساس تشخیص نقطه صفر ولتاژ

عمل می کنند.

- منابع عمده تولید هارمونیک در شبکه قدرت ایران :

در کشور ما صنایع عظیم و فعالی وجود دارند که دارای منابع بزرگ هارمونیک هستند .

در زیر به چند نمونه از آنها اشاره خواهیم کرد :

— مجتمع های فولاد و صنایع ذوب آهن نظیر نورد اهواز، ذوب آهن اصفهان و ... از کوره های عظیم قوس الکتریکی استفاده می کنند که در کنار این کوره ها از SVC برای تامین توان راکتیو مورد نیاز جهت بهبود ضریب توان آنها استفاده می شود . در قسمت های دیگر این مراکز صنعتی انواع و اقسام موتورهای AC و DC در حال کار می باشند و در کنار آنها نیز کنترل کننده های مربوطه در حال انجام وظیفه خود و در نتیجه تزریق هارمونیک در شبکه می باشند.

— مجتمع های پتروشیمی و صنایع شیمیایی نظیر پتروشیمی اصفهان ، امام و اراک جهت انجام بسیاری از فرآیندهای شیمیایی به برق DC نیازمند می باشند که برای تامین این برق از یکسو سازهای پر قدرتی استفاده می شود که سهم قابل توجهی را در تولید هارمونیکهای شبکه خواهند داشت .

— سیستمهای انتقال ولتاژ بالای DC دارای دو ایستگاه مبدل در ابتدا و انتهای خط DC می باشند که یکی در حالت یکسوکنندگی و دیگری در وضعیت اینورتری کار می کنند . ایستگاههای مبدل فوق حاوی پل های سه فاز ترستوری می باشند و می دانیم که این پل ها در ردیف مهمترین تولید کنندگان هارمونیک می باشند. لازم به توضیح است فعلاً به دلیل عدم وجود سیستم HVDC در شبکه سراسری ایران ، این شبکه از این هارمونیکها مصون می باشد . مع الوصف چنانچه مساله اتصال برق شبکه های کشورهای همسایه مطرح شود بی شک باید هارمونیکهای تولید شده مورد توجه و بررسی قرار گیرند .

— سیستم حمل و نقل برقی شهری " مترو " ، جهت تغذیه و کنترل سرعت و گشتاور موتورهای الکتریکی متصل به لوکوموتیوها از محرکه هائی استفاده می کند که به نوبه خود در

نقش منبع هارمونیک ، باعث ایجاد اعوجاج در شکل موج ولتاژ و جریان سیستمی می شود که شبکه مترو را تغذیه می کند . با توجه به اینکه در آینده نزدیک مترو در کلان شهرهایی نظیر اصفهان ، تبریز ، مشهد و غیره علاوه بر تهران شروع به کار خواهد کرد ، چنانچه بررسی های هارمونیکی به درستی انجام نگیرد ، ممکن است باعث بروز مشکلات زیادی در شبکه برق شهرهای مربوط و نیز شبکه سراسری شود .

— پیشرفت روز افزون عناصر نیمه هادی و کاربرد آنها در تجهیزات ادارات و بیمارستانها و حتی منازل باعث ایجاد مشکلاتی در خود این مراکز یا مصرف کنندگان دیگر شبکه خواهد شد. لامپهای تخلیه ای (مثل بخار جیوه ، بخار سدیم و فلور سنت) مورد استفاده در این مراکز ، خود نیز باعث بروز هارمونیکها می باشند .

فصل اول

شناخت ترانسفورماتور

1-1 مقدمه :

قبل از اینکه به موضوعات اصلی نوشته حاضر که بررسی اثرات هارمونیکها در ترانسفورماتورهای قدرت می باشد پردازیم در این فصل مروری بسیار مختصر بر روی تئوری ترانس و مفاهیم و همچنین شناسائی قسمتهای مختلف آن خواهیم داشت .

ترانسفورماتورهایی که در صنعت به کار می روند اکثرا سه فاز بوده و بر اساس قدرت و ولتاژ و دیگر مشخصات تقسیم بندی می شوند برای انتقال ولتاژ به صورت اقتصادی و کاهش تلفات در طول مسیر انتقال ولتاژ را به وسیله ترانسفورماتورها افزایش داده و در مراکز مصرف با تقلیل دادن ولتاژ بصورت مرحله ای در چند مرحله (در ایران از 400 به 230 به 132 به 63 و به 20 کیلو ولت) امکان استفاده از نیروی برق را حاصل خواهند نمود که در این راستا برای داشتن ولتاژ شهری در مراکز توزیع با استفاده از ترانسفورماتور کاهنده در قدرتهای پائین ولتاژ را به حدود 400 V می رسانند

علاوه بر ترانسفورماتورهای قدرت و توزیع انواع دیگری از ترانسفورماتور نیز وجود دارد که از جمله آنها می توان ترانسهای ولتاژ - جریان و ترانسهای مخصوص کوره های القائی را نام برد که از بحث این جزوه خارج می باشد و سعی بر آن است که بیشتر روی ترانسفورماتورهای تا قدرت 1600 KVA و ولتاژ 33 KV بحث شود .

1-2 تعریف ترانسفورماتور

ترانسفورماتور یک وسیله الکترومغناطیسی ساکنی است که توسط القاء الکترومغناطیسی بین دو یا چند سیم پیچ انرژی الکتریکی را در یک سیستم جریان متناوب از یک مداری به مدار

دیگر با حفظ اندازه فرکانس انتقال می دهد و می تواند ولتاژ کم را به به زیاد و یا بلعکس تبدیل نماید .

3-1 اصول اولیه

همانطور که در تعریف ترانسفورماتور بیان شد اساس کاربر القاء متقابل بین دویوبین بنا نهاده شده است این دویوبین از لحاظ الکتریکی جدا از هم ولی از لحاظ مغناطیسی به هم مرتبط هستند .

4-1 القاء متقابل

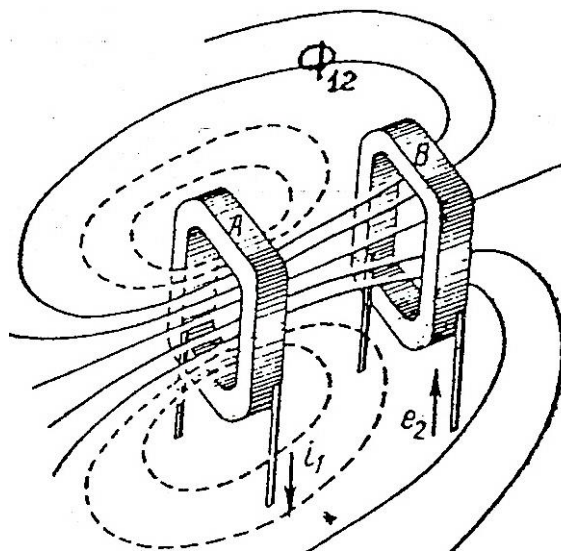
بطوری که می دانیم تغییرات حوزه مغناطیسی در اطراف سیم پیچ ها موجب پیدایش یک نیروی محرکه القائی می گردد . ظهور این پدیده با عبور جریان متناوب از سیم پیچ ها همیشه همراه است زیرا تغییرات جریان ، همواره باعث تغییر سیل مغناطیسی در بوبین ها می شود .

حال اگر دویوبین A و B را که به ترتیب دارای اندوکتانس L_1 و L_2 هستند در مجاورت یکدیگر قرار دهیم قسمتی از سیل مغناطیسی که بر اثر عبور جریان A در هسته بوبین A تولید می شود از داخل بوبین B نیز می گذارد و در سیم های آن هم نیروی محرکه القائی e_1

بوجود می آید بلعکس عبور هر جریان متناوبی از بوبین B موجب پیدایش نیروی محرکه القائی در بوبین A می شود این پدیده را القاء متقابل می گویند .

هر قدر ارتباط مغناطیسی بین دو بوبین کاملتر باشد اثر این پدیده شدیدتر است بطوریکه

اگر تمام سیل مغناطیسی هسته بوبین A از هسته B بگذرد در هر حلقه از آنها نیروی محرکه مساوی القاء می شود .



شکل 1-1 نمایش خطوط شار

اگر فرض کنیم از سیل القائی Φ_1 که با Φ_{12} نمایش می دهیم از هسته بوبین B بگذرد که

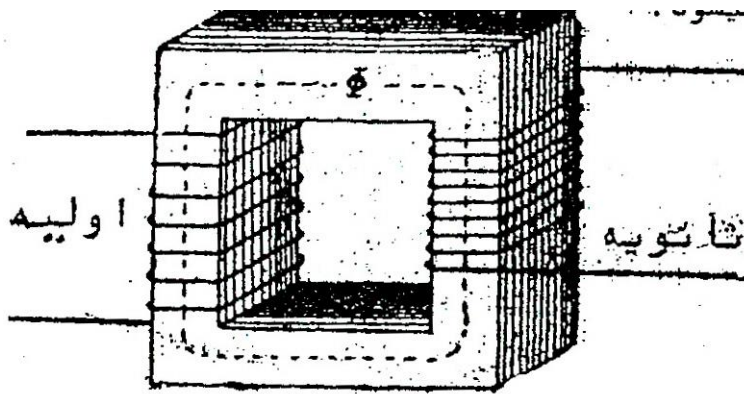
تعداد حلقه های آن N_2 باشد القاء کننده در این بوبین $\Phi_2 = N_2 \Phi_{12}$ خواهد بود و نیروی محرکه

القائی در بوبین B از این لحاظ رابطه به دست می آید .

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi_2}{dt}$$

5-1 اصول کار ترانسفورماتور

اساس کار ترانسفورماتور عبارت است از دو سیم پیچ که در اثر عبور جریان از هر کدام روی یکدیگر القاء متقابل داشته و برای کوپلاژ کامل و هدایت سیل مغناطیسی دو سیم پیچ روی هسته ای از آهن با ضریب نفوذ مغناطیسی حتی الامکان زیاد پیچیده می شود .



شکل (1-2) شمای کلی ترانسفورماتور

اگر یک سیم پیچ با N دور داشته باشیم که در میدان مغناطیسی با فوران متغیر قرار داشته باشد ولتاژ القائی در آن سیم پیچ برابر خواهد بود با

$$E = -N \frac{dQ}{dt}$$

بنابراین ولتاژ موثر برابر مقدار زیر است . $E = 4.44 N F A_{Fe} B_m$

B_m دامنه چگالی فوران مغناطیسی سینوسی و A_{Fe} سطح مقطع خالص هسته ای که این

فوران را عبور می دهد می باشد با توجه به رابطه فوق نسبت ولتاژهای القائی در شکل (1-2) با صرف نظر از تمام تلفات بدست خواهد آمد k را نسبت تبدیل ترانسفورماتور گویند .

اگر $K > 1$ باشد ترانسفورماتور افزایش دهنده و اگر $k < 1$ باشد آنرا کاهش دهنده گویند . همینطور با

صرف نظر از تلفات و با توجه به برابری آمپر دور در اولیه و ثانویه خواهیم داشت.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

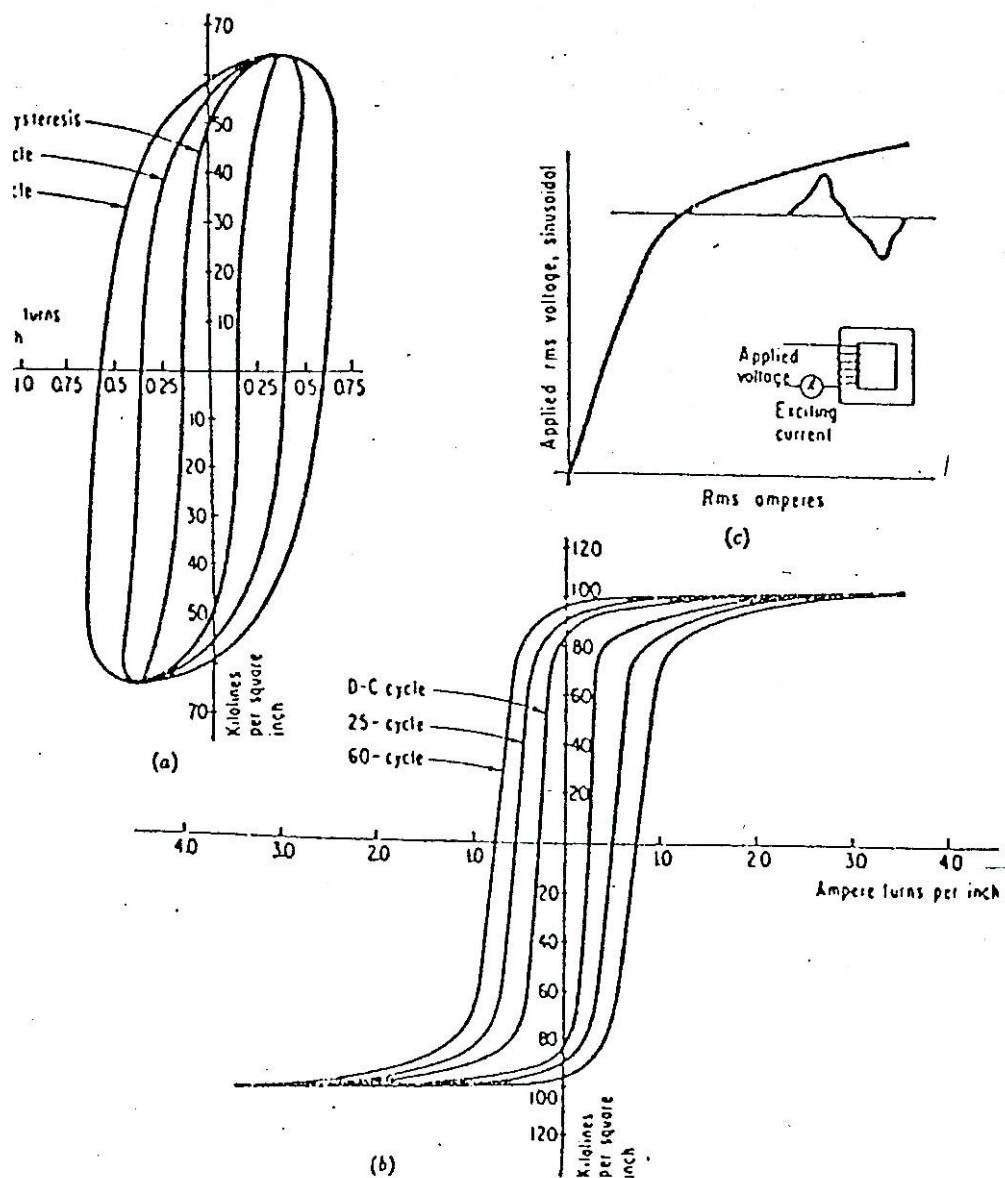
فلوی مغناطیسی در هسته تابعی غیر خطی از میزان جریان سیم پیچی روی آن می باشد رابطه فوران و نیروی محرکه مغناطیسی در منحنی شکل (1-3) نمایش داده شده است منحنی اشباع آهن (1-3-C) نشان می دهد . در فورانهای بالا آهن اشباع شده جریان مغناطیس کننده بشدت زیاد می شود علاوه بر آن طی یک سیکل کامل ولتاژ با فوران سینوسی بواسطه خاصیت پس ماند مغناطیسی آهن ، اندوکسیون بر حسب آمپر دور بجای یک خط مستقیم گذرا از مبدا یک حلقه بسته را تشکیل می دهد که موجب تلفاتی به اندازه سطح داخل حلقه یعنی

$$W = K_n F B_m^{1.5} . V$$

در واحد حجم طی هر سیکل است در شکل (1-3) سطح داخلی

هسته با ازدیاد فرکانس بزرگتر می شود و این به واسطه اضافه شدن تلفات جریان گردابی آهن بر

تلفات هیستریزیس است منحنی DC را در این منحنی ها حلقه هیستریزیس می نامند .



شکل (1-3) رابطه فوران و نیروی محرکه مغناطیسی

(b) - برای اندوکسیون کم

(a) برای اندوکسیون زیاد

منحنی DC همان حلقه هیستریزس

(c) - نمونه ای از منحنی اشباع شده

1-6 مشخصات اسمی ترانسفورماتور

منظور از مشخصات اسمی ترانسفورماتور مقادیری است نظیر قدرت و ولتاژ جریان - فرکانس و غیره که روی صفحه مشخصات (پلاک مشخصات) نوشته شده آن به این معنی است که ترانسفورماتور در حالت کار عادی باید با آن مقادیر کار کند و طبق مقررات بین المللی یک ترانسفورماتور باید بتواند 8765 ساعت در سال با مشخصات اسمی بدون هیچگونه اشکالی کار کند همیشه مقادیر اسمی با اندیس "n نمایش می دهند مثلاً U_{in} .

1-6-1 قدرت اسمی

قدرتی است که می تواند از قسمت ثانویه ترانسفورماتور گرفت و معمولاً مقدار آن بر حسب KVA روی صفحه مشخصات نوشته شده است (قدرت ظاهری PS)

1-6-2 ولتاژ اسمی اولیه

اختلاف سطح مجازی است که اولیه ترانسفورماتور باید با آن تغذیه شود U_{in} ولتاژ اسمی ثانویه ولتاژی است که می توان از ثانویه ترانسفورماتور بدون بار بوده و به اولیه ولتاژ اسمی داده شده باشد. U_{2n} به بیان دیگر ولتاژ اسمی عبارت است از ولتاژی که عملاً کلیه عایقها و سیستم های عایق را بر اساس آن طراحی می کنند و ولتاژی است که در حالت بهره برداری عادی به ترانسفورماتور اعمال می شود. ولتاژهای استاندارد که در شبکه توزیع متوسط در ایران مورد

استفاده قرار می گیرد در رنجهای 11 و 20 و 33 کیلو ولت می باشد . که بسته به موقعیت نصب ترانس در هر یک از شبکه ها از ولتاژ اسمی مناسب طراحی می شود .

3-6-1 جریان اسمی

جریان اسمی اولیه یا ثانویه جریانی است که روی پلاک مشخصات تعیین شده و یا می توان با قدرت ظاهری و ولتاژ اسمی محاسبه نمود از آنجا که نسبتا ضریب بهره ترانسفورماتور زیاد است قدرت اسمی اولیه و ثانویه را می توان یکی گرفت .

4-6-1 فرکانس اسمی

فرکانسی که ترانسفورماتور برای کار با آن طراحی شده است فرکانس اسمی گویند .

5-6-1 نسبت تبدیل اسمى

نسبت ولتاژ اسمى يك سيم پيچ به ولتاژ اسمى سيم پيچ ديگر را ولتاژ آن کمتر و يا برابر ولتاژ اسمى باشد نسبت تبدیل اسمى گویند .

k نسبت تبدیل

$$K = \frac{U_2}{U_1}$$

7-1 تعیین تلفات در ترانسفورماتور ها

تلفات ترانسفورماتور ها از دو جزء اصلی یکی تلفات آهن و دیگری تلفات سیم پیچی تشکیل شده است .

1-7-1 تلفات آهنی

تلفات آهنی ترانسفورماتور مجموعه ای انرژی الکتریکی که در هسته آهنی آن تلف می شود و شامل تلفات فوکو و هیستریزیس می باشد اینگونه تلفات به فرکانس و اندوکسیون ایجاد شده در مدار مغناطیسی ترانسفورماتور بستگی دارد .

2-7-1 تلفات فوکو در هسته

همانطور که می دانیم هر گاه یک قطعه فلز در میدان مغناطیسی حرکت کند و یا در یک میدان مغناطیسی متغیر قرار گیرد در آن نیروی محرکه القاء می شود که برابر است با :

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

اگر از سیم پیچی که به دور هسته فلزی پیچیده شده جریان متغیری عبور نماید از هسته فلوی مغناطیسی متغیر عبور خواهد کرد علاوه بر آن در داخل هسته که خود هادی می باشد نیروی محرکه الکتریکی القاء می شود این نیروی محرکه باعث ایجاد جریانهایی در داخل هسته می شود این جریان را جریان فلوو کوپلا سرگردان گویند مطابق قانون لنز میدان حاصل از جریان فوکو با میدان مغناطیسی به وجود آورنده اش مخالفت می کند جریان فوکو در میدانهای مغناطیسی جریان مزاحم می باشد مزاحمت بدو علت است اول آنکه در اثر عبور این جریان از آهن در اثر مقاومت الکتریکی آن حرارت ایجاد می شود و حرارت ایجاد شده باعث گرم شدن آهن و بالا رفتن تلفات می گردد دوم اینکه فلوی حاصله از جریان مذکور در خلاف جهت فلوی اصلی است . در نتیجه باعث می شود که فلوی اصلی در وسط سطح مقطع آهن تضعیف شده و درکناره ان تقویت گردد. یعنی خطوط میدان مغناطیسی به محیط سطح مقطعه فلز رانده می شوند و

توزیع فلو در مقطع هسته غیر یکنواخت می گردد . سطح مقطع بطور کامل مورد استفاده قرار نمی گیرد .

تلفات حاصل از جریان مذکور را با P_E نمایش می دهند و در یک هسته مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می شود .

$$P_E = \frac{W^2}{12P} (dB / dt)$$

W – قطر صفحه

Db – تغییرات اندوکسیون

Dt – تغییرات زمان

همانگونه که ملاحظه می کنیم تلفات فوکو با مجذور قطر ورق فولادی تناسب دارد و هر چه ورق ضخیم تر گردد تلفات فوکو به نسبت مجذور ازدیاد ضخامت افزایش خواهد یافت بنابراین بمنظور جلوگیری از عبور جریان فوکو و کاستن مقدار آن هسته های آهنی را به صورت ورقه ورقه ساخته قطر هر ورق را تا حد امکان کوچک می نمایند و ورقه ها را از هم عایق می کنند در

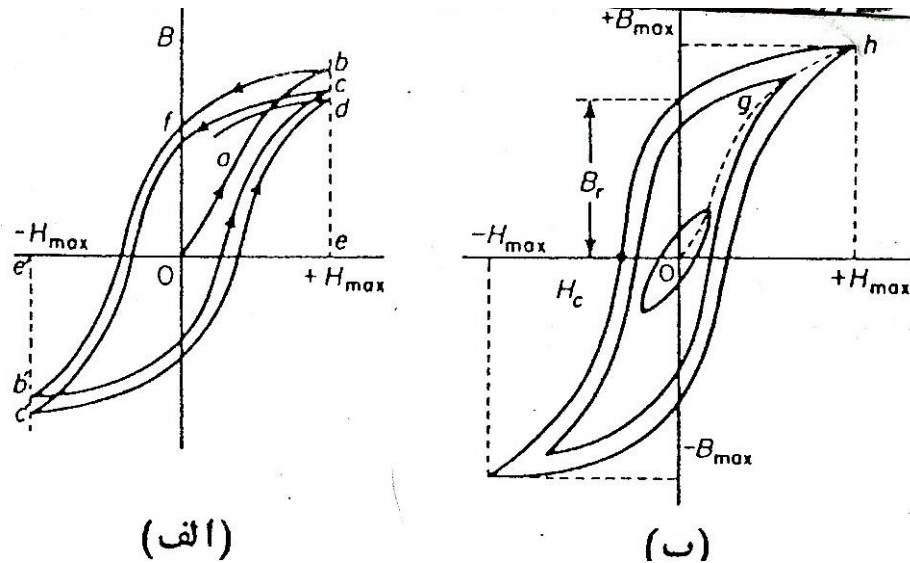
نتیجه جریان فوکو در هر ورق محدود شده تلفات ناشی از آن به حداقل می رسد. اثر آن در تغییر شکل فوران هسته نیز مینیمم می شود.

3-7-1 تلفات هیستریزیس

پدیده هیستریزیس یکی از خواص غیر خطی مواد فرومغناطیس می باشد برای درک مطلب از سیم پیچ که دارای هسته فرومغناطیسی است آزمایش زیر را انجام می دهیم.

در ابتدا هسته مزبور کاملاً غیر مغناطیسی است در سیم پیچ جریان الکتریکی برقرار می نمائیم و سپس مقدار آن را به تدریج افزایش می دهیم شدت میدان مغناطیسی افزایش یافته فلومغناطیسی افزایش یافته ای در هسته آهنی ایجاد می شود در ابتدا تغییرات دانه سیمت فوران (B) نسبت به تغییرات شدت میدان مغناطیسی (H) تقریباً خطی می باشد ولی با افزایش آن و در نتیجه افزایش H و B کم کم به مقدار ثابتی می رسد و از این پس ازدیاد (H) در مقدار (B) تاثیری ندارد (اشاره به مغناطیسی هسته) حال اگر شروع به کم کردن جریان بنمائیم و آن را به

صفر برسانیم در $i=0$ یعنی در HO مقدار B مساوی صفر نبوده مساوی Br خواهد بود Br را پسماند مغناطیسی می نامند .



شکل (1-4) منحنیهای هیستریزیس

الف) مشخصه $B-H$ یک قطعه آهن که قبلاً آهنربا نبوده است .

ب) حلقه هیستریزیس

اکنون جریان را در سیم پیچ عکس می کنیم و شروع به ازدیاد آن می نماییم می بینیم که پس از رسیدن جریان به مقدار معینی $H=H_C$ پسماند مغناطیسی خنثی شده $B=0$ خواهد گردید حال اگر در همین جهت جریان را افزایش دهیم تا B به ماکزیمم خود برسد و هسته اشباع شود و سپس جریان را دوباره تقلیل دهیم تا به صفر برسد و باز جهت جریان را مثل حالت اول نموده آنرا بیفزاییم تا به اشباع برسد حلقه بسته ای تشکیل می شود که به منحنی هیستریزیس معروف است منحنی هیستریزیس نسبت به مبدا مختصات متقارن است . از مطالعه منحنی

هیستریزیس در می یابیم که قدری از انرژی وارد شده به میدان مغناطیسی توسط سیم پیچ بصورت پسماند در داخل هسته آهنی باقی می ماند .

1-7-4 مقدار تلفات هیستریزیس

استین متز (STEIN METS) سطح سیکل هیستریزیس را بصورت تجربی به وسیله رابطه زیر نشان داد .

اگر حجم آهن V و فرکانس برق F باشد . مقدار تلفات هیستریزیس در ثانیه بصورت مقابل

خواهد بود . $P_H = FVKHB_{\max}^n$ در این رابطه B_{\max} اندوکسیون ماکزیمم می باشد .

KH و n بستگی به خواص هسته دارند . توان n برای مواد مغناطیسی معمولاً بین $1/5$ تا

2 می باشد ($1/5 < h < 2$) مقدار n برای ورقه های مغناطیسی معمولی مساوی $1/6$ مشخص

شده است وجود کربن در هسته آهنی باعث ازدیاد تلفات هیستریزیس و وجود سیل سیم در آن

باعث کم شدن تلفات مذکور می گردد . بهمین منظور در ساختمان ترانسفورماتور ها و ماشینهای الکتریکی از آهن سیلیس دار استفاده می شود .

علت ایجاد تلفات هیسترزیس تغییر وضعیتهای پی در پی ذرات هسته و ایجاد اصطکاک در شبکه کریستالی جسم و در نتیجه ایجاد تلفات حرارتی می باشد که در نتیجه باعث تلف شدن مقداری انرژی می گردد که همان تلفات هیسترزیس را تشکیل می دهد .
همانطور که بیان گردید تلفات آهنی ترانسفورماتور مجموع تلفات هیسترزیس و فوکومی باشد که تابعی از بار نبوده و لذا در طول 24 ساعت شبانه روز مقدار ثابتی است .

$$P_{Fe} = P_F + P_H \quad P_{Fe} = K_n F B_{max} + K_F F^2 B_m^2$$

K_F و K_n ضرایب مربوط به مشخصات ورقه ها می باشد .

5-7-1 تلفات مس

قدرتی که در حالت بی باری ، ترانسفورماتور از شبکه تغذیه می گیرد صرف تلفات داخلی ترانسفورماتور می گردد که تلفات مس ترانس نامیده می شود این تلفات شامل سه قسمت است . تلفات مسی سیم پیچ اولیه:

$$P_{CU} = R_{I0} I_0^2$$

از تلفات مسی سیم پیچ اولیه در حالت بی باری می توان صرفنظر نمود . زیرا حتی ترانسفورماتور های کم قدرت که جریان بی باری و مقاومت R آنها نسبتا زیاد تر است این تلفات

معمولا از 2-3 درصد مجموع تلفات بی باری تجاوز نمی کند بنابراین می توان فرض نمود که

قدرت اخذ شده در حالت بی باری فقط صرف تلفات آهنی هسته می شود.

تلفات سیم پیچ متناسب با بار ترانسفورماتور می باشد . و در بار نامی تقریبا برابر μ_n (2-)

1٪ است تلفات کل در ترانسفورماتور مجموع تلفات آهنی و سیم $P = P_{CU} + P_{FE}$

تلفات کل در بار بخصوص $a =$ توان کشیده شده تقسیم بر توان نامی ترانسفورماتور

1-8 ساختمان ترانسفورماتور

قسمت های اساسی ترانسفورماتور را می توان بشرح زیر بیان نمود :

1-مدار مغناطیسی (هسته)

2- مدار الکتریکی (سیم پیچها) (تپ چنجر)

3- مخزن روغن (تانک اصلی - مخزن انبساط)

4- مواد عایق (پوشینگها - کاغذهای عایق روغن)

5- وسایل حفاظتی نصب شده روی ترانس

1-8-1 مدار مغناطیسی (هسته)

مدار مغناطیسی ترانسفورماتور در حقیقت مداری است که کمک می نماید تا فورانهای

مغناطیسی بتوانند براحتی از دو سیم پیچ عبور کنند بمنظور کاهش تلفات فوکو هیسترزیس را

از ورقه های فولادی نورد شده به ضخامت 0/3 تا 0/5 میلیمتر که با پوشش نازکی از کاغذ و یا از

لعب یک قشر اکسید روی از یکدیگر عایق گردیده اند می سازند عرض این ورقه ها مختلف بود . بطوری که هسته ساخته شده دارای سطح مقطع تقریباً دایره ای شکل است .

2-8-1 مدار الکتریکی (سیم پیچها)

به مجموعه حلقه هایی که تشکیل یک مدار الکتریکی داده و مربوط به یکی از ولتاژهای معین ترانسفورماتور می باشد سیم پیچ گویند سیم پیچ ها یکی از اجزاء اصلی ترانسفورماتور بوده که بر روی مدار مغناطیسی قرار گرفته اند و از نظر الکتریکی توسط عایقهایی مانند کاغذ عایق میکا و غیره از یکدیگر و هسته مغناطیسی جدا گردیده اند و از لحاظ مغناطیسی به وسیله هسته به هم مرتبط می باشند . به سیم پیچ هایی است که شرایط کار توان ظاهری از شبکه تغذیه می گیرند . سیم پیچ اولیه یا ورودی و به سیم پیچ هایی که توان ظاهری به مدار بار می دهند ثانویه یا خروجی گویند .

در ترانسفورماتور ها چون عایقکاری سیم پیچ فشار ضعیف نسبت به زمین راحتتر می باشد سیم پیچ فشار ضعیف را در مجاورت هسته قرار داده و سیم پیچ فشار قوی را بر روی سیم پیچ فشار ضعیف قرار می دهند . هر یک از سیم پیچ های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور های سه فاز ممکن است به صورت ستاره ، مثلث زیگزاگ بسته شوند لذا ترانسفورماتورهای سه فاز می توانند به صورت ستاره ستاره ، ستاره مثلث ، مثلث مثلث و غیره بسته شوند .

1-2-8-1 تب چنجر

نسبت ولتاژ اولیه ترانسفورماتور به ولتاژ ثانویه آن در حالت بدون بار را n نسبت تبدیل می نامند . چنانچه ولتاژ اولیه بی باری را U_{10} ثانویه را U_{02} فرض کنیم در این صورت داریم

$$K = \frac{U_{01}}{U_{02}}$$

n نسبت تبدیل حال چنانچه از ترانسفورماتور بار گرفته شود در این صورت به خاطر

افت مس در ترانس مقداری افت ولتاژ به وجود می آید که برابر U_2 می باشد بنابراین ولتاژ ثانویه برابر $U_{02} - \Delta U_2$ خواهد شد .

مقدار این نسبت تبدیل را می توان با تغییر تعداد دور سیم پیچ ها اولیه و یا ثانویه تغییر داد به وسیله ای که این تغییر را انجام می دهد تپ چنجر گویند .

2-2-8-1 انواع تپ چنجر

الف - تپ چنجر بدون بار

OFF Load Tapchanger

ب - تپ چنجر زیر بار

On Load Tapchanger

اصولا تپ چنجر بدون بار برای ترانسفورماتورهای توزیع با قدرت کم / استفاده می شود و مخصوصا در شرایطی استفاده می شود که تغییرات ولتاژ برای مصرف کننده چندان مهم نباشد در صورتیکه هدف تنظیم ولتاژ در شرایط مختلف بار و با توجه به تغییرات بار مطرح باشد از تپ چنجر زیر بار استفاده می گردد .

3-8-1 مخزن روغن

تانک اصلی - تانک اصلی روغن مخزنی است که هسته و سیم پیچهای ترانسفورماتور در آن قرار می گیرند .

یکی از وظائف روغن در ترانسفورماتور انتقال حرارت ناشی از تلفات مس و تلفات هسته به بدنه ترانس می باشد سیم پیچ و هسته (قسمت فعال ترانس) در داخل ظرفی پر از روغن قرار می گیرد روغن که در مجاورت سیم پیچ ها و هسته قرار می گیرد گرم شده و شروع به چرخیدن

و (سیرکوله شدن طبیعی) می کند و عمل جابجائی بین روغن سرد و روغن گرم انجام می گیرد با این حرکت طبیعی عمل خنک کردن قسمتهای فعال انجام می گیرد ظرفی که به این منظور ساخته می شود باید در مقابل فشارهای داخلی بیش از 0/5 اتمسفر را تحمل نماید .

مخزن انبساط

با توجه به تغییرات با رو درجه حرارت محیط ترانس درجه حرارت روغن ترانسفورماتور تغییر می نماید و این تغییرات درجه حرارت ایجاد تغییراتی در حجم روغن داخل ترانسفورماتور می نماید لذا برای آنکه مطمئن باشیم داخل تانک همواره پر از روغن می باشد از مخزن انبساط که به تانک ترانسفورماتور مرتبط می باشد استفاده می گردد . حجم روغن داخل منبع ذخیره به 8 تا 10 درصد روغن داخل تانک ترانسفورماتور می رسد این بدان دلیل است که تحت هیچ شرایطی نبایستی منبع بدون روغن بماند از درجه حرارت مینیمم 45 - درجه سانتیگراد تا ماکزیمم 40 + درجه سانتیگراد و از بی باری تا بارداری کامل ترانسفورماتور .

4-8-1 مواد عایق

مواد عایق موادی هستند که برای عایق کردن قسمت های برقدار دستگاه های الکتریکی از یکدیگر و قسمتهای زمین شده به کار می روند .

مواد عایق مورد استفاده در ترانسفورماتور ها عبارتند از :

الف - کاغذهای عایق

ب- روغن عایق

ج- پوشینکهای عایق

الف - کاغذهای عایق :

جهت عایق کردن سیمها، لایه کویل ها، و دیگر نقاط سیم پیچ ها از کاغذ های عایق استفاده می شود این کاغذها از خمیر فشرده شده به رنگ قهوه ای روشن ساخته می شوند .

کاغذ عایق در ترانسفورماتور دارای دو نقش عمده است از یک طرف به عنوان عایق عمل می کند و از طرف دیگر نیروهای مکانیکی ناشی از جریانه های اتصال کوتاه و وزن سیم ها را تحمل می کند از این رو کاغذ باید دارای خواص عایقی خوبی از قبیل استقامت الکتریکی زیاد، ضریب تلفات عایقی کم، مقاومت مخصوص زیاد و همچنین دارای خواص مکانیکی خوبی باشد و در مقابل حرارت روغن نیز دارای مقاومت بالائی باشد .

ب - روغن عایق

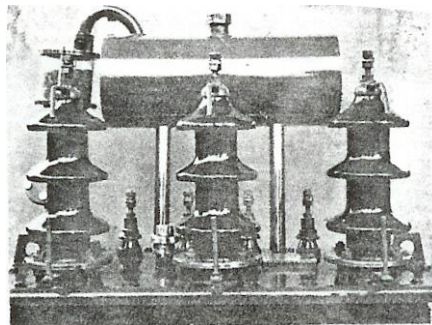
روغن عایق از نوع روغنهای معدنی تقطیر و تصفیه شده با غلظت کم می باشد که دارای جرم مخصوص حدود 0/87 گرم بر سانتیمتر مکعب در دمای 20 درجه سانتیگراد و نقطه اشتعال آن حدود 130 الی 160 درجه سانتیگراد می باشد در ترانسفورماتور ها روغن دارای دو نقش عمده و اساسی می باشد اول اینکه به عنوان عایق عمل می کند و از طرف دیگر وظیفه انتقال حرارت ناشی از تلفات مس و آهن را به عهده دارد .

ج - پوشینکهای عایق

جهت رساندن فشار الکتریکی به ترانسفورماتور و همچنین عایقکاری هادی حامل انرژی نسبت به تانک و یا هادی دیگر از مقره های عایق استفاده می شود این مقره ها بسته به فشار الکتریکی اعمال شده و محیط نصب ترانس (داخل یا فضای آزاد) در اندازه های مختلف به کار

می روند (مطابق شکل) در خروجی سیم پیچ های فشار قوی ($H.V$) و فشار ضعیف ($L.V$) ترانسفورماتور ها تا ولتاژ 35 کیلو ولت از مقره های پراز هوا یا روغن استفاده می شود .

برای جلوگیری از حرارت زیاد و بوجود آمدن خاصیت خازنی با توجه به خاصیت سلفی ترانسفورماتور و کاهش افت ولتاژ در داخل مقره ها قطعات فیبری در اطراف سرهای خروجی نصب می شود .



شکل (5-1) نمایش پوشینگهای عایق

5-8-1 وسایل حفاظتی

الف - رله بوخهلتس

رله بوخهلتس وسیله ای است که جهت حفاظت دستگاههایی که توسط روغن خنک می شوند به کار می رود از رله بوخهلتس جهت حفاظت ترانسفورماتور استفاده می شود این رله بین مخزن اصلی و ترانس و مخزن ذخیره روغن نصب می شود رله بوخهلتس بسیار دقیق بوده و به

محض اتفاق کوچکترین خطائی عمل می نماید و از وارد آمدن خسارت به ترانسفورماتور جلوگیری می کند . عواملی که سبب به کار انداختن این رله می شود عبارت است از :

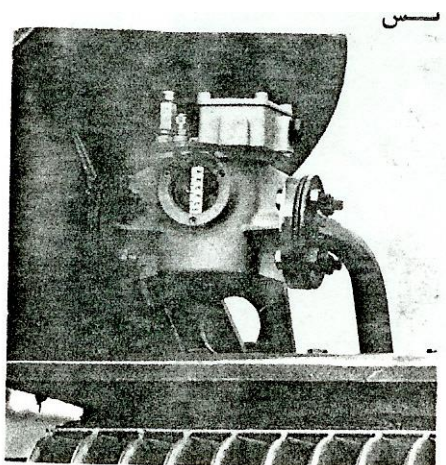
جرقه بین هسته و قسمت‌های مختلف ترانس

اتصال زمین

اتصال بین حلقه‌های کلاف

قطع شدن یک فاز

سوختن آهن و چکه کردن روغن از تانک



شکل (6-1) یک نمونه رله بوخهلتس

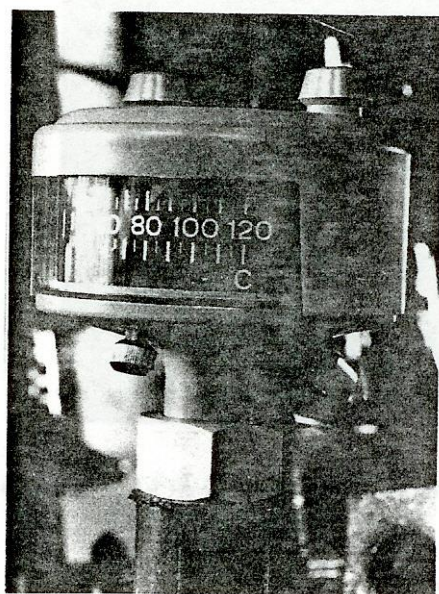
گازهای تولید شده در اثر جرقه در داخل رله بوخهلتس جمع شده و سبب می شود شناور رله عمل کند که در این حالت فرمان الارم صادر می گردد اما اگر اتصالی شدید باشد و یا سطح روغن از حد مجاز پایین تر رود سبب می شود که شناور دوم رله بوخهلتس عمل نموده که در این حالت ترانسفورماتور کلا از مدار تغذیه و بار قطع می شود پس از قطع شدن ترانسفورماتور در

اثر عملکرد رله بوخهلتس باید گاز هایی که در محفظه گاز رله جمع شده است خارج نمود
تاشناور مجددا به محل اولیه خود باز گردند .

معمولا رله بوخهلتس را بر روی کلیه ترانسفورماتور های روغنی که قدرت آنها از KVA 315 بالا تر است جهت حفاظت داخلی نصب می نمایند .

ب- رله کنترل درجه حرارت سیم پیچ

رله کنترل حرارت یکی از مهمترین و سایل حفاظت ترانسفورماتور در مقابل بار زیاد است
زیرا در آن درجه حرارت ترانسفورماتور پیش از بارگیری نیز موثر است و یا به عبارت دیگر توسط
این دستگاه حرارت سیم پیچ و روغن هر دو کنترل می شود .
رله کنترل درجه حرارت تشکیل شده است از یک لوله که در داخل ظرف ترانسفورماتور در
محل مخصوصی نصب می شود در داخل این لوله یک سیم پیچ گرم کن یک مقاومت سنجشی و
یک اتوترانسفورمر استفاده می شود .

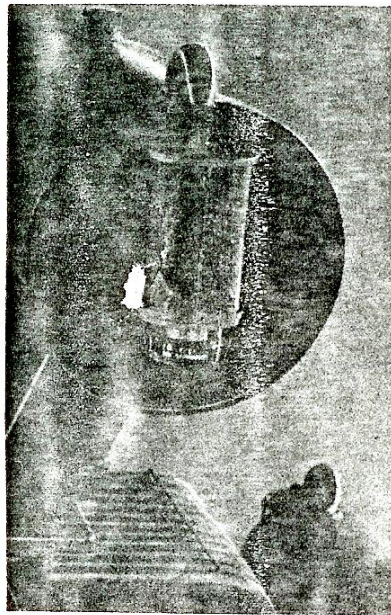


شکل (7-1) رله کنترل درجه حرارت سیم پیچ ها

ج- ظرف سیلی کاژل :

حجم روغن داخل ترانسفورماتور در اثر حرارت یا برودت هوا و تغییرات بار افزایش و یا کاهش یافته و با تغییر حجم فضای آزاد موجود و قسمت‌های بالا منبع انبساط جریان هوا از داخل به خارج و یا بالعکس برقرار می‌گردد هوایی که از خارج به داخل ترانس داده می‌شود دارای رطوبت بوده که به منظور جذب رطوبت موجود در هوا از موادی به نام سیلی کاژل که در ظرف مخصوصی قرار داشته و روی ترانس نصب می‌گردد استفاده می‌شود ظرف مخصوص به وسیله لوله نازکی به فضای آزاد واقع در قسمت بالائی تانک ذخیره مرتبط می‌گردد سیلی کاژل تا

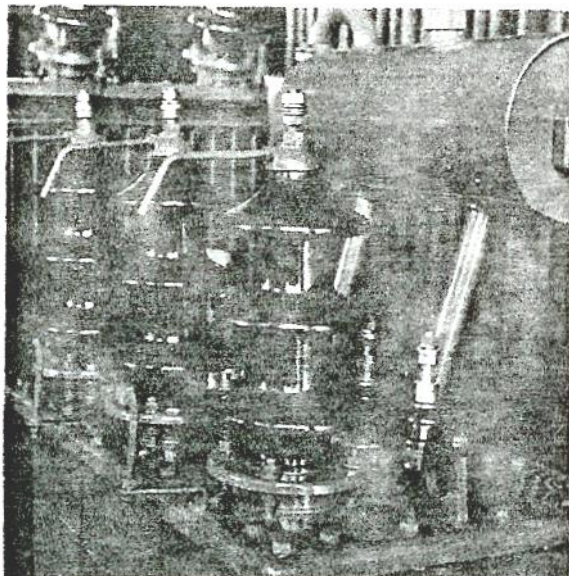
زمانیکه رطوبت به خودنگرفته بصورت آبی پررنگ است و پس از جذب رطوبت به رنگ صدفی در خواهد آمد.



شکل (8-1) نمونه ای از ظرف سیلی کازل

9-1 جرقه گیر

جرقه گیر عبارت است از دو فاصله معینی از هم روی پوششهای فشار قوی ترانسفورماتور نصب می شود و به جهت حفاظت ترانسفورماتور در مقابل اختلاف سطح زیاد اعمال شده و به دو سرازولاتور ها به کار می رود .

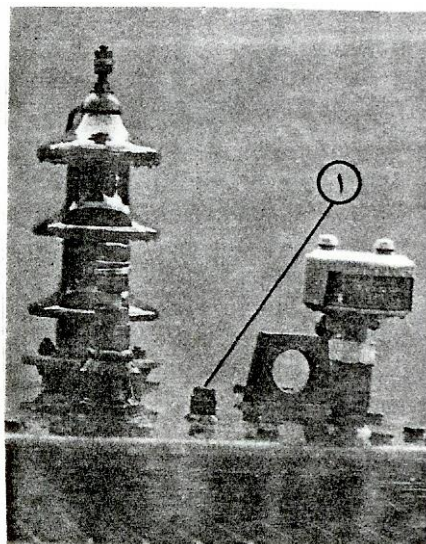
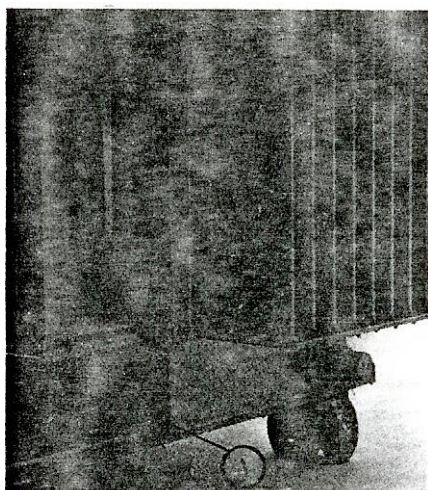


شکل (9-1) شمای کلی یک ترانسفورماتور با مخزن روغن و سیستم جرقه گیر
فاصله هوایی دو الکترود باید به قدری باشد که اگر فشار الکتریکی دو سر ایزولاتور به اندازه
 $1/5$ تا 2 برابر اختلاف سطح نرمال ترانسفورماتور برسد بین این دو الکترود تخلیه الکتریکی

حاصل نشود این وسیله عملاً برای حفاظت ایزولاتور به کار برده می شود و باعث می شود که جرقه بین دو سر ایزولاتور از ایزولاتور دور نگه داشته شود.

1-10 پیچ ارت

از آنجا که ترانسفورماتور ها را باید جهت حفاظت در مقابل اتصال بدنه و همچنین هدایت جریان اتصال بدنه به زمین جهت حفاظت اشخاص زمین نمود که برای این منظور پیچ های ارت بر روی بدنه ترانس مطابق شکل تعبیه گردیده است.



شکل (1-10) نمایش پیچ ارت

فصل دوم

بررسی بین منحنی $B-H$ و آنالیز هارمونیک جریان مغناطیس کننده

1-2 مقدمه

رابطه بین H, B

شدت میدان مغناطیسی (H) در هر کجا که باشد چگالی شار مغناطیسی (B) را پدید می آورد و این دو کمیت اینگونه بهم وابسته اند .

$$B = \mu H \text{tesla}$$

$$B = \mu_r \mu_0 HT$$

باید دانست الف μ خصیصه ای از محیط است و ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی محیط نام دارد (پرمابلیته) .

ب: μ_0 ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی (پرمابلیته) فضای آزاد بوده و برابر $4\pi * 10^{-7}$ است واحد این ضریب هانری بر متر می باشد .

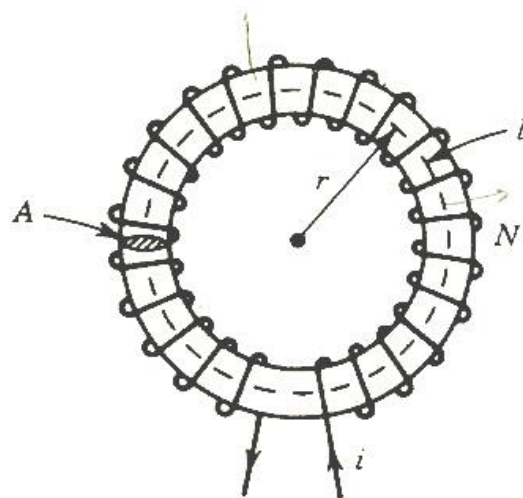
ج: μ_r ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی محیط نام دارد (پرمالیتیه نسبی) در فضای آزاد با هادیهای الکتریکی همچون مس و آلومینیوم یا عایقها مقدار μ_r برابر یک است اما در مواد مغناطیسی همانند آهن، کبالت و نیکل ، μ_r از چندین صد تا چندین هزار تغییر می کند .

2-2 منحنی مغناطیس شوندگی

اگر در هسته چنبره شکل 1-2 با افزایش جریان i شدت میدان مغناطیسی (H) افزون شود چگالی شار در هسته همانند شکل 2-2 تغییر یافته و افزایش می یابد . به منحنی شکل 2-

2 مشخصه

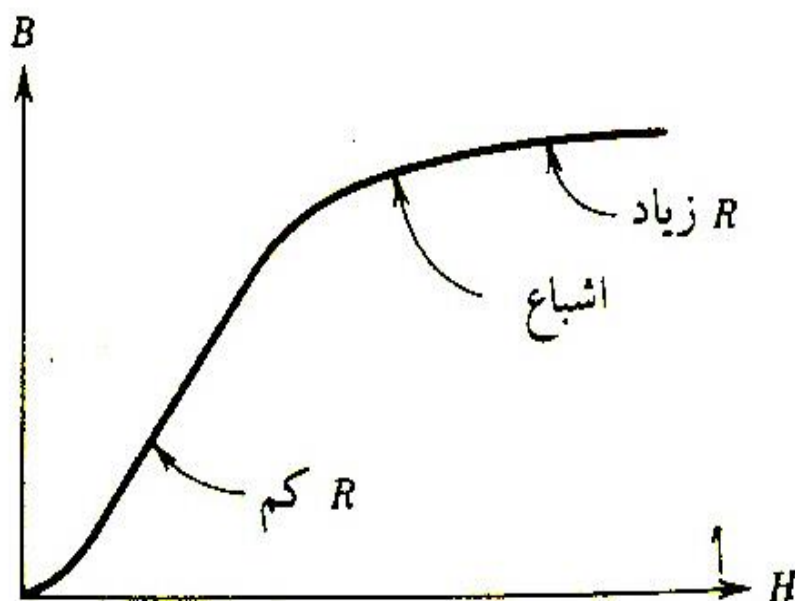
$B-H$ یا منحنی مغناطیس شوندگی گفته می شود .



شکل (1-2) نمایش شدت جریان در هسته چنبره شکل

چگالی شار (B) در ناحیه ای که شدت میدان مغناطیسی (H) اندازه های کمی دارد تقریباً بگونه ای خطی افزایش می یابد در حالیکه در اندازه های بیشتر H ، تغییرات B غیر خطی است به عبارت دیگر ماده مغناطیسی اثرات اشباع را از خود نشان می دهد و مقاومت مغناطیسی

(رلوکتانس) مسیر مغناطیسی به چگالی شار (B) بستگی دارد. آنگاه که B کم است مقاومت مغناطیسی کوچک است و هرگاه B بزرگ باشد مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) نیز زیاد است از این نظر مدار مغناطیسی با مدار الکتریکی متفاوت است زیرا عموماً مقاومت به جریان در مدار الکتریکی بستگی ندارد حال آنکه مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) به چگالی شار مدار مغناطیسی وابسته است

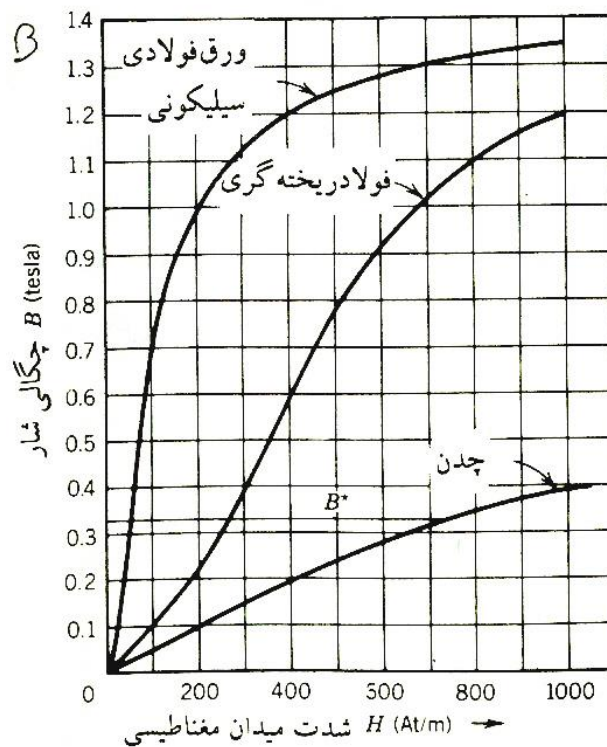


شکل (2-2) منحنی مغناطیس شونده گی هسته

م. شخ صه $B-H$ سه ه سته مغناطیسی از قبیل چدن ، فولاد ریخته گری و ورق فولادی

سیلیکونی در شکل 2-3 نشان داده شده است . واضح است اگر بخواهیم چگالی شار خاصی (B)

در این سه ماده پدید آید به جریانهای متفاوتی نیاز داریم .



شکل (2-3) منحنی های مغناطیس شوندگی

2-3 پس ماند (هیسترزیس)

شکل 1 و 2-4 را در نظر می گیریم که در آن سیم پیچ به دور هسته پیچیده شده است

فرض کنید که هسته در ابتدای امر مغناطیس نشده باشد. حال اگر شدت میدان مغناطیسی (

H) توسط جریان i که به آرامی افزایش می یابد زیاد گردد چگالی شار (B) مطابق منحنی $0a$

در شکل 2 و 2-4 تغییر خواهد یافت. نقطه a مربوط به مقدار خاصی از شدت میدان مغناطیسی

مثلاً H_1 که متناظر با i_1 است خواهد بود. اگر اکنون شدت میدان مغناطیسی (H) به آرامی

کاهش یابد منحنی $B-H$ مسیر دیگری را دنبال خواهد کرد. این مسیر بصورت abc در شکل

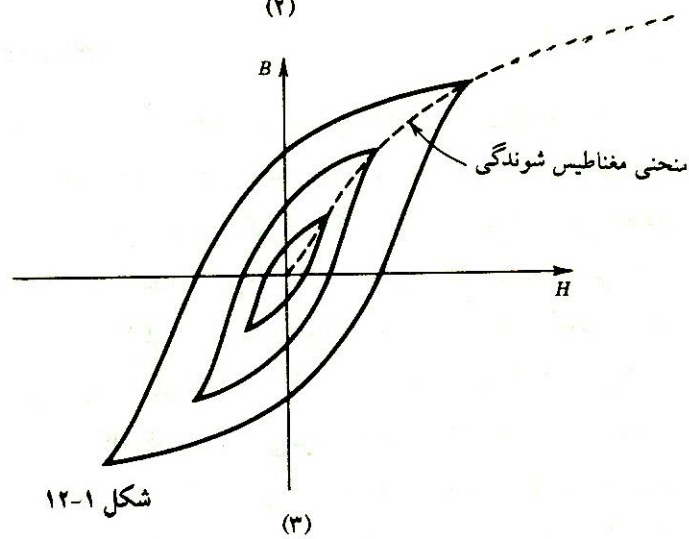
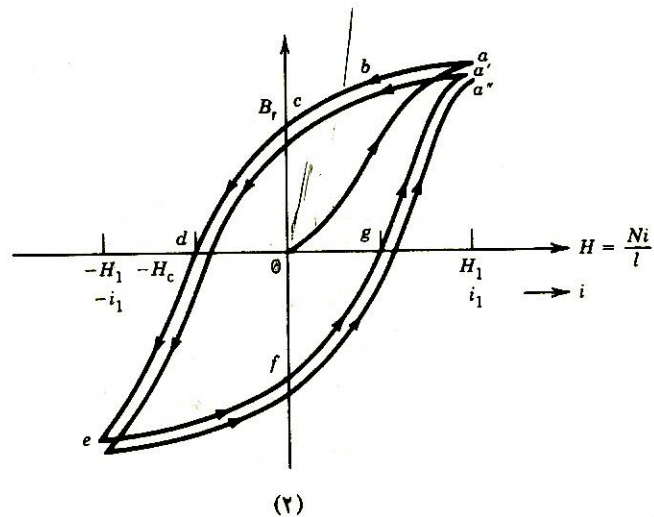
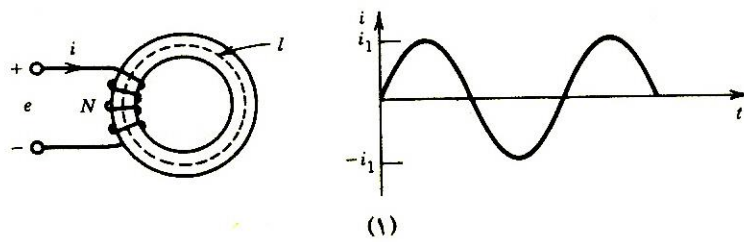
2 و 4-2 نشان داده شده است. هنگامیکه H صفر می گردد هسته چگالی شار B_r را از دست نداده و به Br چگالی شار پس ماند گفته می شود اگر H وارونه گردد (با وارونه کردن جریان) شار در هسته کاهش یافته و در مقداری از H مثلاً ($-HC$) در شکل 2 و 4-2 چگالی شار پس ماند از میان خواهد رفت این مقدار از H یعنی ($-HC$) را نیروی الزام گر هسته مغناطیسی یا الزام گری هسته می نامند.

حال اگر H بیش از این دو جهت وارونه افزایش یابد چگالی شار متناظر با نقطه e خواهد بود شکل (2 و 4-2). حال اگر H به صفر تقلیل یابد و سپس تا میزان H افزایش یابد در اینصورت منحنی $B-H$ مسیر $efga$ را طی خواهد کرد باید دانست حلقه بسته نمی شود. حال اگر H برای یک سیکل کامل (یک چرخه کامل) دیگر تغییر کند. نقطه انتهائی a'' خواهد بود شکل 2 و 4-2.

در این صورت a', a'' خیلی به هم نزدیک هستند. پس از چند سیکل مغناطیس شدن حلقه تقریباً بسته شده به حلقه پس ماند (حلقه هیسترزیس) معروف است. حلقه پس ماند نشان می دهد که رابطه بین B , H غیر خطی و چند مقداری است توجه کنید در نقطه C هسته مغناطیس شده است. گرچه جریان سیم پیچ صفر است.

حلقه های کوچکتر پس ماند با کاهش دامنه تغییرات شدت میدان مغناطیسی (H) بدست می آید. شکل 4 و 3 و 2 دسته ای از حلقه های پس ماند را نشان میدهد. مکان هندسی نوک حلقه های پس ماند که در شکل 3, 4, 2 بصورت خط چین نشان داده شده است منحنی مغناطیس شوندگی می نامیم. اگر هسته در حالتی که فاقد وضعیت آغازین مغناطیسی است. (هسته خام) مغناطیس گردد. چگالی شار مطابق منحنی مغناطیس شوندگی افزایش می یابد. در برخی از هسته ها، حلقه های پس ماند نازک و باریک می باشند. اگر بتوان از تاثیر

پدیده پس ماند در این گونه هسته ها چشم پوشی نمود مشخصه $B-H$ آنها با منحنی مغناطیس
شوندگی تغییر می گردد .



شکل ۱-۱۲

- ۱- هسته و سیم پیچ با تغییرات جریان سیم پیچ
- (جریان تحریک) ۲- پس ماند (هیستریزس)
- ۳- حلقه های پس ماند (هیستریزس)

شکل (2-4) منحنیهای هیستریزیس

2-4 تلفات پس ماند (تلفات هیستریزیس)

حلقه های پس ماند در شکل 3-2 با عبور جریان i که به آرامی تغییر می کند در طی یک سیکل کامل بدست آمده است. تغییرات i در شکل 1، 2-4 نشان داده شده است. در طی سیکل کامل جریان در چند دوره زمانی انرژی به سیستم هسته سیم پیچ روانه می شود و در چند دوره زمانی دیگر انرژی به منبع باز می گردد. انرژی وارونه به سیستم همواره بیشتر از انرژی برگشتی به منبع است. لذا در یک سیکل کامل از جریان که تغییرات H را به دنبال دارد مقداری از انرژی تلف می شود این تلف انرژی در هسته بصورت گرما آشکار می شد. تلفات توان هسته بخاطر پدیده پس ماند به تلفات پس ماند معروف است.

2-5 تلفات هسته

بطور کلی هسته از مجموع تلفات پس ماند و تلفات جریان گردابی حاصل می شود حال دوباره سیستم شکل 1، 2-4 را در نظر می گیریم. اگر جریان سیم پیچ به آرامی تغییر کند جریان گردابی القاء شده بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است. در این حالت حلقه $B-H$ برای میدانهای که به آرامی تغییر می نمایند. حلقه پس ماند یا حلقه ایستا (استاتیک) نامیده می شود. اما اگر جریان سیم پیچ به تندی تغییر کند حلقه $B-H$ پهن تر شده علت آن تاثیر جریان گردابی است. حلقه وسعت یافته $B-H$ را حلقه پویا (دینامیک) می نامند. البته گاهی به حلقه پهن شده نام حلقه پس ماند جریان گردابی نیز اطلاق می گردد. شکل 2-5 حلقه

ایستا و پویا نشان می دهد . تاثیر جریان گردابی بر حلقه $B-H$ را اینچنین می توان توجیه کرد

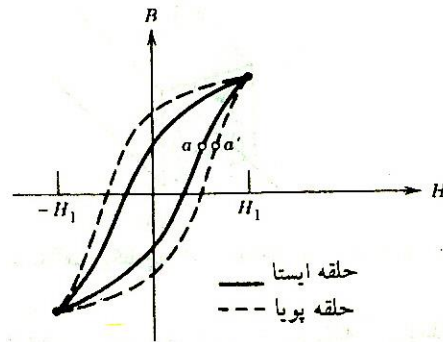
هرگاه جریان سیم پیچ به تندی تغییر کند . جریان گردابی در هسته ظاهر می شود . این

جریان گردابی نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) ایجاد کرده و درصد تغییر شار بر می آید . برای

حفظ شار در حد معین جریان سیم پیچ باید افزایش یابد تا بر (mmf) ناشی از جریان گردابی

چیره گردد . از نقطه a از حلقه $B-H$ ایستا نقطه a بر روی حلقه $B-H$ پویا جا به جا می شود

. این جا به جایی به خاطر تغییر تند جریان سیم پیچ است و سبب می گردد تا حلقه پویا پهن تر از حلقه ایستا باشد .



شکل (5-2) حلقه های ایستا و پویا

2-6 جریان تحریک

برای ایجاد شار سینوسی در هسته از سیم پیچ جریان می گذرد . این جریان را جریان تحریک می نامند . اگر مشخصه $B-H$ هسته فرومغناطیسی غیر خطی باشد . جریان تحریک $I\phi$ غیر سینوسی خواهد بود .

2-7 پدیده تحریک در ترانسفورماتور ها

در یک ترانسفورماتور ایده آل فرض بر آن بود که حالت اشباع مغناطیسی به وقوع نمی پیوندد . حتی وقتی که نمودار برداری و مدار معادل بدست می آورده ایم . مدار مغناطیسی را خطی فرض نمودیم . علت این است که اثر غیر خطی مغناطیسی را نمی توان در مدارهای مغناطیسی و نمودار برداری ترانسفورماتور نشان داد . برای منحنی مغناطیسی خطی ، شار با جریان مغناطیس

کننده متناسب است اما در عمل اشباع مغناطیسی وجود دارد و منحنی های شار و جریان مغناطیسی کننده از یکدیگر متفاوت اند جریان لازم برای ایجاد شار در مدار مغناطیسی را جریان تحریک می نامند مطالعه پدیده تحریک در ترانسفورماتور به معنی طبیعت جریان تحریک ولتاژ و شار در زمانی است که اولیه ترانسفورماتور تغذیه شد و سیم پیچ ثانویه آن باز است .

ابتدا منحنی مغناطیسی را برای هسته ای که دارای تلفات پس ماند نمی باشد در نظر می

گیریم . شکل (a) 2-6 در اینجا منحنی مغناطیسی به و سیله شار (سطح $\varphi = BX$) و جریان

مغناطیس کننده $i\varphi(\frac{H1}{N})$ به جای چگالی شار (B) و شدت میدان مغناطیسی (H) نشان داده

شده است . می توان مقدار $I\varphi$ را مستقیماً از روی شار φ داده شده اندازه گرفت . ولتاژ تغذیه

V_1 در اینجا سینوسی است . افت ولتاژ روی امپدانس

پراکندگی اولیه در بی باری ناچیز است و بنابراین قابل حذف است بنابراین شار تولیدی در

هسته آهن از رابطه $V_1 = \sqrt{Z} \lambda F N_1 \varphi_m$ که V_1 سینوسی و شار φ سینوسی است بدست می

آید. حالا برای شار سینوسی منحنی جریان تحریک باید بدست آورده شود. برای هر شار برابر ab

و bc موازی با oo' رسم و cd را عمود بر oo' رسم می کنیم شکل 2-6a پس $od=ae$

جریان مغناطیس کننده است برای تولید شار ab است برای ماکزیمم شار برابر با fq مسیر پیکان

gh و hj را تعقیب می کنیم . جریان $oj=fk$ ماکزیمم شار fg تولید می کند . نقاط کافی از

منحنی جریان ادامه می یابد منحنی عبوری از این نقاط منحنی مورد نظر خواهد بود شکل (a)

2-6 نکات بارز این شکل موج عبارتند از :

(1) این موج قله دار است و حول مقدار ماکزیمم آن متقارن است .

(2) شار و جریان در یک زمان به مقدار ماکزیمم خود می رسند .

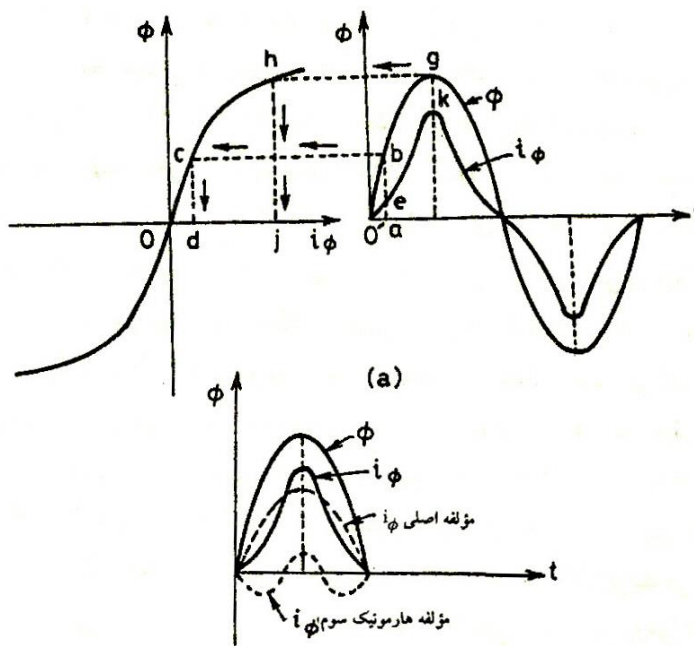
تحلیل فوریه این منحنی نشان می دهد که جریان مغناطیس کننده شامل مولفه اصلی

سینوسی و یک سری هارمونیک فرد می باشد که غالب ترین آنها هارمونیک سوم می باشد .

شکل (b) 2-6 مولفه اصلی $I\varphi$ هم فاز با φ و چونکه φ نسبت به V_1 90° پس

فاز است پس مولفه اصلی نسبت به V_1 90° درجه عقب است . بنابراین توان بدست آمده از منبع

صفر است زیرا زاویه بین V_1 و مولفه اصلی $I\phi$ 90° است. توان مربوط به فرکانس اصلی ولتاژ V_1 و هارمونیک های فرد $i\phi$ همیشه صفر است.



شکل (2-6) (a) شکل موج جریان مغناطیسی کننده $I\phi$ در غیاب پس ماند (b)

مولفه های اصلی و هارمونیک سوم $I\phi$

این نشان می دهد که اشباع مغناطیسی (بدون پس ماند) تلفات توان به همراه ندارد. این عامل صرفاً موج جریان را دارای اعوجاج می کند. حال منحنی مغناطیسی همراه با پس ماند شکل (a) 2-7 را در نظر بگیرید هنگامی که شار صفر است و در حال افزایش چنانچه با نقطه o' بر روی منحنی جریان تحریک قرار می گیرد وقتی شار افزایش می یابد و به مقدار cd برسد. جریان تحریک برابر $of=cq$ است. برای کاهش شار به اندازه $c'd'$ جریان تحریک $oj = e'g'$ است بدین طریق تعداد نقاط کافی برای جریان تحریک بدست می آید و منحنی عبور کرده از این نقاط لازم برای جریان تحریک را به ما می دهد توجه کنید که وقتی شار افزایش می

یابد از قسمتی از حلقه پس ماند که در آن شار افزایش می یابد استفاده کنید. این مطلب در هنگام کاهش شار نیز صادق است.

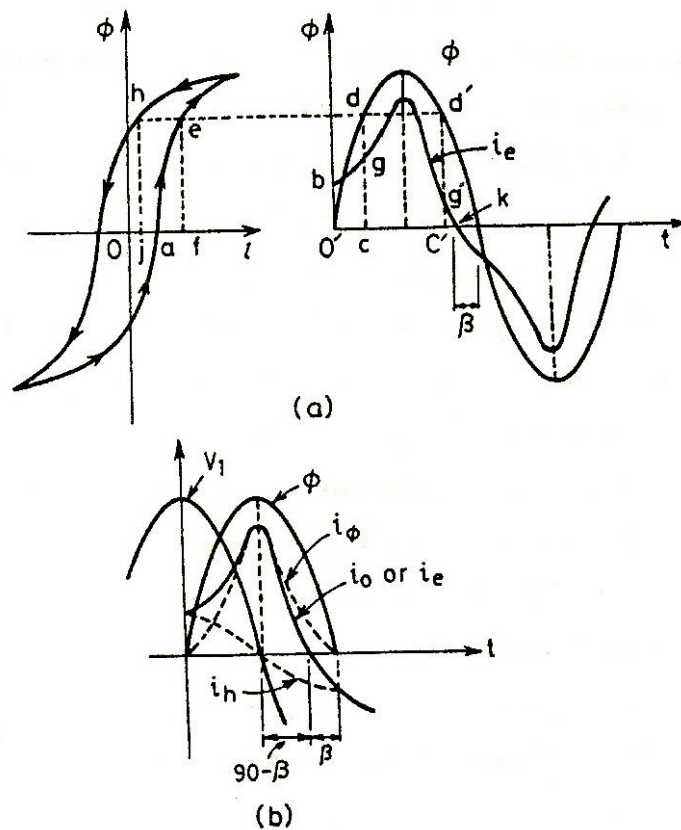
از بررسی منحنی بی باری با جریان تحریک (io یا ie) نتیجه می شود که جریان تحریک حالت تقارن خود را نسبت به مقدار ماکزیمم از دست داده است وقتی که جریان ie در نقطه k

صفر است شار مثبت است. بنابراین جریان i_e نسبت به شار به اندازه کوچک B جلو است زاویه پس ماند نامیده می شود.

شار نسبت ϕ به ولتاژ منبع V_1 90° عقب است و جریان تحریک i_e نسبت به شار اندازه

B جلو است به عبارت دیگر i_e نسبت به V_1 به اندازه $(90^\circ - \beta)$ عقب است شکل (b) 2-7

حاصل ضرب $\cos(90 - \beta)$ * (جریان تحریک) * V_1 تلفات پس ماند را بدست می دهد.



شکل (2-7)

(a) شکل موج جریان بی باری یا جریان تحریک با پس ماند

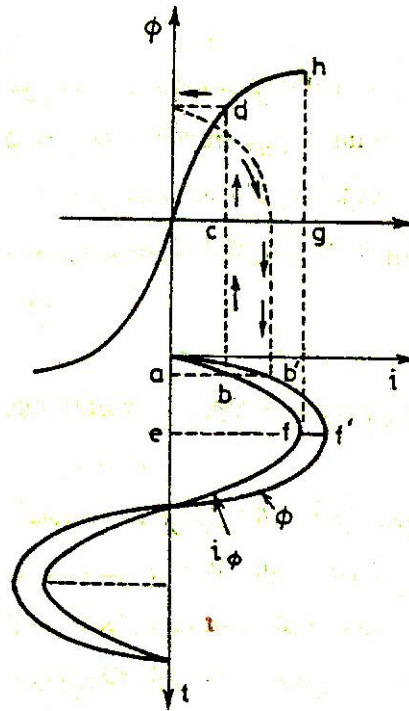
(b) جریان تحریک i_c به i_ϕ و ch تجزیه شده است.

جریان i_e را می توان به جریان مغناطیس کننده i_ϕ هم فاز با ϕ و جریان تلفات پس ماند i_h که به اندازه 90 نسبت به ϕ پیش فاز دارد . طبق شکل (a) 2-6 تجزیه نمود . که شکل موج i_ϕ شکل (a) 2-7 شبیه شکل (a) 2-6 است . همانند قبل i_ϕ شامل مولفه اصلی سینوسی و یک سری هارمونیک های فرد است که هارمونیک سوم مقدار بیشتری دارد حاصل ضرب $v_1 I_h$ تلفات پس ماند را به می دهد . مولفه جریان I_{ed} که برابر تلفات جریان فوکو pe تقسیم بر v_1 بدست می آید که با I_h جمع می شود تا جریان تلفات کل هسته I_c بدست آید .

اگر حلقه پس ماند دینامیکی در فرکانس نامی شکل (a) باشد پس هر دو مولفه تلفات جریان فوکو و تلفات پس ماند شکل (a) 2-7 ظاهر می شوند .

از نظر تئوری یک کمیت غیر سینوسی را نمی توان با یک بردار نشان داد . اما متداول است که در محاسبات ترانسفورماتور مقدار موثر موج های جریان واقعی را به صورت بردار رسم نمائیم I_ϕ همراه m و ϕ و I_c در امتداد v_1 رسم می شوند اگر جریان تحریک محدود به تغییر به صورت سینوسی باشد (با قرار دادن مقاومت بزرگ به صورت سری در مدار اولیه) پس شکل موج تغییرات شار همانطور که در بالا ذکر شد بدست می آید اگر منحنی مغناطیسی بدون پس ماند در نظر گرفته شود شکل 2-8 وقتی که جریان سینوسی ab است شار $cd=ab$ است برای مقدار ماکزیمم جریان مغناطیس کننده ef شار برابر $gh=ef$. در این حالت تعداد کافی از نقاط برای شار به دست می آید در منحنی عبور کرده از این نقاط موج سینوسی بر حسب جریان

مغناطیس کننده $i \phi$ داده می شود. از شکل 2-8 مشاهده می شود که جریان سینوسی $i \phi$ تولید موج شار سر صاف می کند.



شکل (2-8) شکل موج شار ϕ برای جریان مغناطیس کننده سینوسی

2-8 تعریف و مفهوم هارمونیک ها

2-8-1 هارمونیک ها

هارمونیک ها ، ولتاژ ها یا جریانهای سینوسی هستند که فرکانس آنها مضربی صحیح از فرکانس نامی شبکه است . هارمونیک ها به دلیل وجود مشخصه غیر خطی بارهای مشترکین و تجهیزات شبکه ایجاد می گردند سطح اعوجاجی هارمونیکی توسط طیف هارمونیکی شکل موج توصیف شده که در آن هر مولفه هارمونیکی به شکل مجزا با دامنه و زاویه فاز خود مشخص می گردد . جریانهای هارمونیکی تزریقی به شبکه قدرت ناشی از برخی بارهای مشترکین می تواند موجب اعوجاج هارمونیکی ولتاژ شبکه شوند . این جریانها و ولتاژهای هارمونیکی سبب اضافه

حرارت در تجهیزات ترانسفورماتور ها و هادی های حامل جریان و عملکرد نا مناسب وسایل حفاظتی (مثل فیوزها) می شوند . همچنین ممکن است تشدید هارمونیک بوجود آورند که می تواند موجب خرابی و صدمه دیدگی تجهیزات مشترکین و شرکت برق گردد .

2-8-2 هارمونیک های میانی

هارمونیک های میانی ولتاژها و یا جریانهای سینوسی هستند که فرکانس آنها مضرب صحیحی از فرکانس اصلی نیست هارمونیکها میانی می توانند در شبکه های با سطوح مختلف ولتاژ ظاهر می شوند . منبع اصلی تولید آن مبدل های فرکانسی برخی یکسوکننده ها موتورهای القایی و کوره های القایی هستند . سیگنالی های مخابراتی که از طریق خطوط انتقال نیرو انتقال می یابند (PLC) نیز می توانند به نوعی هارمونیک میانی در نظر گرفته شوند . هارمونیک های میانی در گیرنده های ریل کنترل تاثیر نا مناسبی می گذارند و همچنین اثراتی در موتور های القایی و کوره های قوس الکتریکی دارند .

2-9 ناپایداری هارمونیک مرتبط با هسته ترانسفورماتور در سیستم های AC-

DC

اشباع هسته ترانسفورماتور اغلب سبب تقویت ناپایداری هارمونیک می شود چندین مورد از وقوع پدیده ناپایداری اشباع هسته ترانسفورماتور در پستها گزارش داده شده است و علیرغم این وقایع اطلاعات کمی در مورد طبیعت این پدیده وجود دارد احتمالاً همین امر باعث شده تا این پدیده را اشتباهاً به عنوان نوع دیگری از ناپایداری هارمونیک یا تشدید تعبیر کنند در

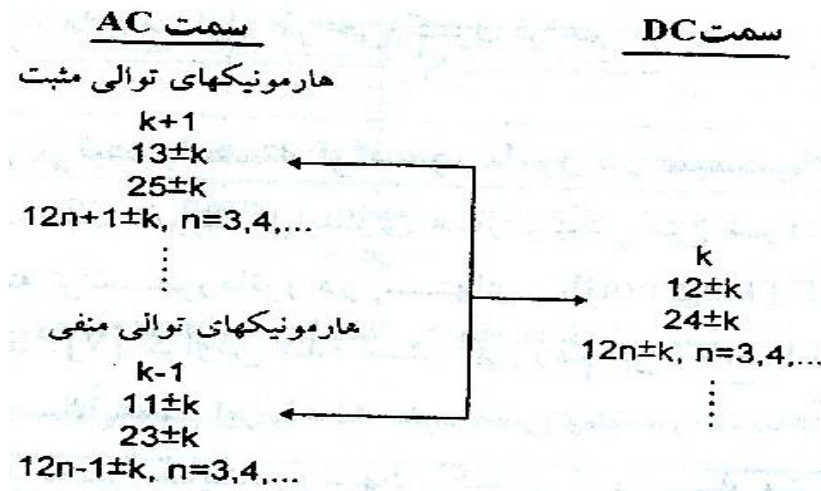
روشهای کنترل آن بسیار مشابه است و نوعا شامل مدولاسیون زاویه آتش و در بعضی موارد نصب می شود .

2-10 واکنشهای فرکانسی AC-DC

مکانیزم واکنش هارمونیک $ac - dc$ در شکل 2-9 بطور خلاصه آورده شده است . حضور اعوجاج هارمونیک در k برابر فرکانسی اصلی در سمت dc یک مبدل 12 پالس $Hvdc$ در سمت ac هارمونیک های توالی مثبت با مرتبه های $12n+1 \pm k, 25 \pm k, 13 \pm k, k+1$ (که $n = 3, 4, \dots$) تولید خواهد کرد و هارمونیک های توالی منفی با مرتبه های $12n-1 \pm k, 23 \pm k, 11 \pm k, k-1$ (که $n = 3, 4, \dots$) تولید خواهد نمود . با اهمیت ترین آنها اولین مرتبه هارمونیک k در سمت dc و هارمونیک های توالی $k+1$ و توالی منفی $k-1$ در سمت AC می باشند . هارمونیک های بالاتر از نظر ارزش یک مرتبه کمتر از هارمونیک های مرتبه پایین تر هستند بنابراین برای اکثر تحلیلها به ویژه آنهایی که سطوح اعوجاج کمی دارند

منطقی تر است که اثر هارمونیک های مرتبه بالا را نادیده بگیریم. شکل 9-2 مرتبه هارمونیک های مورد انتظار در هر طرف مبدل $Hvdc$ را نشان می دهد.

با صرف نظر نمودن از هارمونیک های مرتبه بالا وجود اعوجاج هارمونیک دوم در سمت dc باعث ایجاد هارمونیک سوم توالی مثبت و مولفه فرکانس اصلی توالی منفی در سمت ac خواهد شد.



شکل (9-2) نمایش هارمونیکهای توالی مثبت و منفی

اگر اعوجاج سمت dc دقیقاً در فرکانس اصلی باشد مولفه توالی منفی در سمت AC یک DC واقعی است اما با سطوح متفاوت در سه فاز که معمولاً به عنوان عدم تعادل dc توسط مبدل محسوب می شود.

با این وجود مجموع اعوجاج dc در سه فاز صفر خواهد بود و این اعوجاج می توانند به صورت ریاضی در قالب توالی منفی نوشته شوند:

$$\omega = 2\pi F \Rightarrow DC \Rightarrow \omega = 0$$

$$I_a = |I| \cos(0.t + \delta + 0^\circ)$$

$$I_b = |I| \cos(0.t + \delta + 120^\circ)$$

$$I_c = |I| \cos(0.t + \delta + 240^\circ)$$

این اعوجاج می تواند بوسیله سه بردار ثابت هم طول در قالب توالی منفی مطابق شکل

2-10 ارائه شود. این نوع dc تولید شده توسط مبدل ترجیحا dc توالی منفی نامیده می شود.

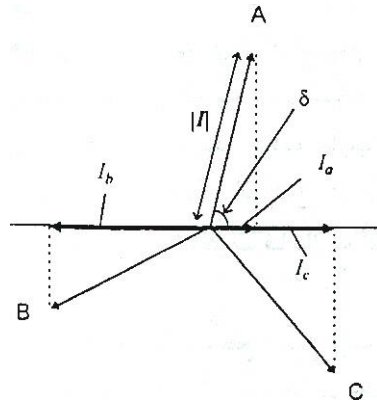
مفهوم dc توالی منفی در تحلیل ناپایداری اشباع هسته ترانسفورماتور مبدل با اهمیت

است زیرا اعوجاج مرتبط با این ناپایداری در سمت dc مبدل به فرکانس اصلی نزدیک است.

بنابراین در سمت ac مبدل اعوجاج هارمونیک قابل توجه مرتبط به این ناپایداری هارمونیک

دوم توالی مثبت و dc توالی منفی باشند DC منجر به اشباع هسته ترانسفورماتور می گردد که

احتمالا به یک ناپایداری منجر می شود.



شکل (2-10) ترکیب dc توالی منفی تولید شده توسط مبدل $Hvdc$

2-11 چگونگی ایجاد ناپایداری

اگر سطح کوچکی از اعوجاج ولتاژ هارمونیک دوم توالی مثبت در سمت ac مبدل موجود

باشد یک اعوجاج فرکانسی اصلی در سمت dc ظاهر خواهد شد. جریان فرکانس اصلی از

امپدانس سمت dc عبور کرده و سبب ایجاد یک جریان هارمونیک دوم توالی مثبت و یک dc توالی منفی در سمت ac می شود. dc توالی منفی شروع به اشباع ترانسفورماتور مبدل نموده و یک دسته از جریانهای هارمونیکی تولید می نماید که جریان هارمونیک دوم توالی مثبت را نیز در بر خواهد داشت همراه این جریان تاثیرات مضاعف اعوجاج ولتاژ هارمونیک دوم توالی مثبت خواهد بود و بدین ترتیب حلقه فیدبک کامل می گردد. پایداری سیستم توسط مشخصه های این حلقه فیدبک تعیین می گردد. اگر چه این تغییرات به اندازه ای آرام هستند که سبب اشباع هسته ترانسفورماتور می گردند ولی آنقدر نیز سریع می باشند که درصدی از آنها از ترانسفورماتور عبور کرده و داخل سیستم می شوند. هر چه تغییرات این dc توالی منفی سریعتر باشد مقدار بیشتری از آن ترانسفورماتور عبور خواهد کرد و میزان کمتری از آن ترانسفورماتور را اشباع می نماید (و بالعکس) مقداری که از ترانسفورماتورهای دیگر سیستم گردد اما بعید است که اشباع قابل توجهی ایجاد نماید و سهمی در افزایش مجدد ناپایداری داشته باشد. آغاز ناپایداری اشباع هسته بستگی زیاد به سطح اشباع ترانسفورماتور مبدل دارد. در این تحلیل ناپایداری بطور کامل به دو دسته تقسیم می شود که بوسیله شرایط اولیه مشخص می شوند. دسته اول طبیعت خود جوش دارد. بطوریکه تحت شرایط کار عادی بدون هیچ محرک خارجی تحریک می شود. مطالعه این ناپایداری نیاز به ارزیابی پاسخ ترانسفورماتور در سطوح اشباع پایین دارد. نوع دوم به

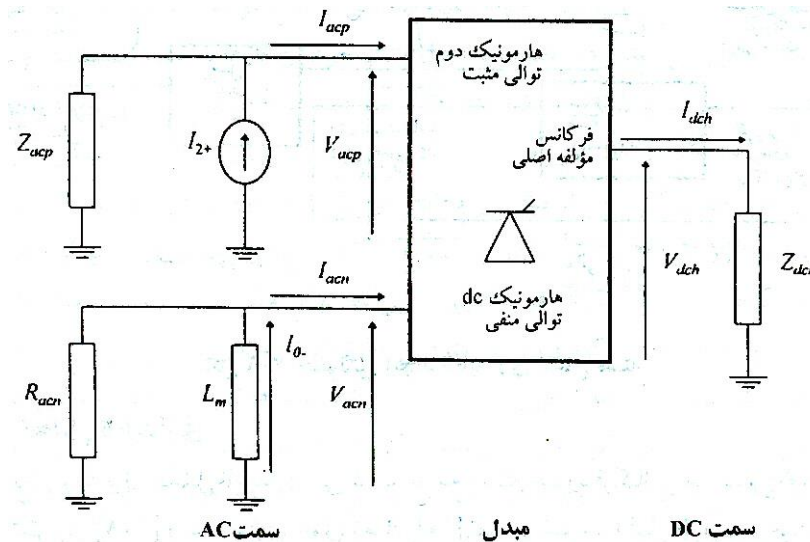
عنوان ناپایداری با شروع ضربه ای شناخت شده است که با اشباع زیاد ترانسفورماتور در حالت راه اندازی همراه می باشد .

برخی اغتشاشات ممکن است سبب ایجاد سطح بالایی از اشباع هسته ارتباط مبدل شوند و در نتیجه باعث توسعه ناپایداری اشباع هسته بعد از رفع اغتشاشات گردند برای این دسته از ناپایداری ها باید پاسخ ترانسفورماتور در سطوح بالای اشباع تعیین گردد .

12-2 تحلیل ناپایداری

روشهای بکار رفته برای تحلیل ناپایداری می توانند به سه دسته حوزه فرکانس مستقیم ، حوزه فرکانس تکراری و شبیه سازی حوزه زمان تقسیم شوند . بدلیل طبیعت پیچیده واکنش هارمونیک غیر مشخصه مبدل دو روش عددی آخر متداولتر از تقریب خطی می باشند . این برتری بعلت پیشرفت تکنولوژی کامپیوتر و امکان الگوریتم های عددی پیچیده در زمان می باشد . در هر حال روش مستقیم حوزه فرکانس امکان استنباط بیشتر از چگونگی واکنش را ارائه می نماید و منجر به پاسخهای کنترلی موثرتری می گردد . قسمت بعد روش مستقیم حوزه فرکانس

را معرفی می نماید که برای ساختن مشخصه های سیستم های $ac-dc$ که به این ناپایداری حساس هستند بکار گرفته شده است .



شکل (2-11) نمایش امپدانسهای AC , DC در روش سیستم حوزه فرکانس

سیستم $ac-dc$ به مدار معادل شکل 2-11 ساده می شود . این مدار شامل یک بلوک مبدل است که امپدانس های طرفهای ac , dc در فرکانسهای مربوطه را به یکدیگر متصل می نماید . در سمت ac جریان هارمونیک دوم توالی مثبت تولید شده توسط مبدل (I_{ac}) در امپدانس هارمونیک دوم سیستم ($Z_{ac p}$) جاری می شود در حالیکه جریان dc توالی منفی ($I_{ac n}$) در مدار موازی متشکل از اندوکتانس مغناطیسی ترانسفورماتور (L_m) و امپدانس سمت ac (در فرکانسهای پایین تغییرات $I_{ac n}$) جاری می گردد . با فرض اینکه امپدانس سمت ac حول فرکانس صفر هرگز تقریباً ثابت باشد می توان آنرا به مقاومت سیستم

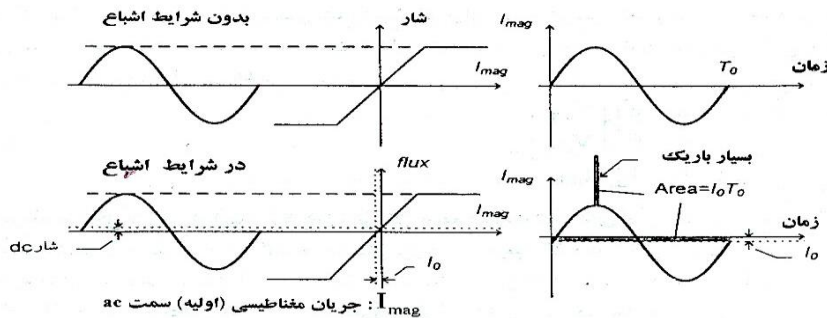
ac در فرکانس صفر هرتز ($Rac\ n$) ساده کرد . در سمت dc ، حضور اعوجاج ولتاژ فرکانس اصلی سبب جاری شدن اعوجاج جریان معادل امپدانس سمت dc می شود .

با توجه به اینکه ترانسفورماتور فقط در نیم سیکل مولفه اصلی اشباع می شود. اشباع ترانسفورماتور مربوط به این ناپایداری را می توان به عنوان اشباع نا متقارن در نظر گرفت . همانطور که در شکل 12-2 نشان داده شده است اگر چه اندوکتانس مغناطیسی Lm هنگام ورود و خروج از منطقه اشباع غیر خطی است ولی این حالت تنها در مدت زمان کوتاهی از هر سیکل که توسط پهنای پالس جریان مغناطیس مغشوش شده تعیین می شود اتفاق می افتد .

بنابراین عاقلانه است که Lm را به عنوان راکتانس مغناطیس اشباع نشده در نظر بگیریم که در واقع در بیشتر مواقع برابر همین مقدار می باشد . در بدترین حالت شار مغناطیسی ترانسفورماتور طوری در نظر گرفته می شود که به مرز قسمت اشباع نشده منحنی مغناطیسی برسد و مشخصه مغناطیسی I_{Max} / φ بی نهایت میل کند همانطور که در شکل 12-2 نشان داده شده است .

تجزیه و تحلیل های جبری نشان داده است که تحت این شرایط یک رابطه خطی یک به یک بین جریان هارمونیک دوم توالی مثبت نتیجه (I_{2+}) و سطح dc توالی منفی اشباع شده (I_{0-}) وجود دارد . با این وجود ترانسفورماتور های مبدل معمولاً برای سطح بالا تری طراحی می شوند و همیشه حاشیه اطمینان قابل ملاحظه ای قبل از رسیدن به منطقه اشباع وجود دارد . به علاوه

به نسبت واقعی I_{Max} / φ در ناحیه اشباع از حد بی نهایت فاصله دارد. بنابراین رابطه بین I_2 و I_0 به طور واقعی کمتر از یک خواهد بود و به مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور بستگی دارد.



شکل (2-12) مقایسه حالات مختلف اشباع

2-13 کنترل ناپایداری

با عملکرد سیستم دور از شرایط ناپایدار و یا به عبارت دیگر با فراهم نمودن میرایی کافی در فرکانسهای مورد نظر می توان از ناپایداری اشباع هسته ترانسفورماتور مبدل ممانعت نمود این عمل ممکن است شامل تغییر امپدانس سیستم از طریق تنظیم مجدد فیلتر، تنظیم پارامترهای کنترلر مبدل و یا تنظیم پارامترهای عملکرد حالت دائمی مبدل باشد این روشهای پیشگیری از ناپایداری را بطور کلی می توان به عنوان معیارهای غیر فعال در نظر گرفت از طرف دیگر معیارهای فعال می توانند هنگام شناسایی ناپایداری و به منظور پایدار سازی آن اعمال شوند این راه حل برای جلوگیری از ناپایداری اشباع هسته در طرحهای موجود استفاده شده است بطوری که از تعدادی حس گر برای تخمین سطح اشباع هسته استفاده می شود. به علت تفاوت فراوان در مشخصه های سیستم $Hvdc$ تشخیص بهترین روش برای جلوگیری از ناپایداری مشکل است

. بنابراین لازم است تحلیلهای مشکلی برای سیستم های مختلف و یا سیستم های مشابه تحت شرایط کار متفاوت انجام گیرد .

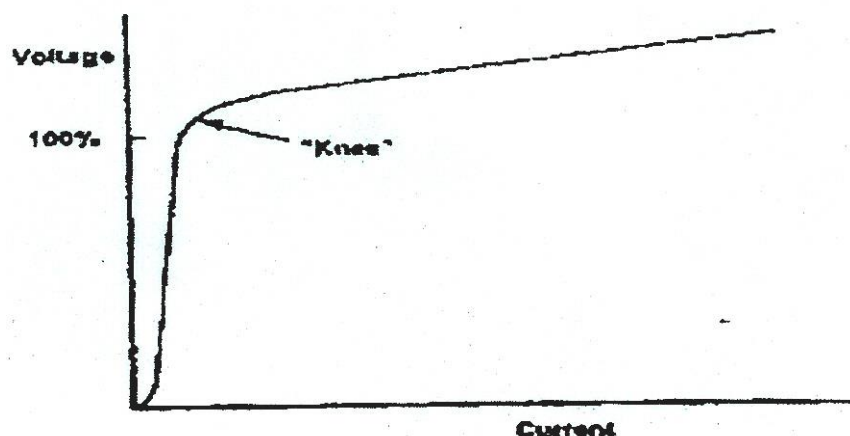
2-14 جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور

2-14-1 عناصر قابل اشباع

تجهیزات قرار گرفته در عناصر قابل اشباع شامل ترانسفورماتور ها و دیگر وسایل الکترونیکی با هسته فولادی شامل موتورها نیز می باشند . هارمونیک ها به دلیل مشخصه مغناطیس کنندگی غیر خطی آهن تولید می شود (رجوع شود به شکل 13-2) ترانسفورماتور های قدرت بنحوی طراحی می گردند که در ناحیه خطی ، مشخصه مغناطیس کنندگی کار نمایند .

حداکثر چگالی فوران یک ترانسفورماتور بر اساس بهینه کردن قیمت آهن ، تلفات بی باری ، نویز و دیگر فاکتورها انتخاب می گردد . بسیاری از شرکت های برق تولید کنندگان و فروشندگان ترانسفورماتور را برای تلفات بی باری و بارداری ترانسفورماتور جریمه می نمایند . در نتیجه تلاش سازندگان در این پایه خواهد بود که ترانسفورماتور را بنحوی طراحی نموده که کمترین هزینه را داشته باشد . جریمه بالا بر روی تلفات بی باری و نویز سبب می شود که از آهن

بیشتری در هسته استفاده شود و همچنین از جنسی استفاده می گردد که منحنی اشیا بالاتری داشته تا هارمونیک کمتر ایجاد کند .



شکل (2-13) مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور

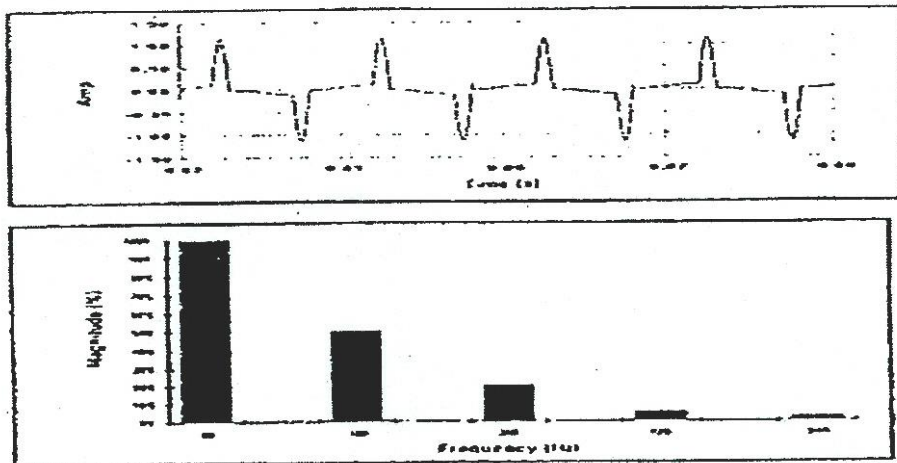
گرچه جریان تحریک ترانسفورماتور دارای هارمونیک زیادی در سطوح ولتاژ کاری خود می باشد (رجوع به شکل 2-14) ولی در عین حال مقدار این جریان حدود 1 درصد جریان بار کامل است و در نتیجه تاثیر ترانسفورماتورها مانند مبدل های الکترونیک قدرت و وسایل قوس زننده که تولید هارمونیک جریان حدود 20 درصد مقدار نامی می کنند نخواهد بود . ولی به هر حال بخصوص در سیستم های توزیع که دارای صدها ترانسفورماتور است اثر آن قابل توجه می باشد . باید توجه نمود که هارمونیک های مرتبه سوم در هنگام کم بودن بار بدلیل بالا رفتن ولتاژ به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابند . در این حالت جریان تحریک ترانسفورماتور در

مقابل جریان بار ترانسفورماتور قابل مقایسه می گردد. اعوجاج هارمونیک ولتاژ ناشی از جریان تحریک فقط در شرایط بار کم در سیستم به وجود می آید .

بعضی ترانسفورماتور ها عمدا در ناحیه اشباع کار می کنند . نمونه ای از این ترانسفورماتور ها ، تراز سفورماتور هایی هستند که برای تولید فرکانس 150 هرتز در کوره های القایی استفاده می شوند .

گرچه این امر عواقب کمی را به دنبال دارد . به هر حال شکل موج جریان بعضی موتورهای تک فاز با قدرت پایین به صورت مثلثی و دارای هارمونیک های مرتبه سوم بالایی می باشند . شکل موج نشان داده شده در شکل 14-2 جریان ترانسفورماتور تک فاز یا سه فاز ستاره زمین شده را نشان می دهد. به وضوح دیده می شود که جریان دارای هارمونیک سوم بالایی است . اتصال مثلث یا ستاره زمین نشده از عبور مولفه صفر (هارمونیک های مرتبه سوم)

جلوگیری می کنند . بنابراین جریان خط شامل این دسته هارمونیک ها نمی باشد . مگر اینکه به نحوی شرایط عدم تعادل در سیستم پدید آید .



شکل (14-2) جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور و محتوای هارمونیکی آن

2-14-2 وسایل فرومغناطیسی

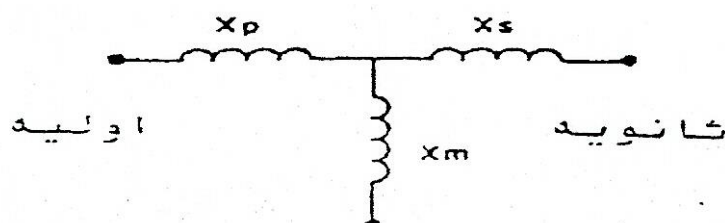
این دسته وسایلی هستند که بر اساس وجود یک سیم پیچ دور یک هسته آهنی ساخته می شوند . ترانسفورماتور ها و موتور ها عمومی ترین و سایل از این نوع هستند که در سیستم

قدرت وجود دارند . خاصیت مغناطیسی موتورها به خاطر فاصله هوایی خطی تراز خاصیت مغناطیسی ترانسفورماتور ها است .

شکل 2-15 مدار معادل T موتورها و ترانسفورماتور ها را نشان می دهد که معمولا اساس محاسبات و بررسی این تجهیزات است . امپدانسهای سری خطی هستند ولی امپدانس های موازی به طور فاحشی غیر خطی می باشند .

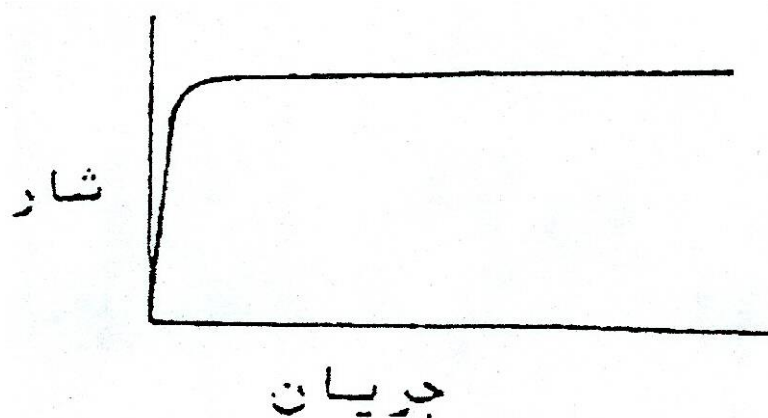
شکل 2-16 رابطه کلی شار مغناطیسی و جریان را برای یک ترانسفورماتور نشان میدهد . ولتاژ سینوسی در ترانسفورماتور ایجاد شار مغناطیسی سینوسی می نماید ولی موج مغناطیسی یا تحریک در شکل 2-17 نمایش داده شده است . این جریان مغناطیسی حاوی هارمونیک سوم

به مقدار حدود 50 درصد جریان فرکانس پایه می باشد . مقدار هارمونیک ها در جریان تحریک یک ترانسفورماتور در جدول 2-1 نشان داده شده است .



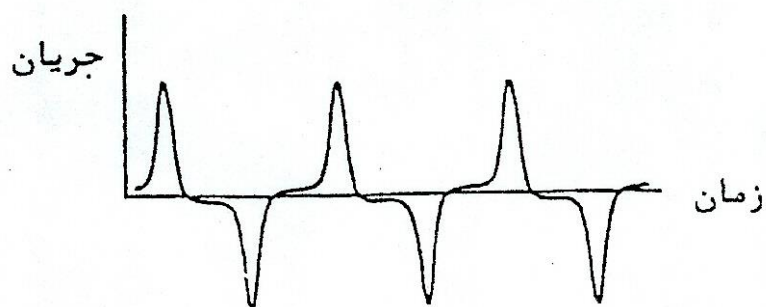
X_p امپدانس اولیه
 X_s امپدانس ثانویه
 X_m امپدانس مغناطیسی کننده

شکل (2-15) مدار معادل T برای یک ترانسفورماتور



شکل (2-16) منحنی شار مغناطیسی بر حسب جریان ترانسفورماتور (منحنی

اشباع)



شکل (17-2) نمونه شکل موج جریان مغناطیسی (تحریک) برای یک

ترانسفورماتور نمونه

جدول (1-2) مقادیر هارمونیک ها در جریان مغناطیسی یک ترانسفورماتور

مقدار هارمونیک به درصد	مرتبه ها هارمونیک
50	سوم
20	پنجم
5	هفتم
2/6	نهم

برای کاهش مقدار هارمونیک های با مضرب سه (هارمونیک های سوم ، نهم و ...) سیستم های سه فاز سیستم قدرت از نوع اتصال مثلث بسته استفاده می شود ولی در این حال هارمونیک های پنجم و هفتم کماکان در سیستم قدرت باقی می ماند .

خو شبختانه جریان تحریک فقط 5٪ تا 1 در صد میزان جریان نامی ترانسفورماتور ها می باشد در نتیجه هارمونیک های ایجاد شده توسط ترانسفورماتور ها معمولا مشکلی در سیستم قدرت به وجود نمی آورند مگر اینکه سیستم قدرت در یک هارمونیک مشخص به نوسان در آید ولی با توجه به تعداد زیاد ترانسفورماتور ها در سیستم قدرت و به خصوص اینکه تعداد زیادی از آنها بار کمی دارند هارمونیک تولیدی آنها در شبکه مقدار قابل توجه ای است .

مقدار جریان تحریک ترانسفورماتور و همچنین مقدار هارمونیک های آنها وابستگی زیادی به اندازه ولتاژ اعمالی دارد .

وقتی ولتاژ افزایش می یابد هسته مغناطیسی بیشتر از اشباع شده و جریان مغناطیسی افزایش فوق العاده پیدا می کند در نتیجه مقدار هارمونیک ها نیز افزایش می یابد . این مورد معمولا در زمان کم باری ترانسفورماتور ها و سیستم قدرت پیش می آید که بایستی به آن توجه شود .

فصل سوم

تأثیر هارمونیکهای جریان و ولتاژ بر روی ترانسفورماتورهای قدرت

1-3 مقدمه

در سالهای اخیر تجهیزات الکترونیکی بطور چشمگیری در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است. مهمترین آنها بشرح زیر است:

- مبدلها *invertors* که در تامین انرژی الکتریکی کامپیوترها و تجهیزات حساس کاربرد دارد.

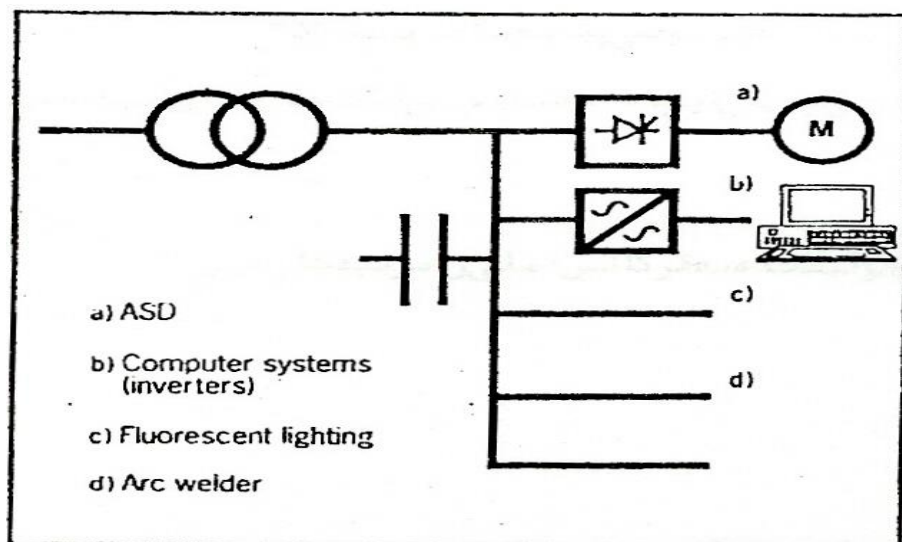
- محرکهای با سرعت قابل تنظیم

- تجهیزات متنوعی که ترستور در ساختمان آنها نقش اساسی دارد.

- کنترل کننده های فاز.

این تجهیزات ظرفیت نصب شده را تغییر نمی دهند اما در کنار ایفای نقش اصلی خود تولید هارمونیک های جریان نیز می نمایند که روی کیفیت قدرت تحویل شده به واحد صنعتی تاثیر می گذارد. تا چند سال قبل تجهیزات الکترونیکی بندرت در برق صنعتی یافت می شد اما

اکنون بیش از 50٪ ظرفیت نصب شده صنایع مختلف از طریق مدارهای الکترونیکی تغذیه می شود .

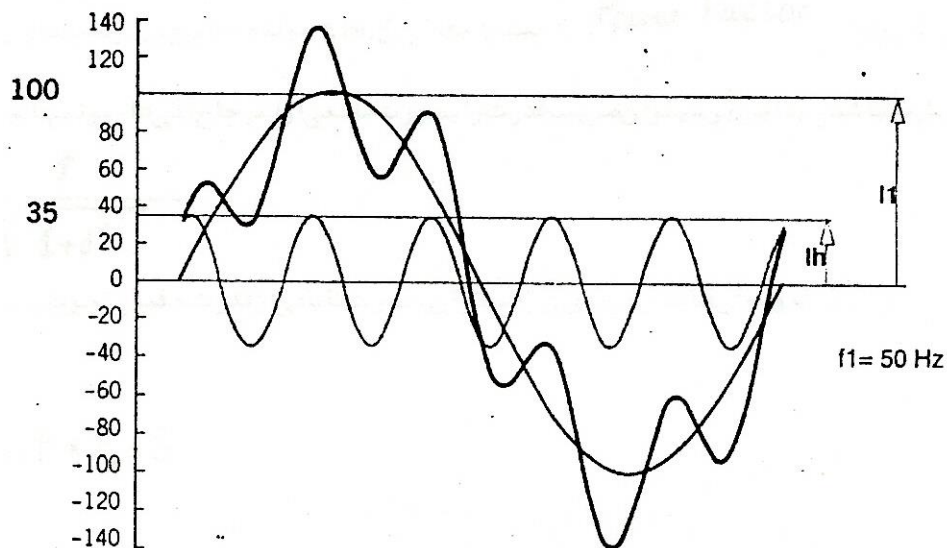


شکل 1-3 مولدهای هارمونی جریان

تجهیزات الکترونیکی همانند لامپهای فلئورسنت ، کوره های قوس الکتریکی و دستگاههای جوش بصورت مولد هارمونیکهای جریان روی شبکه تاثیر می گذارد . بنابراین باید این اثرات مطالعه و بررسی شود .

3-2 مروری بر تعاریف اساسی

تجهیزات نیمه هادی که در سیستم های قدرت کاربرد دارند رفتار امپدانس غیر خطی *Nonlinear Impedance* دارند و بدین جهت هارمونیکهای جریان تولید شده که روی موج اصلی جریان ($f=50\text{HZ}$) تحمیل می گردد .



شکل (2-3) هارمونیک پنجم با ضریب 35٪

شکل موج مولفه های هارمونیک جریان ایجاد شده سینوسی است هارمونیک پنجم که مضرب و فرکانس آنها مضربی از فرکانس اصلی $F=50^{Hz}$ می باشد .

مرتبه هارمونیک (Harmonic Order)

نسبت فرکانس هارمونیک تولید شده به فرکانس اصلی را مرتبه هارمونیک می نمایند .

$$r = \frac{f_n}{f_1}$$

ضریب هارمونیک (factor of harmonic)

ضریب هارمونیک یک مولفه بصورت نسبت درصد دامنه هارمونیک به دامنه موج اصلی بیان می شود .

$$dh = \frac{I_h}{I_1}$$

اعوجاج کلی هارمونیک ها (Total harmonic distortion)

در صورتی که چند هارمونیک وجود داشته باشد اعوجاج کلی عبارت است از نسبت *r.m.s* مولفه های هارمونیکهای جریان به *r.m.s* مولفه اصلی جریان در فرکانس 50HZ .

$$d = \frac{\sqrt{\sum I_h^2}}{I_1}$$

ضریب قدرت (Power factor)

ضریب قدرت "power factor" نسبت مقدار *r.m.s* جریان منتهی کل می باشد .

بنابراین می توان ضریب قدرت را بصورت تابعی از اعوجاج کلی هارمونیک ها بیان نمود .

$$F_d = \frac{I}{\sqrt{I + d^2}}$$

با توجه به روابط فوق توان ظاهری ورودی *S* را می توان بصورت تابعی از قدرت حقیقی

تحویل شده به بار *P_U* نوشت :

$$P_U = \cos \phi * F_d * S$$

3-3 اعوجاج هارمونیکها در نمونه هایی از شبکه

مثال 1 (شکل های (3-3) و (3-4))

- سیستم زیاد اعوجاج ندارد .

سیستم شامل تعدادی ترمینال کامپیوتری و نیز یکسو کننده هاست و هنگام اندازه گیری

فقط بخشی از آنها در مدار بوده اند .

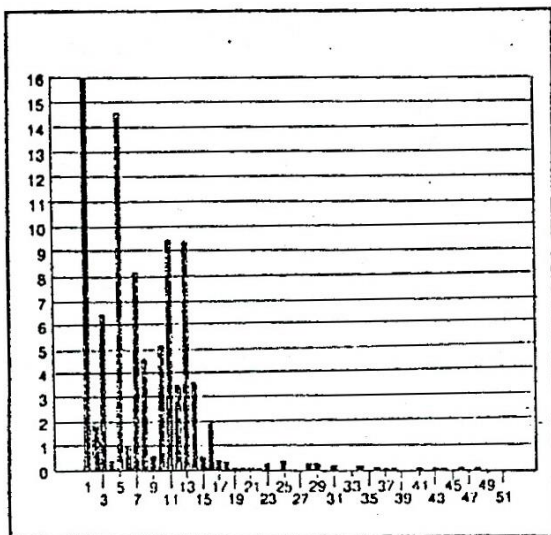
اعوجاج کلی هارمونیک 24٪

مثال 2) شکل های (3-5) و (3-6)

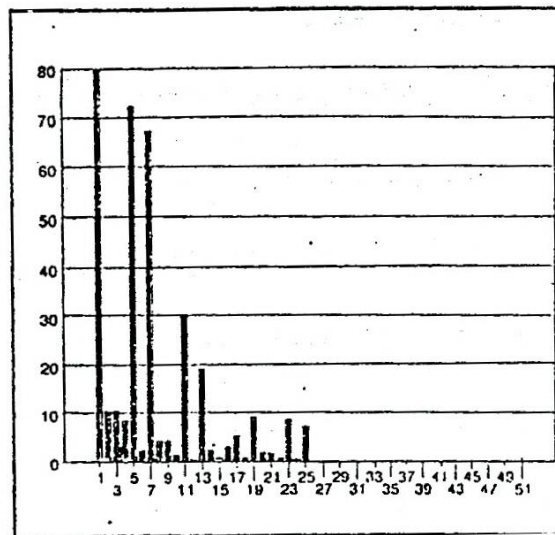
- سیستم اعوجاج زیادی دارد .

- سیستم بیشتر شامل اعوجاج نوع تریستوری می باشد .

- اعوجاج کلی هارمونیکها 158٪

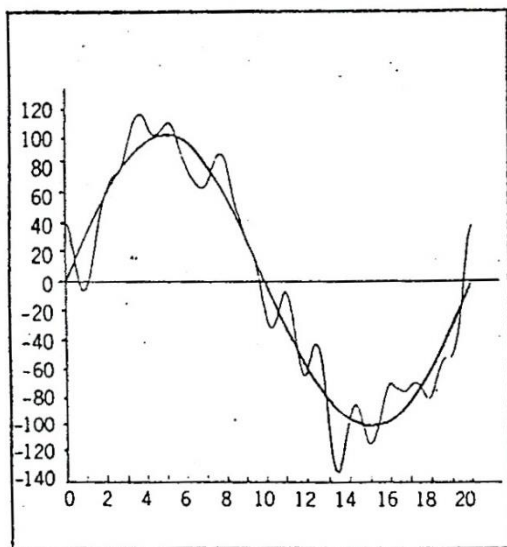


شکل (3-3)

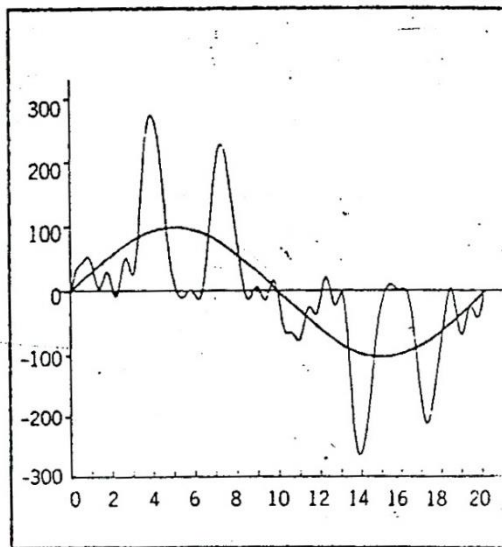


شکل (3-5)

((طیف هارمونیکها))



شکل (3-4)



شکل (3-6)

((جریان تحمیل شده روی جریان اصلی (فرکانس 50HZ)))

3-4 اثرات هارمونیکها

هارمونیک ها از سه راه روی سیستم قدرت تاثیر می گذارد .

الف) - افزایش $r.m.s$ جریان .

ب) - افزایش پیک جریان .

ج) - ایجاد فرکانسهای بالا .

هر کدام از سه عامل فوق اغتشاشات ویژه ای روی سیستم ایجاد می کند .

الف) مقدار $r.m.s$ جریان منتهی از مقداری که ظاهراً مورد نیاز سیستم است بزرگتر می شود و اثر گرمایی جریان منتهی ممکن است باعث افزایش بیش از حد مجاز درجه حرارت ترانسفورماتور شود و از طول عمر ترانسفورماتور بکاهد .

ب) چون مقدار پیک جریان منتهی افزایش یافته است بعضی از دستگاههای اندازه گیری دچار اختلال می شود و مقادیر غلط را نشان می دهد (مثلاً مدارهای مغناطیسی ممکن است بحالت اشباع برود) .

ج) چون مقدار امپدانس کابلها به فرکانس بستگی دارد بنابراین برای فرکانسهای 400HZ و بالاتر افزایش مقطع کابل جهت کاهش افت ولتاژ تاثیر چندانی ندارد (بدلیل آنکه مولفه $X_L = L\omega$ در رابطه :

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

بمراستب از R بزرگتر است بنابراین کاهش R از طریق افزایش سطح مقطع کابل تاثیری در

کاهش Z ندارد .) .

در بعضی از فرکانسهای هارمونیکهای جریان ممکن است رزونانس ایجاد شود و در نتیجه ولتاژ اضافی (Over Voltage) یا جریان اضافی (Over Current) خطرناک روی ترانس اعمال شود.

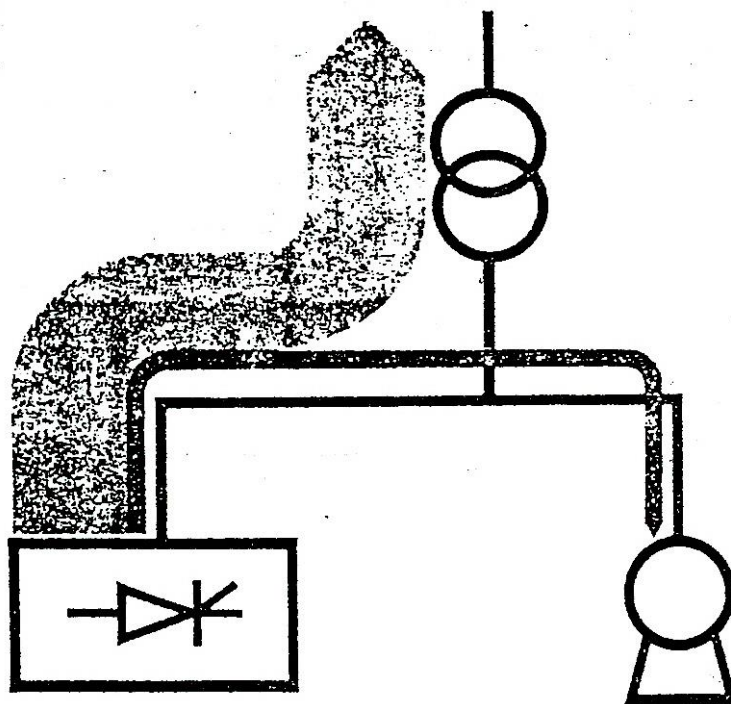
در سیستم های سه فاز متعادل جریان هادی نول صفر است اما این موضوع برای جریانهایی که فرکانس آنها مضارب 3 و فرکانس اصلی 50HZ است صحت ندارد. این جریانهایی از نوع جریان مولفه صفر Zero Sequence می باشند و بنابراین تماماً از هادی نول می گذرند و بدین جهت باید مقطع سیم نول را برای عبور چنین جریانی افزایش داد (فاز جریانهایی مولفه یکسان است بنابراین جمع آنها بر خلاف جمع مولفه های مثبت و یا منفی صفر نمی شود).

با توجه به آنچه بیان شد می توان تاثیر این اغتشاشات را روی ترانسفورماتور های قدرت دریافت .

3-5 نقش ترمیم در سیستم های قدرت با استفاده از اثر خازنها

3-5-1 توزیع هارمونیکهای جریان در یک سیستم قدرت بدون خازن

تقریباً تمام هارمونیک های جریان که در یک سیستم قدرت ایجاد می شود از ترانسفورماتور عبور می کند که همراه با ایجاد احتمالی گرمای بیش از حد مجاز در ترانسفورماتور می باشد در حالی که فقط جزء کوچکی از هارمونیکهای جریان از بار عبور کرده است .



شکل (3-7) مسیر هارمونیکهای جریان در سیستم بدون خازن

3-5-2 توزیع هارمونیکهای جریان در یک سیستم پس از نصب خازن

بدلیل تاثیر متقابلی که بین خازنها و ترانسفورماتور وجود دارد امکان تقویت قابل ملاحظه بعضی از هارمونیکها تشدید وجود دارد .

امپدانس هر ترانسفورماتور عمدتاً سلفی است و وقتی یک خازن بمدار اضافه میشود مدار رزونانس LC تشکیل می شود که فرکانس رزونانس آن از رابطه زیر بدست می آید :

$$r = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

یا

$$f = 50 \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

$$f = 50 * r$$

یا

که در این دو رابطه :

r = مرتبه هارمونیک جریان تقویت شده

S_{cc} = قدرت حقیقی اتصال کوتاه در باس بار بر حسب KVA

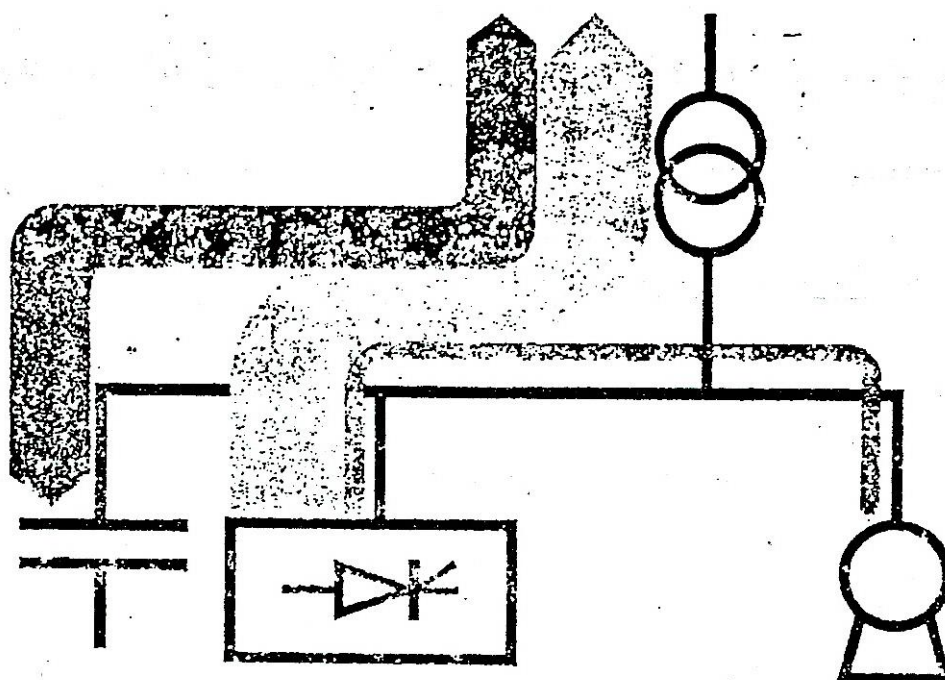
Q = قدرت راکتیو کل خازنهای که به باس بار وصل است بر حسب KVAR

در یک سیستم هر چه r مربوط به یک هارمونیک بزرگتر باشد هارمونیک بیشتر تقویت

می شود . میزان تقویت که بستگی مستقیم بقدرت مولد های هارمونیک دارد ممکن است تا 8

برابر یا بیشتر باشد . بنابراین در صورت ترمیم خازنی (اصلاح ضریب قدرت بار) لازم است

اندوکتانس یا فیلترهای مناسبی که فرکانسهای تقویت شده را فیلتر می نماید روی بار سیستم نصب شود .



شکل (3-8) مسیر هارمونی های جریان در سیستم پس از نصب خازن

3-6 رفتار ترانسفورماتور در اثر هارمونیکهای جریان

تجهیزات الکترونیکی که واسطه تامین انرژی مورد نیاز یک بار می باشد باید انرژی را از ترانسفورماتور دریافت کند تا هم بار را تغذیه نماید و هم تلفات داخلی خود را جبران کند و چون جریان الکتریکی مصرف داخلی این تجهیزات شکل موج سینوسی ندارد بنابراین این مقداری از

انرژی دریافت شده (از ترانسفورماتور) را بصورت هارمونیکهای جریان به شبکه ترانسفورماتور بر می گرداند .

مقدار این انرژی اضافی که به شبکه برگشت داده می شود به مرتبه مولفه های هارمونیک ها و ضرائب آنها بستگی دارد که با دانستن این دو پارامتر میزان انرژی برگشت شده را می توان محاسبه نمود .

اثر ژول (Joule effect)

کار درست بار متصل به ترانسفورماتور مستلزم تامین انرژی الکتریکی با ولتاژ مناسب توسط ترانسفورماتور است . برای آنکه ترانسفورماتور بتوان چنین نقشی را ایفا کند باید طراحی آن بر اساس قدرت اکتیو و راکتیو همزمانی بارهایی باشد که قرار است آنها را تغذیه نماید . اگر در محاسبه قدرت مورد نیاز مولفه های هارمونیکهای جریان در نظر گرفته نشود بنابراین $r.m.s$ جریانی که از ترانسفورماتور عبور می کند از $r.m.s$ جریان طراحی شده بیشتر خواهد بود که این موجب افزایش گرمای بیش از حد مجاز ترانسفورماتور می شود و کاهش طول عمر ترانسفورماتور را در پی دارد .

با توجه به مطالب بالا در طراحی تمام اجزا شبکه $l.v$ اعم از طرف فشار ضعیف ترانس و غیره باید ضریب قدرت f_d مربوط به هارمونیکهای جریان را اعمال نمود .

$$P_{joule} = RI_{r.m.s}^2$$

3-7 عیوب هارمونیکها در ترانسفورماتور

هارمونیک های جریان و هارمونیکهای نیروی محرکه الکتریکی اثرات متفاوتی به کار ترانسفورماتورها دارند . اکنون این نتایج نامطلوب در زیر شرح داده شده است .

1-7-3 هارمونیکهای جریان

1) اثر بر تلفات اهمی

وجود هارمونیکهای جریان گردشی در سیم پیچهای ترانسفورماتور افزایش تلفات، افزایش درجه حرارت و نتیجتاً کاهش راندمان را به همراه خواهد داشت.

2) تداخل الکترومغناطیسی با مدارهای مخابراتی

هارمونیک های جریان در اطراف هادی های خطوط انتقال، هارمونیک های شار با فرکانس های متناظر ایجاد می کنند. این هارمونیک های شار مغناطیسی نیروهای محرکه الکتریکی در مدارهای مخابراتی که به موازات خطوط انتقال کشیده شده اند القاء می کنند و در نتیجه تداخل ایجاد می شود برای مثال در یک ترانسفورماتور Yy با چهار سیم تغذیه (یا با اولیه و ثانویه دارای خنثی زمین شده) هارمونیک های مضرب سه جریان می توانند در خطوط جاری شوند و بنابراین این تداخل در مدارهای مخابراتی مجاور ایجاد می کنند. این تداخل القائی در حالتی که از سیم های کمکی استفاده می شود و ممکن است باعث عملکرد غلط وسائل حفاظتی گردد.

3) تاثیر بر روی تلفات هسته

موقعی که موج نیروی محرکه الکتریکی قله دار باشد موج شار به صورت سر پهن می گردد. بنابراین تلفات پس ماند که تقریباً متناسب با مجذور شار است کاهش می یابد. اما تلفات فوکو که متناسب با مجذور نیروی محرکه الکتریکی است افزایش می یابد. از آنجا که تلفات پس ماند بخش عمده ای از تلفات هسته را تشکیل می دهد در مجموع تلفات هسته کاهش می یابد. اما اگر موج نیروی محرکه الکتریکی سر پهن شود تلفات هسته افزایش می یابد. توجه کنید که

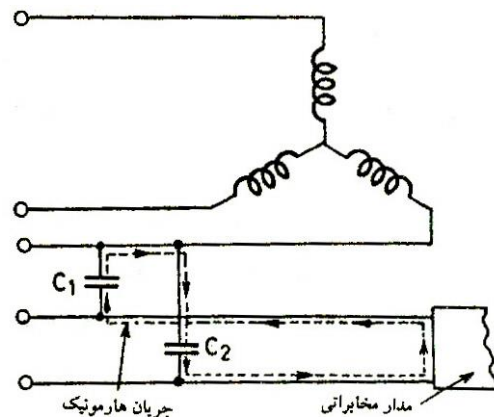
هنگامی که هارمونیک های سوم جریان در سیم پیچی ترانسفورماتور جاری نمی شوند موج شار سر پهن می گردد .

2-7-3 هارمونیک های ولتاژ

1) تنش ولتاژ روی عایق

در برخی اوقات ولتاژ سیم پیچی ها از مقادیر نامی شان تجاوز می کند . اگر این حالت اتفاق بیفتد عایق ترانسفورماتور متحمل تنش ولتاژ بالا شده که در نتیجه افزایش تلفات عایقی را به همراه دارد و عمر عایق کوتاه می شود و راندمان ترانسفورماتور کاهش می یابد . برای مثال در ترانسفورماتور های Yy (بدون نقطه خنثی) ولتاژهای فاز بیشتر از ولتاژهای نامی و حوالی

هارمونیک سوم می باشند و بنابراین در ترانسفورماتورهای Yy (بدون نقطه خنثی) عمر عایق کوتاه و کارآئی آن کاهش می یابد.



شکل (9-3) تداخل الکترو استاتیکی با مدارهای مخابراتی

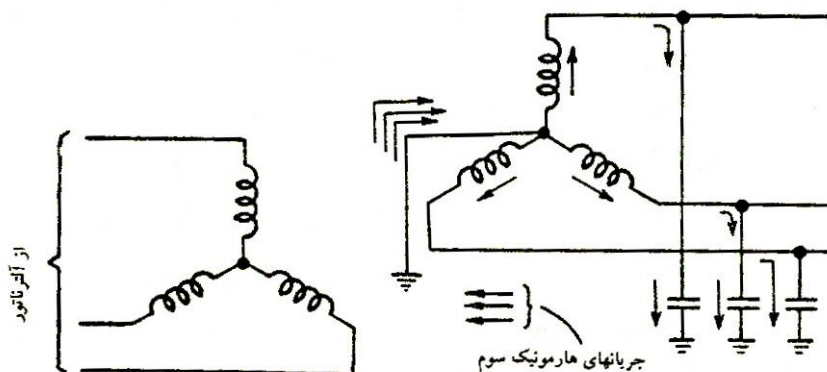
2) تداخل الکترو استاتیکی در مدارهای مخابراتی

همانطور که در شکل 9-3 نشان داده شده است ممکن است یک مدار مخابراتی که به موازات خطوط انتقال کشیده شده است بطور خازنی تزویج شود. ظرفیت $(C_1 + C_2)$ و اندوکتانس های مدار مخابراتی تشکیل یک مدار سری می دهند. اگر در فرکانس یکی از هارمونیک های موجود راکتانس خازنی $(C_1 + C_2)$ با راکتانس القائی برابر شود تشدید سری

اتفاق می افتد . در نتیجه هارمونیک های جریان جاری می شود و سبب تداخل در مدارهای مخابراتی می گردد .

3) ولتاژ تشدید بزرگ

اگر در یک ترانسفورماتور ستاره ستاره با ثانویه دارای نقطه خنثی زمین نشده به کابل یا خطوط انتقال بلند متصل گردد ممکن است پدیده تشدید رخ دهد . همان طور که در شکل 10-3 نشان داده شده است . اندوکتانس های ترانسفورماتور و ظرفیت خط یا کابل انتقال تشکیل یک مدار سری می دهند . اگر در فرکانس $3F$ راکتانس مغناطیس کننده ترانسفورماتور معادل راکتانس خازنی از خط به زمین شود تشدید سری اتفاق می افتد .



شکل (10-3): ولتاژ تشدید بزرگ در اثر هارمونیک سوم

بنابراین هارمونیک سوم نیروی محرکه الکتریکی ، بین خط و زمین ، جریان تحریک هارمونیک سوم ، ناشی از تشدید سری را به جریان می اندازد . این جریان تحریک هارمونیک سوم تقویت شده باعث تشکیل هارمونیک سوم ولتاژ بین خط و زمین می گردد . که به طرز خطرناکی افزایش می یابد . علاوه بر این جریانهای بزرگ هارمونیک سوم که به وسیله مدار

تشدید سری ایجاد می گردند تلفات اهمی را افزایش می دهند ولتاژهای بزرگ هارمونیک سوم تلفات عایقی و هسته را بالا می برد .

8-3 حذف هارمونیکها

هارمونیکها در ترانسفورماتور ها مطابق آنچه در زیرمی آید قابل حذف هستند .

1) چگالی شار کمتر

$$\varphi = (B \downarrow) * (A \uparrow) = cte$$

با استفاده از چگالی های شار کمتر می توان هارمونیک را کاهش داد . ولی این مسئله با افزایش سطح هسته به نتیجه می رسد (برای همان ولتاژ) که نتیجتا به هادی های بیشتری نیازاست و متعاقب آن هزینه افزایش می یابد . لذا طراحی و کار ترانسفورماتور در چگالی های شار هسته کمتر مقرون به صرفه نیست .

2) نوع اتصال

جریان ها ولتاژهای هارمونیک سوم در خطوط با استفاده از اتصالات ستاره و مثلث ترانسفورماتور ها قابل حذف است .

3) اتصال مثلث سیم پیچی اولیه یا ثانویه

هارمونیکهای ولتاژ بیش از هارمونیکهای جریان زیان آورند . هر کوششی برای تضعیف ولتاژهای هارمونیک مضرب 3 باید صورت گیرد . همانطور که قبلا نشان داده شده در مواقعی که یکی از سیم پیچهای ترانسفورماتور به صورت مثلث بسته می شود ولتاژهای هارمونیک مضرب 3 به طور قابل ملاحظه ای تضعیف می شوند . نظر به این نکته یکی از سیم پیچهای ترانسفورماتور

(خواه اولیه ، خواه ثانویه) به خاطر تضعیف ولتاژهای هارمونیک مضرب سه باید به صورت مثلث بسته شود .

4) استفاده از سیم پیچ سومین

اگر امکان نداشته باشد سیم پیچی اولیه یا ثانویه به صورت مثلث بسته شود . ترانسفورماتور سه فاز باید طوری طراحی شود که دارای یک سیم پیچی اضافی به نام سیم پیچ سوم باشد بیشتر موسوم است که سیم پیچی سوم به سیم پیچی ثالثیه اطلاق شود و به صورت مثلث بسته می شود . این مثلث بسته که به وسیله سیم پیچی ثالثیه تشکیل می گردد مسیری برای جریان های هارمونیک سوم مهیا می سازد . بنابراین شکل موج شار و نیروهای محرکه الکتریکی تقریباً سینوسی می گردد . توجه داشته باشید که سیم پیچی ثالثیه هیچ اثری بر مولفه اصلی ولتاژ ندارد . زیرا مجموع بردارهای سه نیروی محرکه الکتریکی در داخل مثلث بسته ثالثیه که دارای جابجائی 120° از یکدیگرند صفر است .

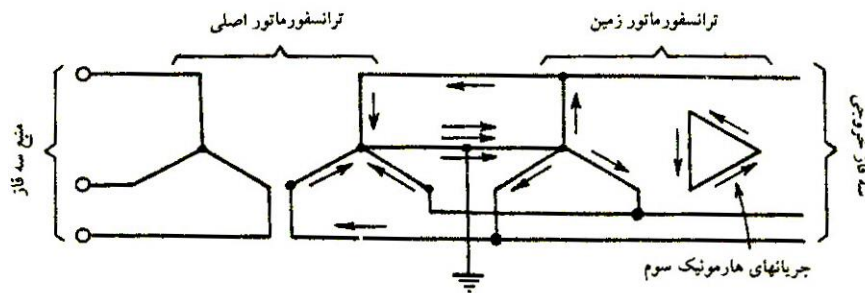
5) ترانسفورماتور ستاره – مثلث زمین

به گونه ای که از شکل 11-3 نشان داده شده است ولتاژهای هارمونیک سوم در یک ترانسفورماتور دو سیم پیچه با اتصال Yy با استفاده از یک ترانسفورماتور Yd زمین قابل حذف است .

مثلث بسته مسیری برای جریانهای هارمونیک سوم مهیا می کند در نتیجه شکل موج های شار و نیروی محرکه الکتریکی سینوسی باقی می ماند . پتانسیل نقطه ستاره تثبیت شده و نوسان نقطه خنثی از بین می رود برای یک ترانسفورماتور Yy ، ولتاژهای هارمونیک سوم با استفاده از یک منبع تغذیه 4 سیمه (یا یک ترانسفورماتور زمین به شرطی که نقطه خنثی آلترناتور زمین شده باشد) قابل تضعیف است . سیم برگشت مسیری برای هارمونیک سوم جریان

فراهم می کند . بنابراین شکل موج های شارونیروهای محرکه الکتریکی سینوسی باقی می مانند
. منتهی باید تداخل ایجاد شده توسط جریانهای هارمونیک مضرب سه در مدارهای مخابراتی

مجاور به دقت بررسی شود .



شکل (3-11) ترانسفورماتور ستاره مثلث زمین، برای حذف هارمونیکهای مضرب

3 ولتاژ

3-9 طراحی ترانسفورماتور برای سازگاری با هارمونیکها

الف - برای جلوگیری از افزایش غیر مجاز گرما در سیم پیچهای ترانسفورماتور (ناشی از هارمونیکهای جریان) دو راه حل وجود دارد .

1- هنگام طراحی ترانس ، ابعاد هسته و هادیها با توجه به هارمونیکهای جریان محاسبه شود .

شکل (3-12)

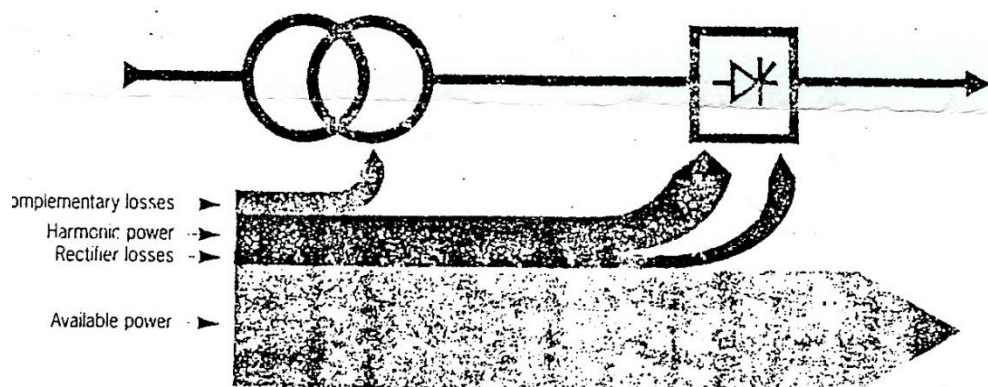
2- در صورتی که ترانسفورماتور زیر با راست در قدرت نامی آن تجدید نظر شود .

استاندارد UTE شماره C52-114 ضریب تصحیح قدرت K را برای تجدید نظر در قدرت

ترانسفورماتور پیشنهاد می کند بدین صورت که اگر دو پارامتر Th (ضریب هارمونیک بر حسب

درصد) و h (مرتبه هارمونیک) مشخص باشد K از رابطه زیر بدست می آید :

$$K = \left\{ 1 + 0.1 \left[\sum_{i=2}^n h_i^{1.6} (Th_i / 100)^2 \right] \right\}^{-0.5}$$



شکل (3-12) طراحی ترانسفورماتور برای سازگاری با هارمونیکها

مثال : یک ترانسفورماتور 1000KVA هارمونیکهای جریان زیر را تامین می نماید :

(هارمونیکها ناشی از یک رکتیفایر شش قطبی است)

$$H1: 9\% \quad H5: 25\%$$

$$H3: 8\% \quad H7: 14\%$$

ضریب K برای این ترانسفورماتور با استفاده از رابطه پیشنهادی UTE برابر 0.91 می

شود. بنابراین ترانسفورماتور بار 910 KVA را تغذیه کند .

مثال 2 : اگر باری که طیف فرکانسی جریان آن در شکل 6-3 نمایش داده شده است

توسط ترانسفورماتور فوق تغذیه شود ضریب قدرت به 0.51 تنزل می یابد یعنی ترانسفورماتور می تواند 510 KVA قدرت تحویل بار دهد .

ب - جلوگیری از تلفات اضافی هسته و یا اشباع آن که ناشی از هارمونیک های جریان

است مستلزم انتخاب با اندوکسیون مغناطیسی کم می باشد که در اینصورت قیمت ترانسفورماتور گرانتر خواهد شد .

10-3 چگونگی تعیین هارمونیکها

در صورتی که تجهیزات الکترونیکی شامل پل یکسو کننده و مدارات معمولی باشد آنالیز و

بررسی هارمونیک های جریان نسبتاً آسان است . ما در رگلاتورهای تریستوری (Thyristor

baesd Regulators) تعیین هارمونیک ها مشکل است زیرا بسته به شرایط کار (زاویه آتش ، اندوکتانس بار و ...) هارمونیک های تولید شده در طیف وسیعی تغییر می کند .

بعلاوه بعضی از سازندگان این تجهیزات فیلترهای مناسب در آنها نصب کرده اند . در صورتی که هارمونیک های جریان تولید شده را سازنده مشخص ننماید تنها راه اندازه گیری است .

11-3 اثرات هارمونیکهای جریان مرتبه بالا (*High orde Harmonics*) روی

ترانسفورماتور

پیش از این اثرات سوء هارمونیکهای جریان ، بخصوص گرمای بیش از حد سیم پیچهای ترانسفورماتور بیان شد . تحقیقات و بررسیهای اخیر روی حوادث مربوط به سوختن ترانسفورماتور به بروز عیب ناشی از ولتاژ اضافی تاکید دارد .

در این قسمت رفتار ترانسفورماتوری که بار هارمونیک جریان مرتبه بالا را تغذیه می نماید

بررسی می شود . مقصود از هارمونیک های مرتبه بالا ، فرکانسهای بیش از 2000hz (

هارمونیک مرتبه چهارم فرکانس اصلی) است . البته باید توجه کرد که اغلب آنالیزورها ،

هارمونیک های بالاتر از مرتبه 50 (2500HZ) را نمی تواند اندازه گیری نمایند .

12-3 مفاهیم تئوری**1-12-3 مدل سازی**

یک ترانز سفورماتور شامل تعدادی هادی است که دور هسته آهنی پیچیده شده است .
بنابراین امپدانس آن شامل اجزا زیر است :

- مقاومت (در هادیها)

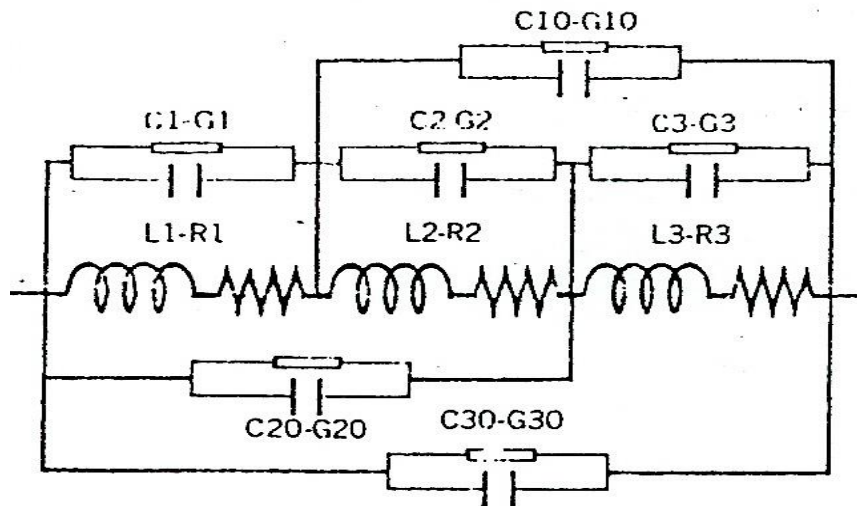
- اندوکتانس (سیم پیچها)

- خازن (بین حلقه های سیم پیچها با زمین)

در فرکانسهای پایین مدل سازی و محاسبات ترانسفورماتور ساده است زیرا اثر خازنی می توان صرف نظر نمود و امپدانس ترانس را بصورت مجموع مقاومت و سلف در نظر گرفت . اما این مدل برای فرکانسهای بالا قابل استفاده نیست زیرا رفتار ترانس سفورماتور در فرکانسهای بالا عوض می شود .

در فرکانسهای بالا اثر خازنی سریعاً قابل ملاحظه می شود و ترانسفورماتور را باید به چندین مدار کوچکتر (هر مدار کوچک را یک سلول نامند) تجزیه نمود هر کدام از این سلولها مقاومت .

سلف و خازن را شامل می شود و کل ترانسفورماتور بصورت ترکیبی از مدارهای رزونانس موازی در می آید .



شکل (3-13) مدار معادل ساده شده سیم پیچ ترانسفورماتور

تحلیل رفتار:

اگر مقاومتهای سلولها قابل صرفنظر باشد امپدانس هر سلول بازاء فرکانس رزونانس طبیعی

Natural Resonant Frequency سلول برابر ∞ می شود .

مقدار این فرکانس از رابطه زیر بدست می آید :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C_i}}$$

بنابراین اگر فرکانس f در مجموعه فرکانسهای هارمونیک های جریان وجود داشته باشد

سلول i ام در حالت رزونانس قرار می گیرد . بطور کلی امپدانس چنین سیستمی تابعی از

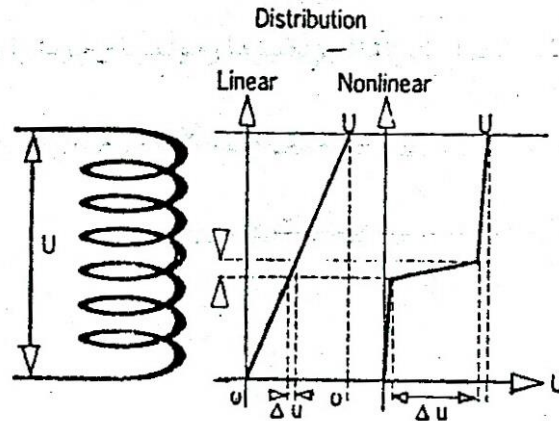
فرکانس است که تابع تبدیل آن تعدادی قطب دارد و در هر یک از قطبها امپدانس یکی از سلولها ماکزیمم است .

آثار:

عبور جریان معینی از یک سلول با امپدانس خیلی زیاد ($Z \rightarrow \infty$) باعث اعمال ولتاژ درسره‌های این سلول می شود ($V=Z.I$). در حالی که چون سایر سلولها امپدانس کمتری دارند عبور همین جریان ولتاژ بالایی روی آنها اعمال نمی کند . بنابراین توزیع ولتاژ در طول یک سیم پیچ یکنواخت نیست و تقریباً تمام ولتاژ روی بخشی از سیم پیچ که در حالت رزونانس است

توزیع می شود. این ولتاژ ممکن است بین دو دور پیایی سیم پیچ توزیع شود و از ولتاژ شکست بمراتب بزرگتر باشد.

توزیع غیر یکنواخت در طول یک سیم پیچ در شکل (3-14) نشان داده شده است.



شکل (3-14) توزیع ولتاژ در طول یک سیم پیچ

3-13 نتایج عملی

دیدیم که اگر از فرکانسهای رزونانس خیلی نزدیک یا مساوی یکی از فرکانسهای هارمونیکهای جریان باشد خطر شکست عایقی وجود دارد.

البته نشان داده شده است که خطر رزونانس تا فرکانس 2000HZ (هارمونیک چهارم) وجود ندارد اما تحقیقات اخیر گواه این مطلب است که از هارمونیک های جریان بالاتر از مرتبه پنجاهم و حتی صدم که ضریب هارمونیک زیر 10٪ دارند نیز نمی توان صرفنظر کرد.

بدین معنی که این هارمونیک ها هر چند دامنه اشان بسیار کوچک است ولی رزونانس

های خطرناک ایجاد می کنند. لازم بیادآوری است که خطر این هارمونیک ها افزایش گرما در

سیم پیچها یا اشباع هسته و یا تلفات ژولی ناشی از جریانهای سرگردان نیست بلکه ایجاد ولتاژ شکست عایقی روی سیم پیچ ترانسفورماتور می باشد .

نتایج جدید ترین تحقیقات که بر اساس آنالیز دقیق هارمونیک های جریان استوار بوده است و به رزونانس های خطر آفرین ناشی از هارمونیک های جریان با فرکانس بیش از 1MHZ در ترانسفورماتور های توزیع اشاره دارد البته برای شناختن کامل این پدیده لازم است کاوشهای دقیقتری صورت پذیرد .

14-3 راه حل ها

سازندگان ترانسفورماتور ها هیچ راه حل صریح استاندارد شده ای را برای حفاظت ترانسفورماتور در مقابل اثرات سوء هارمونیک ها پیشنهاد نمی نماید . الا افزایش قدرت عایقی سیم پیچها که این نیز نمی تواند بطور کامل ترانسفورماتور را حفاظت کند . بنابراین باید بر حسب مورد کاربرد مرتبه هارمونیکها (*Harmonic Orders*) و ضرائب آنها (*Harmonic Factors*) و مولفه های امپدانس منبع تغذیه و شبکه مورد مطالعه قرار بگیرد .

بهترین راه حفاظت این است که هارمونیک ها بلوکه شوند یعنی فیلترهایی (برمبنای محدوده فرکانسهای هارمونیک های جریان) در کنار تجهیزات مولد این هارمونیکها نصب شود .

15-3 نتیجه گیری نهایی

در این بررسی کوتاه هارمونیک های جریان و اثرات آنها روی ترانسفورماتور های قدرت مطالعه شد . اندازه گیریهای لازم برای حفاظت ترانسفورماتور در برابر اثرات سوء هارمونیک های

با فرکانس پایین صورت گرفته و راه حل‌های مناسب ارائه شده است. این راه حل‌ها هر چند قیمت ترانسفورماتور را افزایش می‌دهد اما خطر هارمونیک های با فرکانس بالا برطرف نشده است.

ضمناً کشف اثرات سوء هارمونیک های فرکانس بالا خیلی جدی تر از آن است که راه حل ساده ای برای طراحی و ساخت ترانسفورماتور های مقاوم در برابر خطرات آنها دست دهد.

در حال حاضر تولید انبوه ترانسفورماتور های توزیع خشک از نوع رزینی *Cast Resin Type Transformer* (با روش جدید سیم پیچی طرف *H.V*، توزیع ولتاژ روی سیم پیچ به راحتی برای فرکانسهای بالا تا حدی یکنواخت می شود) از احتمال خطر شکست عایقی کاسته است و باعث افزایش ضریب اطمینان شده است.

البته بهترین راه حل مراقبت یعنی فیلتر کردن همه اغتشاشات است تا از سوختن ترانسفورماتور بروز عیب روی شبکه توزیع انرژی جلوگیری شود.

ضمناً برای بهینه سازی اقتصادی می توان مقایسه ای بین هزینه های فیلتر کردن با هزینه های اعمال ضریب تصحیح *K* انجام داد.

فصل چهارم

بررسی عملکرد هارمونیکها در ترانسفورماتورهای قدرت

1-4 مقدمه

در ترانسفورماتورهای قدرت و توزیع جریان تحریک تنها درصد کوچکی (2 تا 6٪) از جریان نامی است . وجود هارمونیک در جریان تحریک ترانسفورماتورهای تک فاز هیچ اثر قابل ملاحظه ای در عملکرد آنها ندارد نظر به این مسئله معمولا وجود هارمونیک در ترانسفورماتورهای تک فاز نادیده گرفته می شود . اما پدیده هارمونیک در ترانسفورماتورهای سه فاز بسیار مهم است زیرا تحت شرایط معینی هارمونیک های جریان تحریک باعث عمل عمدی تجهیزات

حفاظتی می گردند و ممکن است باعث تداخل در مدارهای مخابراتی شوند. نظر به این مسئله مهندسین مخابرات و سیستم انرژی باید قادر به بررسی و حذف چنین شرایطی باشند.

2-4 پدیده هارمونیک در ترانسفورماتورهای سه فاز به عوامل زیر بستگی دارد

1) نوع اتصال سیم پیچ ترانسفورماتورهای سه فاز یعنی آیا سیم پیچ ترانسفورماتور به صورت ستاره مثلث و یا زیگزاگ متصل شده است.

2) و اینکه مدار مغناطیسی سه فاز، مجزا و یا به هم پیوسته است.

اثر این دو عامل در مرحله بعدی بررسی می شود.

مقدمتاً فرض می شود که ولتاژهای اعمالی متقارن هستند به طوری که این ولتاژها با

فرکانس اصلی دارای یک جابجایی 120° از یکدیگر می باشند از آنجائی که تنها هارمونیک های

فرد اجازه حضور در ولتاژ را دارند معادلات ولتاژ برای سه فاز به صورت زیر نوشته می شود.

$$V_A = V_{m1} \sin \omega t + V_{m3} \sin 3\omega t + V_{m5} \sin 5\omega t + \dots$$

$$V_B = V_{m1} \sin(\omega t - 120^\circ) + V_{m3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) + V_{m5} \sin 5(\omega t - 120^\circ) + \dots$$

$$V_C = V_{m1} \sin(\omega t - 240^\circ) + V_{m3} \sin 3(\omega t - 240^\circ) + V_{m5} \sin 5(\omega t - 240^\circ) + \dots$$

که V_{m1} و V_{m3} و ... مقادیر ماکزیمم مولفه اصلی هارمونیک سوم، ... اعمالی می باشند از

این معادلات مشاهده می شود که مولفه اصلی ولتاژ یک سیستم متعادل سه فاز با توالی فاز

ABC تشکیل می دهند که در شکل (a) 1-4 نشان داده شده است.

ولتاژهای هارمونیک سوم عبارتند از:

برای فاز A

$$V_{A3} = V_{m3} \sin 3\omega t$$

$$V_{B3} = V_{m3} \sin(3\omega t - 360^\circ) =$$

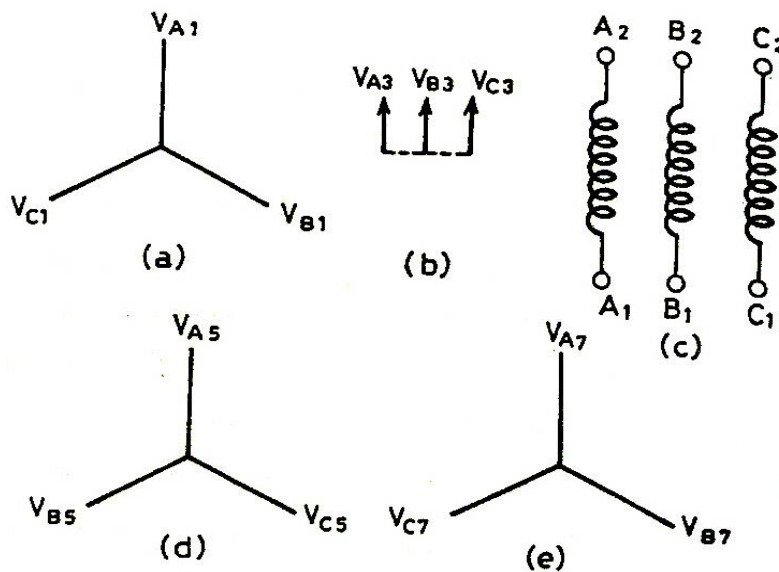
برای فاز B

$$V_{m3} \sin 3\omega t$$

$$V_{C3} = V_{m3} \sin(3\omega t - 720) = V_{C3} \sin 3\omega t$$

برای فاز C

$$m_3 \sin 3$$



شکل (4-1) نمودار برداری برای ولتاژهای مولفه اصلی، سوم، پنجم، هفتم

از بالا مشاهده می شود که ولتاژهای هامونیک سوم V_{A3} , V_{B3} , V_{C3} سه ولتاژ هم فاز

هستند. به گونه ای که در شکل (b) 4-1 نشان داده شده است. به عبارت دیگر ولتاژهای

هارمونیک مضرب سه در سه سیم پیچ شکل (c) 4-1 در لحظه معین از زمان یا از C_1, B_1, A_1

1 به C_2, B_2, A_2 و یا از C_2, B_2, A_2 به C_1, B_1, A_1 اثر می کند

ولتاژهای هارمونیک پنجم عبارتند از:

$$V_{A5} =$$

برای فاز A

$$V_{m5} \sin 5\omega t$$

برای فاز B

$$V_{B5} = V_{m5} \sin (5\omega t - 60^\circ) = V_{m5} \sin (5\omega t - 240^\circ)$$

$$V_{C5} = V_{m5} \sin (5\omega t - 220^\circ) = V_{m5} \sin (5\omega t -$$

برای فاز C

120)

ولتاژهای هارمونیک پنجم دارای جابه جایی 120 درجه از یکدیگرند. اما بر خلاف توالی

فاز (مولفه) اصلی ABC دارای توالی فاز ACB می باشند. بگونه ای که در شکل (d) 4-1

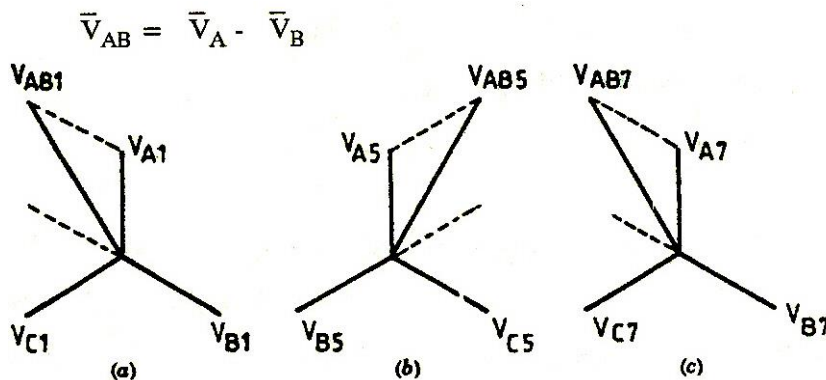
نشان داده شده است. می توان نشان داد که ولتاژهای هارمونیک هفتم دارای توالی فاز ABC

هستند شکل (e) 4-1. حال باید اثر اتصال سیم پیچ سه فاز یک ترانسفورماتور به صورت ستاره یا مثلث مورد بررسی قرار می گیرد .

اتصال ستاره

برای بدست آوردن اتصال ستاره ، ترمینال های با پلاریته یکسان به یکدیگر متصل می شوند ولتاژ خط V_{AB} از رابطه زیر به دست می آید .

$$\bar{V}_{AB} = \bar{V}_A - \bar{V}_B$$



شکل (4-2) نمودار برداری ولتاژهای اصلی ، هارمونیک و پنجم و هفتم

برای موج اصلی و هارمونیک پنجم و هفتم ولتاژهای خط V_{AB1} , V_{AB5} , V_{AB7} در شکل

4-2 نشان داده شده است . برای نیروی محرکه الکتریکی emf هارمونیک سوم ولتاژ خط

عبارت است از

$$v_{AB3} = v_{A3} - v_{B3} = V_{m3} \sin 3\omega t - V_{m3} \sin 3\omega t = 0$$

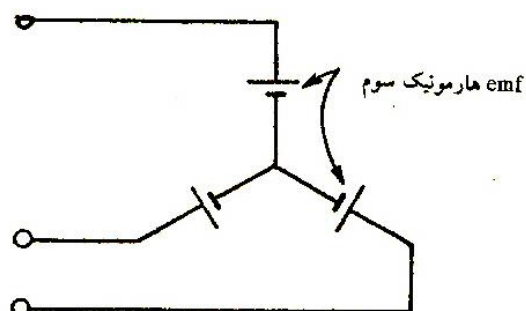
بنابراین برای اتصال ستاره : حتی اگر ولتاژهای فاز شامل هارمونیک های مضرب سه

باشد ولتاژهای خط تهی از این هارمونیک های مضرب سه می باشند در هر لحظه نیروهای

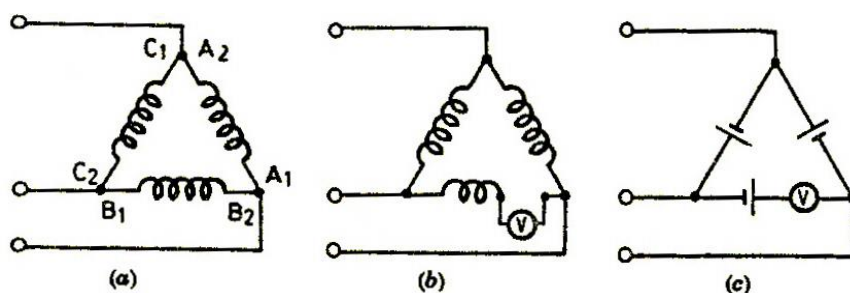
محرکه الکتریکی در هر فاز قابل نمایش به صورت شکل 4-3 می باشند . از خط به نقطه ستاره

افت ولتاژ وجود دارد و از نقطه ستاره به خط نیز یک خیز ولتاژ معادل وجود دارد و لذا ولتاژهای

هارمونیک مضرب سه بین هر دو ترمینال خط صفر هستند . این با نتیجه که قبلا بدست آمده توافق و سازگاری دارد .



شکل (3-4) نمایش نیروی محرکه الکتریکی emf برای ستاره در هر لحظه



شکل (4-4) مربوط به هارمونیک های سوم در اتصال مثلث

اتصال مثلث

برای بدست آوردن اتصال مثلث مطابق شکل (a) 4-4 ترمینال ها با پلاریته متفاوت به یکدیگر متصل می شوند . حال اگر سه سیم پیچی در اتصال مثلث در یک نقطه باز شود و یک

ولت متر مطابق شکل (b) 4-4 متصل شود قرائت ولت متر صفر خواهد بود به شرطی که تنها نیروی محرکه الکتریکی موج اصلی و هارمونیک پنجم و هفتم در سه فاز موجود باشند .

به هر حال نیروی محرکه الکتریکی هارمونیک مضرب سه به طور همزمان از C_1, B_1, A_1 و C_2, B_2, A_2 و یا C_2, B_2, A_2 به C_1, B_1, A_1 اثر می کنند . در هر لحظه نیروهای محرکه الکتریکی مضرب سه به یک روش ساده مطابق شکل (c) 4-4 قابل نمایش هستند .

اگر بزرگی نیروهای محرکه الکتریکی مضرب سه در هر فاز E_3, E_9 و ... باشند آنگاه قرائت ولتمتر در شکل (b) 4-4 معادل خواهد بود با :

$$V_3 = 3\sqrt{E_3^2 + E_9^2 + \dots}$$

اگر ولتمتر برداشته شود و به جای آن یک آمپرتر قرار بگیرد آنگاه هارمونیک سوم جریان I_3 (با صرف نظر کردن از I_9, \dots) اندازه گیری می شود . باید توجه داشت که هارمونیک سوم جریان نمی تواند در خطوط یک ترانسفورماتور با اتصال مثلث موجود باشد . برای اثبات این مطلب فرض کنید جریانهای هارمونیک سوم در سه فاز یک ترانسفورماتور با اتصال مثلث به صورت زیر باشد .

$$iA_3 = I_{m3} \sin 3\omega t$$

$$iB_3 = I_{m3} \sin 3(\omega t + 120) = I_{m3} \sin 3\omega t$$

$$iC_3 = I_{m3} \sin 3(\omega t + 240) = I_{m3} \sin 3\omega t$$

برای یک اتصال مثلث جریان خط از رابطه زیر بدست می آید .

$$i_{AB3} = i_{A3} - i_{B3} = I_{m3} \sin 3\omega t - I_{m3} \sin 3\omega t = 0$$

از رابطه بالا نتیجه می شود که هارمونیک سوم جریان مغناطیس کننده می تواند در مثلث بسته جریان پیدا کند اما در خط قادر به جاری شدن نیست . همچنین باید توجه داشت که

نیروی محرکه الکتریکی مضرب سه حتی در سیم پیچی های اتصال مثلث بین خطوط ظاهر نمی گردند. این ناشی از این حقیقت است که نیروهای محرکه الکتریکی کاملاً با افت های امپدانس مربوط ناشی از هارمونیک جریان مضرب سه به حالت تعادل و موازنه می رسند برای مثال اگر هر فاز شامل E_3 هارمونیک سوم نیروی محرکه الکتریکی و Z_3 امپدانس هارمونیک سوم باشد آنگاه جریان ناشی از هارمونیک سوم جریان I_3 در مثلث بسته به صورت زیر است.

$$I_3 = \frac{3E_3}{3Z_3} = \frac{E_3}{Z_3}$$

$$E_3 = I_3 Z_3$$

یا

از مطالب بالا مشخص است که در هر فاز هارمونیک سوم نیروی محرکه الکتریکی E_3 کاملاً با افت پتانسیل هارمونیک سوم $I_3 Z_3$ برابر است همین نتیجه برای سایر هارمونیک های مضرب سه صحیح است. یک ترانسفورماتور در مدارهای سه فاز (بر اساس نوع هسته) می تواند ترانسفورماتور سه فاز نوع هسته ای و یا ترانسفورماتور سه فاز نوع پوسته ای (زرهی) و یا یک بانک

از سه ترانسفورماتور تک فاز می باشد. از نقطه نظر مدارهای مغناطیسی ترانسفورماتورهای سه فاز به دو جز (فرعی) تقسیم می گردد:

- 1) ترانسفورماتورهای سه برداری که برای سه فاز مدارهای مغناطیسی مستقل و مجزا دارند.
- 2) ترانسفورماتورهای سه برداری که برای سه فاز مدارهای مغناطیسی پیوسته و توزیع شده دارند.

حال انواع اتصالات سه فاز، همراه با جزئیات شرح داده می شود.

3-4 اتصال ستاره (بدون اتصال زمین)

در این قسمت ترانسفورماتورها با مدارهای مغناطیسی پیوسته و مجزا بحث میشود.

1-3-4 ترانسفورماتورهای با مدار مغناطیسی مجزا و مستقل:

ترانسفورماتور سه فاز نوع پیوسته ای و بانک ترانسفورماتورهای تک فاز با مدار مغناطیسی مجزا حتی اگر ولتاژهای هارمونیک سوم در فازهای ترانسفورماتورهای سه فاز با اتصال ستاره وجود داشته باشند اما این ولتاژها قادر به حضور در بین خطها نیستند.

جریانهای هارمونیک سوم در سه فاز به صورت زیر نوشته می شود.

$$i_{A3} = I_{m3} \sin 3\omega t$$

$$i_{B3} = I_{m3} \sin 3\omega t$$

$$i_{C3} = I_{m3} \sin 3\omega t$$

این جریانها به طرف نقطه ستاره حرکت می کنند و یا از آن دور می شوند و لذا هیچ هارمونیک سوم جریان نمی تواند در ترانسفورماتورهای اتصال ستاره و همچنین در خطوط اتصالی

به ترمینالهای آنها، جاری شود. این حقیقت به صورتی که در زیر می آید قابل توضیح است. در یک اتصالی ستاره با نقطه خنثی، جریان سیم خنثی (سیم برگشت) عبارت است از:

$$i_n = i_{A3} + i_{B3} + i_{C3} = 3I_{m3} \sin 3\omega t$$

و اگر نقطه خنثی در نظر نگرفته باشیم جریان i_n باید صفر باشد

$$i_n = 3I_{m3} \sin 3\omega t = 0$$

$$I_{m3} = 0$$

از آنجا که اتصال ستاره بدون نقطه خنثی مطالعه شود لذا جریانهای هارمونیک سوم قادر به جاری شدن در خطوط و فازهای یک ترانسفورماتور اتصال ستاره نیستند در نتیجه جریان مغناطیس کننده بی باری که از طرف منبع تغذیه جاری می گردد تهی از هارمونیک سوم می گردد. البته هارمونیک های مرتبه بالا ممکن است وجود داشته باشند بنابراین برای اتصال ستاره جریان مغناطیس کننده (با صرف نظر کردن از هارمونیک های مرتبه بالاتر) یک موج سینوسی است. ولی به منظور داشتن شکل موج سینوسی برای جریان مغناطیس کننده لازم است هسته دارای موج سر صاف باشد که این شکل موج دارای هارمونیک ϕ_3 سوم شار می باشد از آنجا که ترانسفورماتورهای تحت بررسی مدارهای مغناطیس مجزا دارند مقاومت مغناطیسی مسیر شار ϕ_3 بسیار پایین است. بنابراین ϕ_3 در صد بزرگی از شار ϕ_1 صلی را تشکیل می دهد و نتیجتاً شکل موج شار به مقدار زیادی از شکل موج سینوسی منحرف می گردد. در بعضی حالات و بسته به اشباع شار ϕ_3 در حدود 20٪ یا بیشتر شار ϕ_1 است. 20٪ ϕ_3 در فرکانس 3f افزایش نیروی محرکه الکتریکی القائی با ضرب سه معادل با 60٪ نیروی محرکه الکتریکی اصلی را به همراه دارد. لذا به عنوان نتیجه نیروهای محرکه الکتریکی القا در هر فاز در سیم پیچ ثانویه و اولیه قله دارند که دارای مقادیر ماکزیمم بزرگی معادل با 160٪ دامنه مولفه اصلی نیروی محرکه الکتریکی می باشند. این ولتاژهای ماکزیمم ممکن است به عایق بندی آسیب برساند یک

ترانسفورماتور با اتصال Yy و مدارهای مغناطیسی مجزا در سیستم های فشار قوی $H.V$ مورد استفاده قرار نمی گیرند. از آنجا که خط ها تهی از ولتاژها هارمونیک سوم هستند لذا ولتاژهای مربوط سینوسی باقی خواهند ماند.

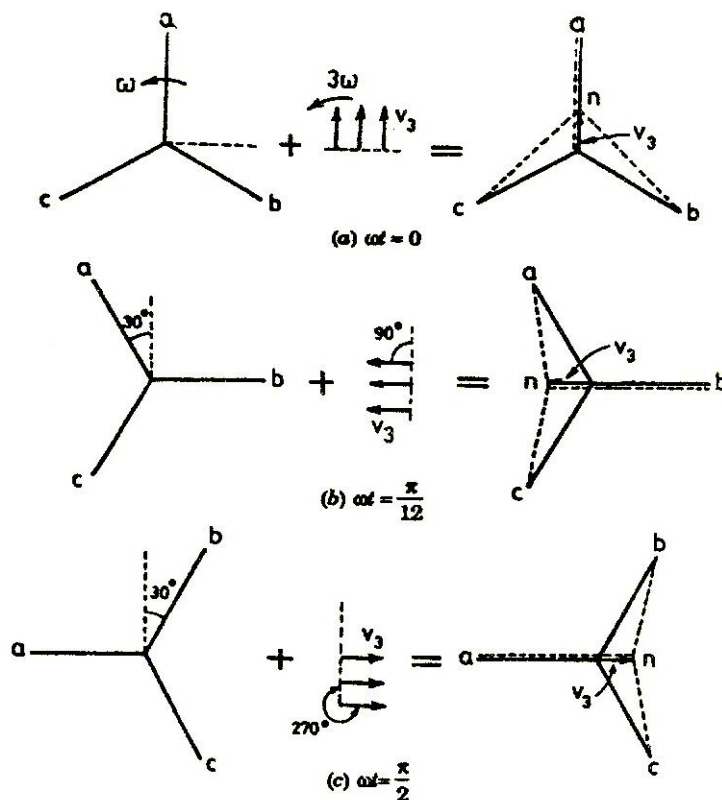
به این نکته باید توجه شود هنگامی که $\phi_1 = 20\% \phi_3$ است. مقدار موثر ولتاژ برداری

منتجه $\sqrt{1^2 + 0/6^2} = 1/17$ برابر مولفه اصلی ولتاژ فاز است. بنابراین رابطه (ولتاژ

فاز $\sqrt{3}$ (ولتاژ خط) برای ترانسفورماتورهای با اتصال Yy بدون خنثی مصداق خوبی پیدا نمی کند.

اثر دیگر نیروهای محرکه الکتریکی هارمونیک سوم نوسان نقطه خنثی در $3f$ می باشد به گونه ای که در شکل 4-5 نشان داده شده است. در این شکل مولفه اصلی هارمونیک سوم نیروهای محرکه الکتریکی در سه لحظه متفاوت زمانی باهم ترکیب شده اند.

در نمودارهای برداری این شکل 4-5 هارمونیک سوم ولتاژ v_3 در تمام ولتاژهای سه فاز هم فاز است منتجه ولتاژهای هارمونیک سوم و اصلی در سمت راست شکل 4-5



شکل 4-5 مربوط به نوسان نقطه خنثی

در $wt = 0$, $wt = \frac{\pi}{12}$, $wt = \frac{\pi}{2}$ به صورت نقطه چین نشان داده شده است. توجه

داشته باشید که بردار v_3 با سرعت $3w \text{ rad/sec}$ می چرخد در حالیکه بردارهای اصلی با

سرعت $w \text{ rad/sec}$ می چرخند این بدان معنی است که بردارهای اصلی به اندازه 30 درجه

می چرخند در حالیکه بردار v_3 طبق شکل (b) 4-5 به اندازه $3 \times 30 = 90$ می چرخد از آنجا که

ترانسفورماتور به یک شبکه سه فاز قدرت بزرگ متصل می گردد راس های a, b, c بردارهای

اصلی نمی تواند تغییر موقعیت بدهد. و از اینرو این نقطه خنثی در فرکانس $3f$ تغییر محل می

دهد به گونه ای که در شکل 4-5 نشان داده شده است. اثر این نوسان نقطه خنثی فراهم آوردن

بی ثباتی نوسان در ولتاژ خط به نقطه ستاره است . بررسی شکل 4-5 مطابق زیر مسئله را روشن می سازد .

بسته به موقعیت نسبی v_1 و v_2 ماکزیمم ولتاژ روی سیم پیچی فاز برابر با $v_{m1} + v_{m2}$ می باشد . برای مثال شکل (b) 4-5 مقدار ماکزیمم ولتاژ روی سیم پیچی b اتفاق می افتد .

در لحظه ای دیگر شکل (c) 4-5 مقدار ماکزیمم ولتاژ روی سیم پیچی A اتفاق می افتد . این مسئله نشان می دهد که سیم پیچی ها متحمل اضافه ولتاژ شده که ممکن است به عایق آسیب برساند .

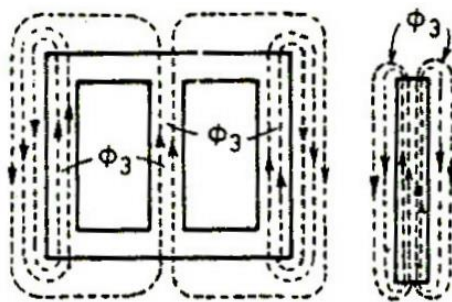
(2) ولتاژهای خط بدون تاثیر باقی می ماند . اما ولتاژ خط به خنثی برابر است با $\sqrt{V_1^2 + V_3^2}$ این مطلب نشان می دهد که برای ترانسفورماتور Yy با مدارهای مغناطیسی مجزا و فاقد نقطه خنثی ولتاژ خط معادل با $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ فاز نیست .

2-3-4 ترانسفورماتورها با مدار مغناطیسی پیوسته یا تزویج شده

ترانسفورماتورهای سه فاز نوع هسته ای که بیشترین کاربرد را دارد عبارت است از یک ترانسفورماتور سه ستونی و مدارهای مغناطیسی سه فاز تزویج شده . به عبارت دیگر شار مغناطیسی یک فاز روی یک ستون مسیر مغناطیسی خود را از طریق دو ستون دیگر می بندد شارهای مغناطیسی مضرب سه همانند نیروهای محرکه الکتریکی یا جریان ها در هر سه ستون به طرف بالا یا به طرف پایین می باشند . در هر لحظه شارهای مضرب سه دارای دامنه یکسانی

هستند . به علاوه شار مضرب سه در یک ستون از طریق دو ستون دیگر نمی توان برگردد . زیرا با شارهای مضرب سه به همان دامنه مورد مخالفت قرار می گیرد .

نتیجتا تنها یک مسیر برگشت برای شار مضرب سه از طریق هوا و یا روغن اطراف هسته وجود دارد . به گونه ای که در شکل 4-6 نشان داده شده است .



شکل (4-6) مسیر شارهای هارمونیک سوم (مضرب سه) در ترانسفورماتور سه

فاز نوع هسته ای .

از آنجا که هوا مقاومت مغناطیسی بالائی دارد شارهای مضرب سه و بنابراین نیروهای محرکه الکتریکی هارمونیک سوم فاز، کوچک هستند در این حال ولتاژهای فاز تنها شامل دامنه کوچکی از نیروهای محرکه الکتریکی هارمونیک سوم می باشد و نظر به این مسئله در غیاب هارمونیک های مرتبه بالاتر ولتاژهای فاز به امواج سینوسی میل می کند . شارهای مضرب سه تمایل دارند که مسیر برگشت خود را از طریق مسیرهای موجود، با حداقل مقاومت مغناطیسی تغییر تانک فولادی کانال ها ، پیچ ها و ... ببندند . بنابراین شار با فرکانس مضرب سه میزان تلفات فوکو را در این بخش ها بالا می برند که به موجب آن کاهش قابل ملاحظه راندمان را به همراه خواهد داشت . نظر به اینکه از هر کوششی برای تضعیف شارهای هارمونیک سوم نباید دریغ ورزید یکی

از روشها استفاده از یک حلقه کامل حول ترانسفورماتور می باشد . جریان های القایی با فرکانس مضرب سه در این حلقه با هارمونیک سوم شار به طور وسیع مخالفت می کند .

اگر تانک به جای فولاد از آلومینیوم ساخته شده مقاومت مغناطیسی مسیر شار مضرب سه بوسیله تانک آلومینیوم بسیار بیشتر از مقاومت مغناطیسی مسیر تانک فولادی است و در نتیجه شار مضرب سه کوچک است . و بنابراین جریان های القایی مضرب سه در تانک آلومینیومی به مراتب کمتر است این جریان های فرکانس مضرب سه در تانک های آلومینیومی به طور موثرتری از حلقه هادی دو تانک فولادی به هارمونیک سوم شار مخالفت می کند بنابراین یک ترانسفورماتور با تانک آلومینیومی کارایی به مراتب بالاتر و در نتیجه افزایش دمای کمتری در مقایسه با ترانسفورماتور با حلقه هادی در تانک فولادی به همراه خواهد داشت به این دلیل است که تانک های آلومینیومی برای ترانسفورماتور های سه فاز نوع هسته ای امروزه بیشتر توجه است .

4-4 اتصال Yy ستاره با نقطه خنثی

اگر آلترناتور اولیه ترانسفورماتور Yy دارای نقاط خنثی زمین شده باشند آنوقت جریان های هارمونیک سوم می توانند از طریق زمین برگردند . بنابراین هارمونیک سوم جریان مغناطیس کننده در خطوط و در سیم پیچی های فاز ترانسفورماتور وجود دارند در نتیجه شار و بنابراین ولتاژهای فاز موج سینوسی هستند . ولتاژهای خط $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ فاز است و نقطه خنثی پایدار می شود .

علاوه بر این هارمونیک سوم جریان عبور کننده از طریق زمین معادل سه برابر جریان مغناطیس کننده در خطوط یا سیم پیچی فاز می باشد . اشکال عمده جریان های هارمونیک

سوم که در خطوط جاری می شود آن است که تداخل قابل ملاحظه ای در مدارهای مخابراتی که به موازات خطوط انتقال کشیده شده اند ایجاد می شود .

4-5 اتصال Dy

ولتاژ تغذیه سینوسی اعمال شده به ترانسفورماتور DY جریان مغناطیس کننده سینوسی در خطوط ایجاد می کند . این جریان مغناطیس کننده سینوسی در سیم پیچهای ترانسفورماتور جریان می یابد که سبب صاف شدن قله ، موج شار می گردد (موج سر صاف) که شار مذکور شامل هارمونیک سوم شدیدی نیز هست . هارمونیک های مضرب سه شار هارمونیک های نیروی محرکه الکتریکی با مضارب سه در جهت یکسان در تمام سه فاز سیم پیچی مثلث القاء می کنند . این نیروهای محرکه الکتریکی هارمونیک سوم جریان در مثلث بسته برقرار می سازند . بنابراین نتیجه گرفته می شود که جریان سیم پیچی ترانسفورماتور شامل جریان مغناطیس کننده سینوسی به انضمام یک هارمونیک سوم جریان مغناطیس کننده می باشد . که موج جریان منتجه شبیه به آن چیزی است که در شکل توضیح داده شده است . اما حضور هارمونیک سوم جریان در جریان مغناطیس کننده به موج سینوسی نیاز دارد . لذا نیروهای محرکه الکتریکی القایی هم در سیم پیچی اولیه و هم در سیم پیچی ثانویه تقریباً سینوسی است . هارمونیک های مرتبه بالاتر دقیقاً همانند مولفه اصلی رفتار می کنند . بنابراین با اتصال DY ، جریان مغناطیس کننده در خطوط شامل مولفه اصلی (در صورت وجود باضافه هارمونیک پنجم و هفتم) می

باشد . ولی جریان مغناطیس کننده در مثلث بسته شامل مولفه اصلی ،مولفه های هارمونیک سوم (در صورت وجود باضافه هارمونیک پنجم و هفتم) می باشد .

باید به این مسئله توجه شود که هارمونیک سوم جریان مغناطیس کننده در مثلث بسته تنها به خاطر هارمونیک سوم نیروی محرکه الکتریکی جاری می گردد و بنابراین حضور هارمونیک سوم شار ϕ^3 ضروری است .

این شار ϕ^3 با سیم پیچی ثانویه نیز پیوند دارد . در نتیجه مقدار خیلی کوچک هارمونیک سوم نیروی محرکه (1٪ ولتاژ نامی یا حتی کمتر) در فازهای ثانویه القاء می کند . اما همانند قبل ولتاژهای خط خروجی تهی از هارمونیک های سوم نیروی محرکه الکتریکی می باشند .

بنابراین ولتاژ خط طرف ثانویه تقریباً $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ فاز است و همچنین نقطه ستاره ثانویه در پتانسیل زمین تثبیت می گردد . بحث بالا برای ترانسفورماتور هائی که دارای مدارهای مغناطیسی مجزا هستند می باشد

6-4 اتصال yd

از آنجا که هارمونیک سوم جریان قادر به جاری شدن در سیم پیچی های اتصال ستاره یک ترانسفورماتور نیست جریان مغناطیس کننده منتهی از منبع تغذیه ، موج سینوسی خواهد بود (در حالتی که هارمونیک های مرتبه بالاتر حضور نداشته باشد) اما جریان مغناطیس کننده سینوسی نیاز به یک موج شار سر پهن شامل هارمونیک سوم شدید دارد . این هارمونیک سوم شار نیروهای محرکه الکتریکی هارمونیک سوم در سیم پیچی اولیه و هم در سیم پیچی ثانویه القاء می کند . از آنجا که ثانویه به صورت مثلث بسته شده است نیروهای محرکه الکتریکی هارمونیک سوم باعث بوجود آمدن هارمونیک سوم جریان می شوند . با توجه به این مسئله

جریان مغناطیس کننده در مثلث ثانویه شامل مولفه اصلی و تنها هارمونیک سوم می باشد ترکیب جریان فرکانس اصلی در اولیه و هارمونیک سوم جریان در ثانویه مثلث بسته شار منته را در هسته بوجود می آورد . اما قبلا اثبات شد که اگر جریان مغناطیس کننده شامل موج اصلی هارمونیک سوم جریان باشد شار باید موج سینوسی باشد . بنابراین در اتصال Yd شار مغناطیسی پیوندی هم در سیم پیچی اولیه و هم در سیم پیچی ثانویه موج سینوسی است . که نتیجتا نیروهای محرکه الکتریکی فاز ثانویه و اولیه تهی از نیروهای محرکه الکتریکی هارمونیک سوم می باشد و تقریبا شکل موج های مربوط سینوسی است .

همانطور که در اتصال DY توضیح داده شد ولتاژ فاز اولیه در اتصال $y d$ ممکن است شامل هارمونیک سوم نیروی محرکه الکتریکی به اندازه 1% ولتاژ نامی یا حتی کمتر باشد . البته ولتاژهای خط ثانویه و اولیه تهی از هارمونیک های سوم ولتاژ هستند

7-4 اتصال Dd

برای اتصال Dd جریان خط سینوسی است ولی هارمونیک سوم جریان مغناطیسی کننده قادر به جاری شدن در مثلث اولیه و ثانویه به گونه ای که در بالا برای اتصالات Yd و Dy شرح داده شد هستند به این مطلب باید توجه داشت که هارمونیک سوم شار مورد نیاز به وسیله تاثیر جریان گردشی در مثلث های اولیه و ثانویه برقرار می گردد . بنابراین هارمونیک سوم جریان مغناطیس کننده در مثلث اولیه اتصال Dd می باید کمتر از هارمونیک سوم جریان مغناطیس شده در مثلث اولیه اتصال Dy باشد جریان های مغناطیس کننده هارمونیک سوم بین مثلث های اولیه و ثانویه به نسبت عکس امپدانس های ناشی فرکانس مضرب سه تقسیم می شوند . این در حالی است که هارمونیک سوم جریان و امپدانس ها به یک طرف ارجاع داده شده اند از

آنجا که هارمونیک سوم شار بسیار کوچک است شار منتهی در اتصال Dd تقریباً موج سینوسی

است. 4-8 هارمونیک های سوم در عمل ترانسفورماتور سه فاز

مولفه های هارمونیک های سوم جریان تحریک ممکن است اثرات نامطلوبی در عمل

ترانسفورماتور ها داشته باشد و بخصوص این اثر در اتصال $Y-Y$ مشهورتر است

شکل 4-7 یک اتصال $Y-Y$ را نمایش می دهد. فرض شده است که برای عمل سه

ترانز سفورماتور یک فاز مشابه بدون بار تو سط یک مدار سه فاز تغذیه گردد. مجموع جریانهای

لحظه ای اولیه به انضمام جریان سیم خنثی (صفر) باید مساوی صفر شود یعنی:

$$I_A + I_B + I_C + I_N = 0$$

مجموع تمام مولفه های هارمونیک ها بجز هارمونیک سوم و مضارب آن در I_C, I_B, I_A

مساوی صفر است و جریان خط خنثی I_N بنابراین فقط باید شامل هارمونیک های سوم و

مضارب آن باشد. به علاوه چون هارمونیک های هر فاز به اندازه $120h$ باهم اختلاف فاز دارند (

h درجه هارمونیک است) جریان خط خنثی باید مساوی سه برابر هارمونیک سوم جریان و

مضارب آن باشد. مضارب هارمونیک سوم دارای دامنه نسبتاً کوتاه می باشد و جریان I_N ممکن

است به عنوان جریانی که دارای فرکانس سه برابر فرکانس اصلی است مورد توجه قرار گیرد. اگر

اتصال خنثی بین اولیه های ترانز سفورماتور و مولد باز باشد $I_N = 0$ است و در نتیجه هارمونیک

سوم باید صفر باشد. از این رو فوران نمی تواند شکل سینوسی داشته باشد زیرا در غیر اینصورت

شامل هارمونیک سوم خواهد بود که به نوبه خود ولتاژ هارمونیک سوم را در ولتاژ خط بزمین

تولید خواهد کرد. اگر ترانسفورماتور ها کاملا مشابه باشند هیچ هارمونیک سوم در ولتاژ فاز به فاز وجود نخواهد داشت.

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$$

ولتاژهای هارمونیک سوم در سه ترانسفورماتور مساوی و هم فازند یعنی:

$$V_{AN3} = V_{BN3} = V_{CN3}$$

$$V_{AB3} = V_{AN3} - V_{BN3} = 0$$

زمانی که اولیه های ترانسفورماتور های مشابه بصورت Δ بهم وصل شده باشند هیچ

هارمونیک سوم در جریانهای خط I_A, I_B, I_C وجود نخواهد داشت زیرا جریانهای خط مساوی

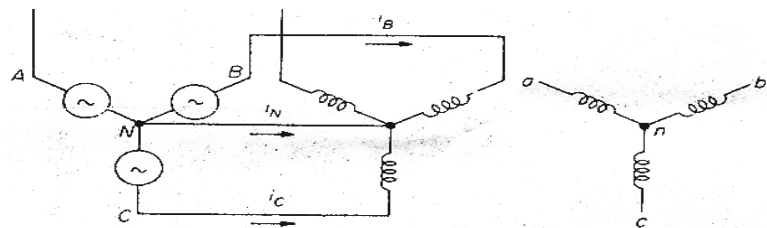
اختلاف جریانهائی است که در سیم پیچهای Δ شکل در گردش است.

و از آنجا که جریانهای لحظه ای:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_{AB3} = I_{BC3} = I_{CA3}$$

$$I_{A3} = I_{AB3} - I_{CA3} = 0$$



شکل (7-4) ترانسفورماتور با اتصال Y-Y بدون بار

و از آنجا که جریان هارمونیک سوم در Δ دور می زند اگر که خط خنثی اولیه از نقطه خنثی صفر در اتصال $\Delta - Y$ قطع شود جریان هارمونیک سوم در ثانویه که بطور Δ وصل شده است دور می زند و از این رو فوران سینوسی است . چنین نتیجه می شود که اگر ولتاژهای هارمونیک سوم وجود داشته باشند در هر سه فاز با یکدیگر همفاز بوده و در مجموع آن سه برابر مقدارش در یک فاز خواهد بود . چون مجموع ولتاژهای خطی Δ ثانویه باید مساوی صفر باشد (طبق قانون ولتاژ کیرشوف) بنابراین هیچ ولتاژ هارمونیک سوم در ثانویه ترانسفورماتور وجود ندارد .

اتصال Δ علاوه بر اینکه تعادل ولتاژها را تضمین می نماید مسیری برای هارمونیک سوم تهیه می کند این سبب آن است که اتصال $\Delta - Y$ و یا $Y - \Delta$ بیشتر مورد توجه قرار گیرد . هنگامی که تبدیل $Y - Y$ مورد نیاز باشد معمولا یک سیم پیچ بنام سیم پیچ سوم بصورت Δ بکاربرده می شود .

9-4 سیم پیچ ثالثیه یا پایدار کننده

در بعضی مواقع ترانسفورماتور ها علاوه بر سیم پیچ اولیه و ثانویه با سیم پیچی سومی به نام سیم پیچی پایدار کننده یا ثالثیه ساخته می شوند . بنابراین ترانسفورماتور هائی که به سیم پیچ ثالثیه مجهز می گردند به ترانسفورماتور های سه سیم پیچه معروفند سیم پیچ ثالثیه معمولا

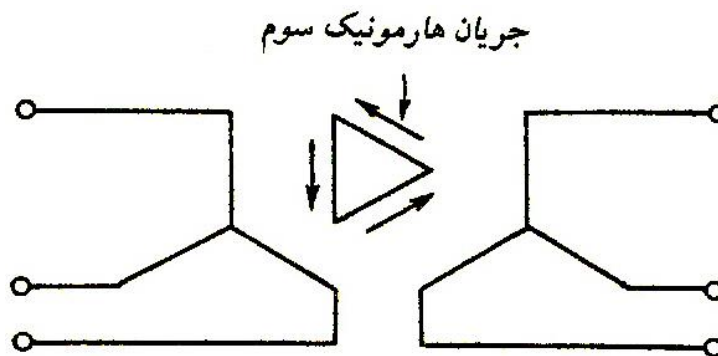
به صورت مثلث بسته می شود و بیشتر اوقات ترمینال های آن داخل تانک باقی می ماند در چنین حالتی وظائف گوناگون آن در ترانسفورماتور ستاره ستاره به شرح زیر است :

(1) به گونه ای که در شکل 4-8 نشان داده شده است هارمونیک سوم جریان مغناطیس کننده می تواند در سیم پیچی ثالثیه که به صورت مثلث بسته شده است جریان پیدا کند . در نتیجه شکل موج های شار هسته و نیروهای محرکه الکتریکی تقریباً سینوسی باقی می مانند .

(2) بارهای تک فاز بین خط و خنثی به و سیله تراز سفورماتورهای Yy که دارای سیم پیچ ثالثیه اند قابل تغذیه است .

(3) سیم پیچ ثالثیه به خاطر حفاظت وسایل در برابر خطای خط به زمین به جریان موثر خط اجازه می دهد که از خود عبور کند .

در مواردی که ترمینال سیم پیچی ثالثیه ، خارج از تانک قرار بگیرد این سیم پیچی برای تغذیه سایر تجهیزات از قبیل : تجهیزات تصحیح ضریب توان ، تغذیه مصرف داخلی نیروگاههای یا پست ها به کار می رود .



شکل (4-8) سیم پیچ سومین (ثالثیه)

4-10 تلفات هارمونیک در ترانسفورماتور

1-10-4 تلفات جریان گردابی در هادی های ترانسفورماتور

افزایش $r.m.s$ جریان تنها باعث افزایش گرما در ترانسفورماتور نیست. اگر قطعه فلزی در یک میدان مغناطیسی قرار بگیرد جریان گردابی در آن تولید می شود که تمایل به صفر نمودن میدان القاء شده در فلز دارد. نیروی الکتروموتوری که این جریان گردابی را ایجاد می کند از رابطه زیر به دست می آید:

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

به بیان دیگر این ولتاژ بستگی به میزان تغییرات فلو فرکانس آن دارد.

برای جریان نیز می توان چنین رابطه ای نوشت بنابراین تلفات ژولی (گرمایی) ناشی از این جریان با مجذور فرکانس رابطه مستقیم دارد. پس اگر یک هارمونیک جریان دارای فرکانس بالایی باشد هر چند دامنه هارمونیک کوتاه فرض شود (ضریب هارمونیک کوچک است) تلفات گرمایی قابل ملاحظه خواهد بود.

2-10-4 تلفات هیسترزیس هسته

ترانسفورماتور های استاندارد با اندوکسیون مغناطیسی نسبتاً زیاد کار می کنند که معمولاً بیش از $1/7$ تسلا می باشد این مقدار در نزدیکی نقطه زانوی منحنی اشباع که حدود 2 تسلا است قرار دارد. پیش از اینکه بیان شود که از صورت وجود هارمونیک ها جریان $r.m.s$ منتهی بزرگتر می شود. این مطلب برای پیک جریان نیز صادق است و در نتیجه افزایش پیک فلو مغناطیسی منتهی نیز افزایش می یابد به بیان دیگر هارمونیک های جریان تولید هارمونیک های فلو مغناطیسی می کند با فلو ناشی از جریان اصلی جمع شده و سبب افزایش پیک فلو منتهی می شود. این بنوبه خود سطح منحنی هیسترزیس را افزایش می دهد. نهایتاً منجر

به / شباع هسته و اعوجاج بیشتر در جریان الکتریکی می شود میزان تاثیر هارمونیک بر تلفات هسته بستگی به نقطه / شباع هسته ترانس دارد . به بیان دیگر تلفات در لایه های هسته ترانس بستگی به مقدار و شکل موج چگالی شار مغناطیسی دارد از طرفی میزان اندوکسیون بستگی به

ولتاژ خواهد داشت. اکنون به منظور بررسی دقیق تر موضوع یک موج ولتاژ غیر سینوسی را در نظر می گیریم.

$$V(\omega t) = \sum \sqrt{2} V_H \sin(h\omega t + \phi_h)$$

با فرض $V(0) = V(\pi) = 0$ موج سینوسی پایه موج فوق بصورت زیر در می آید:

$$V(\omega t) = \sqrt{2} V_R \sin(\omega t)$$

در صورتیکه تلفات هیستریز ترانسفورماتور ناشی از یک سینوسی فوق ارتباط P_R بنامیم آنگاه نسبت بین تلفات در حضور هارمونیک به تلفات در خصوص موج سینوسی برابر خواهد بود:

$$\frac{P}{P_R} = \left[\frac{V_1}{V_R} \sum \frac{1V_h}{hV_1} \cos \phi_h \right]^2$$

که در این معادله:

ϕ_h : زاویه فاز هارمونیک ولتاژ

s : ضریب اشتیمنس و برابر $(1/6)$ تا $(1/8)$ است.

قابل توجه است که اغتشاش ولتاژ تاثیر بسیار کمی بر تلفات هیستریز در لایه های هسته ترانسفورماتور ایجاد می کند.

3-10-4 تلفات جریان گردابی در هسته

به دلیل ارتباط غیر خطی مشخصه $B-H$ مواد مغناطیسی مورد استفاده در هسته ترانسفورماتور بخصوص در نقطه کار ترانسفورماتور استفاده از روش جمع آثار به منظور تاثیر

هارمونیک های موجود در موج ولتاژ بر تلفات گردابی امکان پذیر نمی باشد . در بررسیهای که در زیر به عمل آمده است میزان تلفات جریان گردابی بصورت زیر تخمین شده است .

$$\frac{P}{P_R} = \frac{A\sqrt{2}}{\pi} \left[\frac{V_1}{V_R} \right]^2 \int_0^\pi [F_1(wt)]^2 F_2(wt) d(wt)$$

$$F_1(wt) = \sum \frac{V_h}{V_1} \sin(hwt = \theta_h)$$

$$F_2(wt) = \sum \frac{1V_h}{h_{v1}} [\cos \theta_h - \cos(hwt + \theta_h)]$$

اگر ترانسفورماتور در ناحیه خطی منحنی $B-H$ کار نماید می توان از معادله ساده زیر به منظور تخمین تلفات جریان گردابی در اثر هارمونیکها استفاده نمود .

$$\frac{P}{P_R} = \left[\frac{V_1}{V_R} \right]^2 \sum h^2 \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^2 Kh$$

ضریب $kh < 1$ می باشد و تابعی از عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس با فرکانس hf در هسته می باشد .

4-10-4 کاهش ظرفیت ترانسفورماتور

انتخاب ترانسفورماتور ها از نظر توان نامی با توجه به نیاز بار در ولتاژ سینیوسی نامی و مشخص تعیین می گردد و ابعاد و ظرفیت ترانسفورماتور براساس توان اکتیو و راکتیوی که بایستی تغذیه کند تعیین می شود .

در صورتی که از ترانسفورماتور جریان غیر سینیوسی عبور کند وبه عبارتی مصرف کننده ها از ترانسفورماتور دارای هارمونیک باشد در نتیجه توان و جریان موثری که توسط ترانس باید تغذیه گردد بیشتر می گردد . در چنین حالتی احتمال بیش از حد گرم شدن ترانسفورماتور و در

نتیجه کاهش عمر آن به دلیل افزایش تلفات زیاد خواهد بود . به همین دلیل در هنگام انتخاب ترانسفورماتور ها برای تغذیه بارهایی با جریان غیر سینوسی میزان کاهش ظرفیت ترانس ناشی از جریان غیر سینوسی باید تخمین زده شود .

فرمول زیر برای تعیین ضریب کاهش ظرفیت ترانسفورماتور در اثر وجود هارمونیک ارائه شده است .

$$K = \left\{ 1 + 0.1 \left[\sum_{h=2} h^{1.6} \left(\frac{I_h}{100} \right)^2 \right] \right\}^{-0.5}$$

که در آن :

k : ضریب کاهش ظرفیت نامی

I_h : میزان هارمونیک بر حسب درصدی از مولفه اصلی

اگر درصد حاصله هارمونیک ها به ترتیب برابر $I_7 = 14$, $I_{11} = 9$, $I_{13} = 8$ برای

هارمونیک های 5 الی 13 باشد مقدار K برابر با 91٪ خواهد شد . به عبارت دیگر اگر ظرفیت

واقعی ترانس در حضور موج سینوسی 1000 کیلوولت آمپر باشد آنگاه در صورتی که جریان بار

دارای هارمونیک های با مقادیر داده شده در بالا باشد ظرفیت ترانس 910 کیلو ولت آمپر خواهد

بود .

فصل پنجم

جبران کننده های استاتیک

1-5 مقدمه

جبران کننده های استاتیک مانند کندانسورهای سنکرون برای « جبران کنندگی امیدانس موجی » و « جبران کنندگی با تقسیم خط » در سیستم های انتقال فشار قوی با طول زیاد بکار می روند. کاربردهای دیگر این جبران کننده ها، جبران کنندگی بار، کنترل ولتاژ طرف AC مبدلها در انتقال جریان مستقیم (HVDC)، و کاهش رزونانس زیرسنکرون می باشد.

مهمترین خاصیت یک جبران کننده استاتیک، کنترل پیوسته ولتاژ ترمینالهای آن می باشد. این کار با تنظیم پیوسته تبادل قدرت راکتیو (پیش فار و پس فاز) با سیستم قدرت انجام می گیرد. خاصیت مهم دیگر، پاسخ سریع این جبران کننده است. در حالی که یکی از اشکالات کندانسورهای سنکرون، وجود ثابت زمانی های مدار کنترل ولتاژ و تأخیر در پاسخ آن می باشد، جبران کننده های استاتیک در فاصله 1 تا 2 سیکل به تغییرات بوجود آمده پاسخ میدهند و لذا در کنترل ولتاژ و پایداری حالت گذرای سیستم ها کاملاً موثر و مفید هستند. در

کندانسورهای سنکرون احتمال ناپایداری بر اثر خطاهای ناگهانی در سیستم وجود دارد، در حالیکه جبران کننده های استاتیک بعثت نداشتن سیستم دوار دارای چنین احتمالی نیستند.

با توجه به مزایای فوق الذکر ، امروزه در سیستم های قدرت مدرت جبران کننده های استاتیک بعنوان کامل ترین جبران کننده ها مطرح هستند. این جبران کننده ها دارای انواع زیادی هستند که مهمترین آنها عبارتند از:

1- راکتور کنترل شده با تریستور TCR

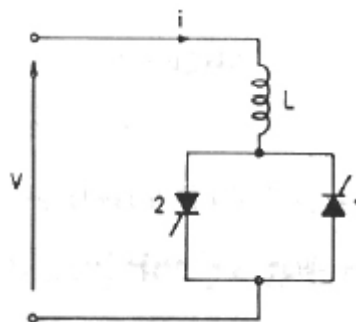
2- خازن سویچ شده با تریستور TSC

3- راکتور اشباع شده SR

حال به بررسی ساختمان هر یک از انواع فوق ، مشخصه ولتاژ - جریان و عملکرد آنها در شرایط ماندگار و گذرای یک سیستم قدرت می پردازیم.

2-5 راکتور کنترل شده با تریستور TCR

ساختمان TCR بطور شماتیک در شکل زیر نشان داده شده است. عنصر کنترل کننده ، مدار کنترل تریستوری است و شامل دو تریستور موازی است که قطب های غیر همنام آنها بهم متصل شده اند.



شکل (1-5) ساختمان شماتیک TCR

اگر تریه سستورها در نقاط پیک ولتاژ شروع به هدایت کنند، هدایت کامل در راکتور حاصل می شود و لذا زاویه آتش $\alpha = 90^\circ$ نشان دهنده هدایت کامل می باشد. هدایت ناقص به ازاء زاویه های آتش بین 90° تا 180° بدست می آید. در اینصورت هر دو تریستور نسبت به هدایت کامل به میزان مساوی تاخیر در آتش شدن دارند. هر چه زاویه آتش بیشتر باشد، هدایت ناقص تر بوده و مقدار موثر جریان مؤلفه اصلی کمتر خواهد بود و این به منزله افزایش اندوکتانس راکتور و کاهش قدرت راکتیو مصرفی آن می باشد. بنابراین TCR یک ساسپتانس قابل کنترل بوده و یک جبران کننده استاتیک محسوب می گردد.

اگر σ زاویه هدایت باشد، رابطه آن با زاویه α از معادله زیر بدست می آید:

$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi$$

معادله جبران کننده را برحسب مقدار موثر ولتاژ می توان بصورت زیر نوشت:

$$i = \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad \alpha < \omega t < (\alpha + \sigma)$$

$$\alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi$$

$$= V$$

که در آن $X_L = \omega L$ راکتانس راکتور به ازاء فرکانس مؤلفه اصلی می باشد. پس از بدست

آوردن سری فوریه i ، مقدار مؤلفه اصلی جریان به ترتیب زیر محاسبه می شود:

$$I_t = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi * X_L} * V$$

$$I_t = B_L(\sigma) * V$$

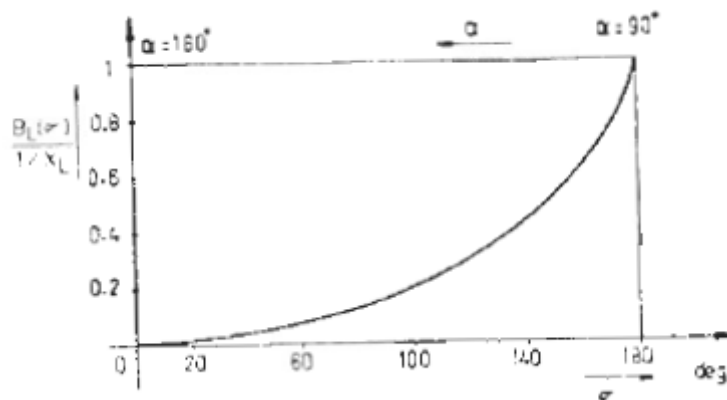
در اینجا $B_L(\sigma)$ ساسپتانس قابل تنظیم جبران کننده است که براساس رابطه زیر با زاویه

هدایت کنترل می گردد:

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin(\sigma)}{\pi * X_L}$$

تغییرات $B_L(\sigma)$ بر حسب زاویه هدایت σ و زاویه آتش α در شکل (5-2) رسم شده

است.



شکل (5-2) منحنی تغییرات $B_L(\sigma)$ بر حسب زاویه هدایت σ و زاویه آتش α

در شرایط هدایت کامل، $\alpha = 90^\circ$ و $\sigma = 180^\circ$ بوده و مقدار B_L به حداکثر خود یعنی

$$\frac{1}{X_L} \text{ می رسد. حداقل مقدار } B_L \text{ نیز در } \alpha = 180^\circ \text{ (} \sigma = 0 \text{) برابر صفر می باشد.}$$

TCR دارای یک سیستم کنترل است که زمان آتش تریستورها (و در نتیجه σ) را

تعیین می کند و پالس های آتش را به تریستورها می فرستد و به این ترتیب ساسپتانس قابل

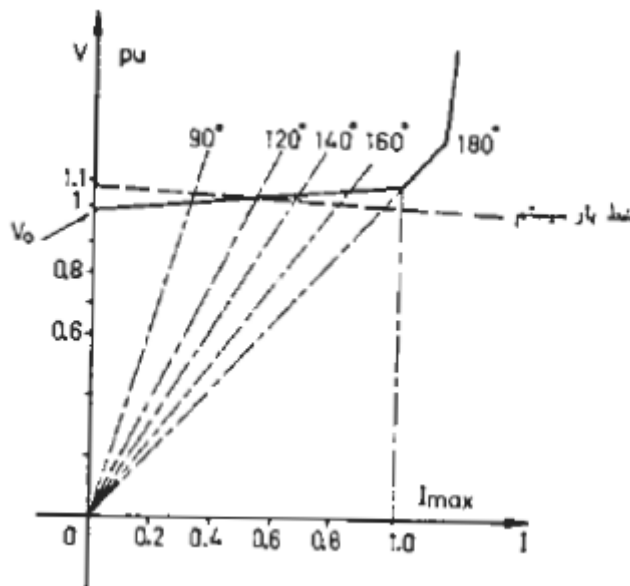
کنترل $B_L(\sigma)$ را بوجود می آورد. با توجه به بحث های فوق، مشخصه ولتاژ - جریان TCR

مطابق شکل خواهد بود. نقطه کار در حالت ماندگار از محل تلاقی این مشخصه های باخط بار سیستم بدست می آید.

مشخصه ولتاژ - جریان شکل زیر با معادله زیر بیان می شود:

$$V = V_a + jX_L I$$

جریان نامی جبران کننده I_{\max} است که در شکل زیر برابر 1 pu می باشد.



شکل (3-5) مشخصه ولتاژ-جریان TCR

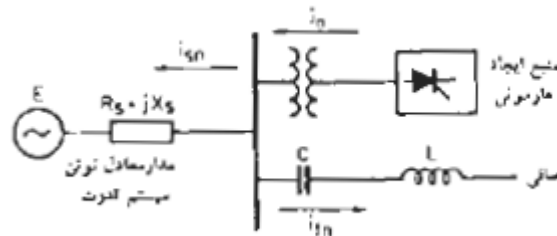
هرچه زاویه آتش زیادتر و زاویه هدایت کمتر باشد جریان مؤثر کمتر شده و منحنی جریان از حالت سینوسی بیشتر خارج می گردد. بعبارت دیگر TCR ایجاد کننده هارمونیهای جریان است. هارمونیهای ایجاد شده دارای همه مؤلفه های فرد می باشد. دامنه مؤلفه سوم حدود 14 درصد، مؤلفه های پنجم و هفتم و نهم به ترتیب 5، 2/6 و 1/6 درصد، ...، و مؤلفه سی و پنجم حدود 0/1 درصد دامنه مؤلفه اصلی جریان است. وجود هارمونیهای در سیستم های قدرت باعث

کاهش عمر خازن ها و یا صدمه دیدن آنها ، سوختن فیوز خازن ها، افزایش دمای ماشینهای الکتریکی (بهخصوص ژنراتورهای با قطب صاف) ، و افزایش تلفات ترانسفورماتورها می گردد.

کنترل کننده های تریستوری و مبدلها منابع اصلی ایجاد هارمونی در سیستم های قدرت هستند. شکل زیر یک منبع ایجاد هارمونی را نشان می دهد. هارمونی n ام جریان ایجاد شده توسط این منبع با i_n نشان داده شده است. برای حذف و یا کاهش دامنه این هارمونی یک صافی شامل خازن C و راکتور L در نظر گرفته شده است. جریان i_n برابر است با:

$$I_n = I_{fn} + I_{sn}$$

که در آن i_{fn} و i_{sn} به ترتیب جریان های هارمونی n ام بطرف سیستم قدرت و صافی می باشند.



شکل (4-5) یک نمونه صافی با استفاده از L, C

امپدانس صافی Z_f از جمع امپدانس خازن Z_{cf} و امپدانس راکتور Z_{Lf} بدست می آید:

$$Z_f = Z_{cf} + Z_{Lf} = -jX_{cf} + jX_{Lf}$$

امپدانس تونن سیستم قدرت نیز برابر است با:

$$Z_s = R_s + jX_s$$

جریان هارمونی n/m بطرف صافی و سیستم قدرت از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$I_{fn} = \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} I_n$$

$$I_{sn} = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f}$$

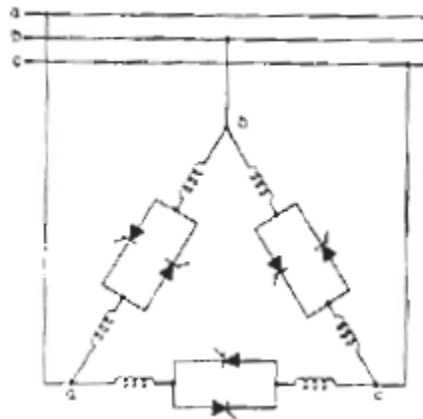
مقادیر L و C طوری تنظیم می شوند که به ازاء فرکانس هارمونی مشخصی (مثلاً هارمونی

پنجم) مقدار Z_f تقریباً صفر شود و در نتیجه $i_{fn} = 0$ و $i_{sn} = 0$ خواهند شد. بعبارت دیگر تمام هارمونی جریان ایجاد شده به طرف صافی هدایت شده و جریان ها هارمونی سیستم حذف خواهد شد.

روش دیگر حذف هارمونیها استفاده از ترتیب مناسب برای اتصال سه فاز TCR است. اگر

مطابق شکل مدار سه فاز TCR بصورت مثلث بسته شود، مسیر جریان هارمونی ضریب سه در داخل مثلث خواهد بود و این هارمونی در جریان های خطی ظاهر نخواهند شد. در این شکل

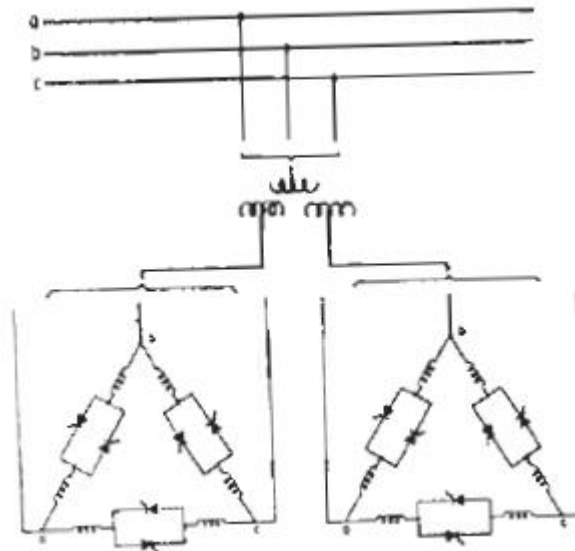
تقسیم راکتور هر فاز به دو قسمت ، بخاطر حفاظت بیشتر TCR در مقابل خطاها صورت گرفته است.



شکل (5-5) حذف هارمونیک سوم با استفاده از مدار TCR با اتصال ستاره

برای حذف هارمونی های 5 و 7 ، طبق شکل بالا TCR را به دو قسمت تقسیم می کنیم که توسط دو ثانویه یک ترانسفورماتور کاهنده با اتصال های مثلث و ستاره تغذیه می شوند. این

عمل اختلاف زاویه 30° بین جریان های دو TCR ایجاد می کند و در نتیجه هارمونی های 5 و 7 از جریان های خطی طرف اول ترانسفورماتور حذف می شوند.



شکل (5-6) حذف هارمونی کهای سوم، پنجم و هفتم با استفاده از مدار TCR با اتصال

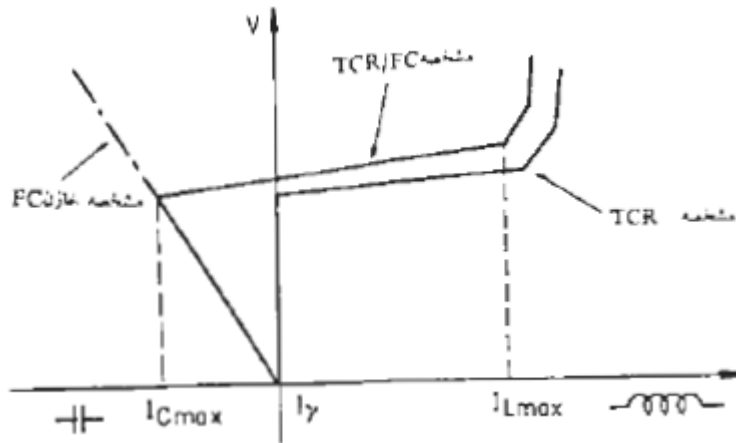
ستاره

طریقه اتصال شکل بالا به سیستم 12 پالس موسوم است و کمترین ضرائب هارمونی موجود

در آن 11 و 13 می باشد که با نصب صافی های مناسب باید حذف شوند.

5-2-1 ترکیب TCR و خازن های ثابت موازی (TCR/FC)

در TCR ، جریان جبران کننده بطور پیوسته بین صفر تا مقدار ماکزیمم قابل کنترل است. این جریان همیشه پس فاز بوده و TCR فقط قدرت راکتیو جذب می کند. اگر یک خازن با TCR موازی شود می تواند ضریب قدرت پیش فاز نیز برای جبران کننده ایجاد کند و قدرت راکتیو به شبکه تزریق گردد. در شکل (5-7) مشخصه ترکیب TCR و خازن موازی نشان داده شده است.

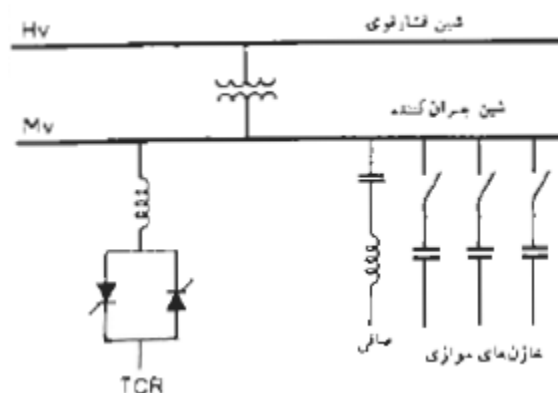


شکل (5-7) منحنی مشخصه ترکیب TCR و خازن موازی

اگر خازن های دیگری نیز با خازن فوق الذکر موازی شوند، مشخصه (TCR/FC) را به سمت چپ خواهند برد و با وصل هر خازن I_{Lmax} و I_{Cmax} نیز تغییر خواهند نمود. قطع و وصل خازن ها با کلیدهای مکانیکی معمولی (CB) و یا در حالت پیشرفته تر با ترستورها انجام می شود. شکل (5-8) شمای اتصال این جبران کننده استاتیک را به شبکه قدرت نشان می دهد.

برای بررسی پاسخ گذرای این جبران کننده، فرض کنید یک اختلال ناگهانی در سیستم قدرت خط بار سیستم را از وضعیت 1 و 2 در شکل (5-9) تغییر دهد. قبل از اختلال، نقطه کار قبل از اختلال از محل تلاقی خط بار 1 و مشخصه جبران کننده بدست می آید (نقطه a). بر اثر

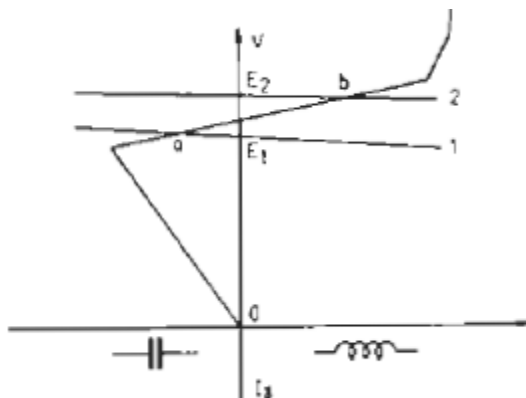
اختلاف بوجود آمده ، سیستم کنترل جبران کننده عمل می نماید و نقطه کار جدید (b) از محل
تلافی خط بار 2 با مشخصه جبران کننده بدست خواهد آمد.



شکل (5-8) نحوه اتصال جبرانکننده استاتیک با خازن موازی به شبکه قدرت

اگر جبران کننده وجود نداشت ، اختلاف ولتاژ بر اثر اختلال $E_1 - E_2$ می بود که در

مقایسه با $V_a - V_b$ بسیار زیاد است.



شکل (5-9) بررسی اختلال در شبکه قدرت قبل و بعد از استفاده از جبرانکننده

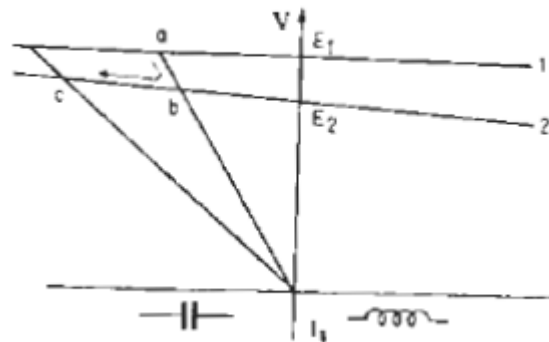
با خازن موازی

5-3 راکتور اشباع شده SR:

شکل (5-10) اساس کار راکتور اشباع شده را نشان می دهد. وسیله کنترل در این

جبران کننده یک هسته مغناطیسی قابل اشباع است که مشخصه ولتاژ - جریان آن در شکل

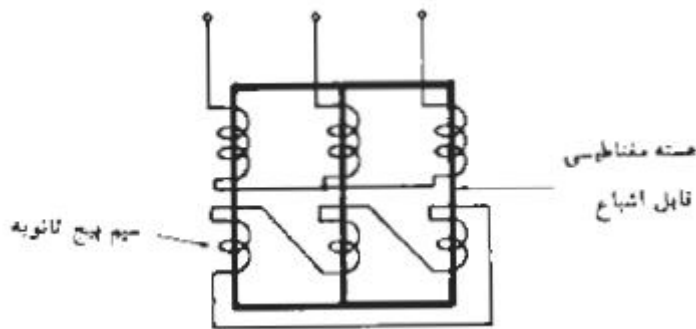
نشان داده شده است و مانند مشخصه TCR دارای شیب مثبت کمی می باشد. این جبران کننده نیز مانند TCR فقط قدرت راکتیو جذب می کند.



شکل (5-10) منحنی مشخصه ولتاژ - جریان SR

جریان و ولتاژ SR دارای هارمونی های زیاد هستند و معمولاً با بستن مدارهای مناسب ، این هارمونی ها به سطح بسیار نازلی می رسند. شکل (5-11) یکی از این مدارها را نشان می

دهد که در آن از یک سیم پیچ اضافی با اتصال مثلث استفاده شده است . به این ترتیب هارمونی ضریب 3 از راکتور اصلی حذف می شوند.



شکل (11-5) حذف هارمونیکهای شبکه قدرت با استفاده از راکتور اشباع شده

SR

با قراردادن راکتوری با مقدار مناسب در مدار ثانویه ، هارمونی های 5 و 7 نیز قابل حذف هستند. با استفاده از مدارهای دیگر می توان همه هارمونی های زیر ضریب 17 را حذف نمود.

بطور کلی با توجه به کاربرد مدارها و اتصالات مناسب می توان SR را یک جبران کننده بدون هارمونی در نظر گرفت.

1-3-5 شیب مشخصه ولتاژ:

جریان راکتور/شباع شده فقط حدود 5 تا 15 درصد بوده و به طرح راکتور بستگی دارد. برای دست یابی به مشخصه هائی با شیب های کمتر، به طرح راکتورهای با اندازه بزرگتر و مخارج بیشتر احتیاج می باشد.

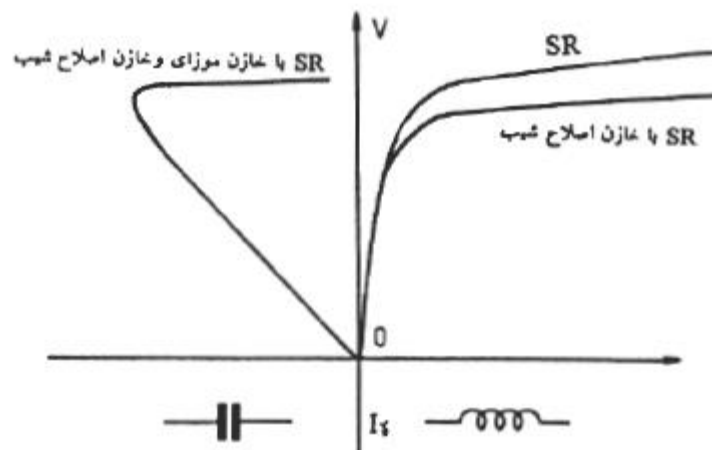
چنانچه یک خازن با راکتور/شباع شده سری شود، مشخصه ولتاژ - جریان دارای شیب کمتری می شود. در این صورت خازن سری را «خازن اصلاح شیب» می نامیم.

اثر خازن اصلاح شیب بر مشخصه SR در شکل (12-5) نشان داده شده است.

کارتبیت ولتاژ مانند TCR با نصب خازن موازی بهبود یافته و به قسمت ضریب قدرت پیش فاز نیز هدایت می شود. مشخصه راکتور/شباع شده با خازن ثابت موازی (SR/FC) در

شکل زیر

رسم شده است.



شکل (5-12) منحنی مشخصه ولتاژ - جریان SR با خازن اصلاح شیب

نتیجه گیری :

به طور کلی در پایان این پروژه ما با قسمتهای مختلف ترانسفورماتورهای قدرت از قبیل چگونگی عملکرد در ساختمان و وسایل حفاظتی که در ترانسفورماتور به کار برده می شود و همچنین منحنی $B-H$ (مغناطیس شوندگی) ترانسفورماتور آشنا می شویم . و بحث اصلی هارمونیکها در ترانسفورماتور قدرت است . هارمونیک ها ولتاژ ها و یا جریان های سینوسی هستند که فرکانس آنها مضربی از فرکانس نامی شبکه است . هارمونیک ها در ترانس یا هارمونیک جریان

هستند یا هارمونیک ولتاژ. هارمونیکهای جریان و نیروی محرکه الکتریکی اثرات متفاوتی به کار ترانسفورماتور دارند که پاره ای از آنها هارمونیکهای جریان شامل:

1- اثر بر تلفات اهمی 2- تداخل الکترو مغناطیسی با مدارهای مخابراتی 3- تاثیر بر روی تلفات هسته و هارمونیکهای ولتاژ شامل:

1- تنش ولتاژ روی عایق 2- تداخل الکترواستاتیکی در مدارهای مخابراتی 3- ولتاژ تشدید بزرگ را می توان نام برد.

هارمونیکهای ترانسفورماتور را باید تا حد امکان حذف کرد که روشهای متفاوتی برای این کار وجود دارد از قبیل:

1- چگالی شار کمتر 2- نوع اتصال 3- اتصال مثلث سیم پیچ اولیه یا ثانویه 4- استفاده از سیم پیچ سومی 5- ترانسفورماتور ستاره مثلث زمین. همچنین تلفاتی که هارمونیکها ایجاد می کنند از قبیل:

1- تلفات جریان گردابی در هادیهای ترانسفورماتور 2- تلفات هیستریزس هسته 3- تلفات جریان گردابی در هسته و کاهش ظرفیت ترانسفورماتور. انتخاب ترانسفورماتور از نظر توان نامی با توجه به نیاز بار در ولتاژ سینوسی نامی مشخص تعیین می گردد و ابعاد و ظرفیت ترانسفورماتور بر اساس توان اکتیو و راکتیوی که بایستی تغذیه کند تعیین می شود.

منابع و مآخذ ایرانی:

1- ترانسفورماتور سه فاز و تک فاز جلد دوم

دکتر علی مطلبی

2- ترانسفورماتورهای سه فاز

دکتر طالقانی

3- بررسی هارمونیکهای سیستم قدرت

شهرام کوهساری

4- بررسی هارمونی کی سیستم های قدرت

دکتر محمد علی معصوم

5- تجزیه و تحلیل پخش بار هارمونیک با منابع توزیع شده هارمونیک

موسی مرز بند، پایان نامه کارشناسی ارشد

6- مجموع مقالات برق

منابع و مآخذ خارجی:

- 1- ماشین های الکتریکی (تحلیل ، بهره برداری ، کنترل)
تالیف: دکتر پ . س. سن ترجمه: دکتر مهرداد عابدی
- 2- ماشین های الکتریکی (تحلیل ، بهره برداری ، کنترل) تالیف: پروف سور بیم بهارا جلد دوم ترجمه: دکتر لسانی - دکتر سلطانی
- 3- بررسی هارمونیکهای سیستم قدرت
تالیف: آریلاگا ، جوس مترجم: محمد علی شرکت معصوم
- 4-jen- hao & ou-yeen chang " a farst harmonic load flow
method for industrial dist system " IEEE 1999
- 5-alexander emanuel , mighao yang , david pileggi "the
engineering economics of power systems harmonics in sub
distribution feedrs " IEEE 1999

Abstract : In This Paper , The First Interlock Of The Transformer Core Magnetism Crump and Harmonic Instability Due It , Proceed Study .

And Then Peruse Effects Voltage and Current Harmonics On The Power System By Different Methods. In The Next Section , Utilize Star And Delta Connection Windings Power Transformer For Peruse Harmonics Delete Quality . Finally For Deleted Harmonics , Study The Compensator Static And Leches.

Keywords : Instability Harmonic , Crump Magnetism , Leaches , Power System , Voltage And Current Harmonic , Compensator Static