

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİR ÇEKİRDEKLİ, HAVA ARALIĞI BULUNAN REAKTÖR
ÇEŞİTLERİNİN İRDELENMESİ VE BİR PROTOTİP İÇİN
UYGULAMA ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Müh. Hakan TURAN

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Danışman: Prof.Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

KOCAELİ, 2010

**DEMİR ÇEKİRDEKLİ, HAVA ARALIĞI BULUNAN REAKTÖR
ÇEŞİTLERİNİN İRDELENMESİ VE BİR PROTOTİP İÇİN
UYGULAMA ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Müh. Hakan TURAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 29 Aralık 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 22 Şubat 2010

Tez Danışmanı

Prof.Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

(..........)

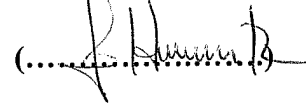
Üye

Prof.Dr. İbrahim ŞENOL

(..........)

Üye

Prof.Dr. Semra ÖZTÜRK

(..........)

KOCAELİ, 2010

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında her konuda beni destekleyen ve yol gösteren danıőmanım Sayın Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU'ya teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalıőmamda test süreci boyunca bana yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Bora ALBOYACI'ya teşekkür ederim.

Çalışma süreci içerisinde bana bu imkanı sağlayan ve her anlamda destek olan ENPAY Yönetim Kurulu Baőkanımız Sayın Selim YÜREKTEN'e, Genel Müdürümüz Sayın Murat YÜREKTEN'e minnetarım.

Son olarak, reaktör üretimi ve fabrika testlerinde bana yardımcı olan tüm mesai arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
ÖZET.....	vii
İNGİLİZCE ÖZET	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Harmonik Tanımı ve Oluşmasının Nedenleri	2
1.2. Statik Güç Konverterleri	5
1.2.1. Giriş.....	5
1.2.2. Köprü doğrultucu için gerilim dalga şekilleri	7
1.2.3. Giriş akım harmonikleri	7
1.2.4. Statik güç konverterlerinin reaktif güç ihtiyacı	9
1.3. Harmoniklerin Etkileri ve Çözüm Yöntemleri.....	10
1.4. Kompanzasyon Nedir, Neden Yapılır ?	11
1.5. Geleneksel Kompanzasyon	13
1.6. Filtreli Kompanzasyon.....	14
1.7. Filtreli Statik Kompanzasyon.....	16
2. MAGNETİK DEVRE , REAKTÖR TİPLERİ VE ENDÜKTANS HESABI.....	20
2.1. Giriş.....	20
2.1.1. Magnetik alan akısı ve akı yoğunluğu	20
2.1.2. Ferromagnetik malzemeler	25
2.1.3. Magnetik alan şiddeti	28
2.1.4. Histerezis çevrimi	34
2.1.5. Histerezis kaybı	37
2.1.6. Girdap akımı kayıpları	41
2.1.7. Relüktans tanımı	46
2.2. Seri (Hat) Reaktörler	47
2.2.1 Fonksiyonları	50
2.3. Harmonik Filtre Reaktörü	50
2.3.1. Giriş	50
2.3.2. Uygulamaları	52
2.3.3. Kullanılma nedenleri	53
2.3.4. Avantajları	55
2.3.5. Rezonans, şönt kondansatör ve filtreler	55
2.4. Harmonik Filtreleri	57
2.4.1. Filtre parametrelerinin seçimi	57
2.4.2. Filtre tipinin seçimi	58
3. REAKTÖRÜN TASARIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENEREK MODELİNİN OLUŞTURULMASI	61
3.1. Giriş	61
3.2. Nüve Boyutu ve Şekli	62
3.3. Bakır Dolgu Faktörü	64

3.4. Isıl Değerlendirmeler	64
3.5. Yüzey Etkisi (Skin Effect)	64
4. MODELİN ÜRETİLMESİ	66
4.1. Harmonik Filtreleme, Seri (Hat) Reaktör Uygulamaları	66
4.1.1. Filtre devrelerinde kullanılan reaktörlerin endüktans değerleri	69
4.1.2. Seri rezonans ilkesine göre çalışan harmonik filtreler	69
4.2. Maxwell Benzetim Programı ile Modelin Oluşturulması	79
4.2.1. Maxwell	79
4.2.2. 3D elektrik alanlar	79
4.2.3. Magnetostatik analiz	79
4.2.4. Girdap (eddy) akımlarının analizi	79
4.2.5. Geçici rejim analizleri	79
4.2.6. Maxwell devre çözümleri	80
4.3. 400 V – 72,17 A – 0,77 mH Seri Reaktör İçin Maxwell Modeli	81
5. MODELİN HARMONİK YÜKLENME DURUMLARINDA DEĞERLENDİRİLMESİ	84
5.1. Bilgisayar Simülasyonları	84
5.2. Test Sonuçları	88
6. SONUÇLAR	93
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Doğrultucu devresi	5
Şekil 1.2: Doğrultucu devresinden elde edilen gerilim ve akım dalga şekilleri (a) Transformatör DA sargı gerilimleri (b) Doğrultucu elemanları akımları (c) R1 DA sargısındaki akım (d) Hat akımı.....	6
Şekil 1.3: Konverterin DA gerilimdeki reaktif güç karşılaştırması	9
Şekil 2.1: Farklı yapılarda mıknatıs ve akım taşıyan bobinlerde magnetik alan değişimleri.....	21
Şekil 2.2: Akım taşıyan bir bobinde kuvvet çizgileri	21
Şekil 2.3: Akım ve magnetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki	23
Şekil 2.4: Akım taşıyan bir çevrede kuvvet çizgileri	23
Şekil 2.5: Akım taşıyan iletkenlerde magnetik alan	24
Şekil 2.6: Magnetik akı tanımı	25
Şekil 2.7: a) Ferromagnetik malzeme b) Antiferromagnetik malzeme	27
Şekil 2.8: Mıknatıslanma eğrisi	29
Şekil 2.9: Ferromagnetik bir çekirdeğin mıknatıslanması	29
Şekil 2.10: Magnetik geçirgenliğin magnetik alan şiddeti ile değişimi	30
Şekil 2.11: Maksimum magnetik geçirgenlik (permeability)	31
Şekil 2.12: Bir iletkenin akım geçirildiğinde meydana gelen alan şiddeti	32
Şekil 2.13: J'nin H'ya göre değişimi	34
Şekil 2.14: Histerezis çevriminin elde edilişi	34
Şekil 2.15: Histerezis kaybı	38
Şekil 2.16: Mıknatıslanmamış ve mıknatıslanmış bir malzemede atomların dizilişi	39
Şekil 2.17: Değişik frekanslarda histerezis çevrimi	40
Şekil 2.18: a) Girdap (Eddy ya da Fuko) akımı b) Ferromagnetik levha	42
Şekil 2.19: Birbirinden yalıtılmamış levhalar	45
Şekil 2.20: Seri (hat) reaktör	50
Şekil 2.21: Harmonik akımlarının analizi için devre	51
Şekil 2.22: Şönt Filtreler (a) Tek ayarlı filtre (b) İlk öncelikli yüksek-geçiş filtresi (c) İkinci öncelikli yüksek-geçiş filtresi (d) Üçüncü öncelikli yüksek-geçiş filtresi ...	52
Şekil 2.23: Harmonik filtre reaktörü	53
Şekil 2.24: Sabit bir harmonik kaynaklı bir sistemin çalışması	56
Şekil 3.1: Nüve konfigürasyonunun farklı tipleri	62
Şekil 3.2: Tablo 3.1 için referans	63
Şekil 4.1: Gerilimi V olan bir şebekeye bağlı L, C ve R elemanları	66
Şekil 4.2: Seri bağlı Ry, L ve C elemanlarından oluşan bir devrenin sinüzoidal çalışmada fazör diyagramı	67
Şekil 4.3: Ry, L ve C elemanlarından oluşan seri bağlı bir devrede ortalama güçler	68
Şekil 4.4: 5, 7, 11 ve 13. harmonikleri kompanze eden filtreler	70
Şekil 4.5: Seri rezonans filtresi ; sadece belli bir harmoniği kompanze eden filtre devresi	70
Şekil 4.6: Filtre reaktör tasarımının akış şeması	75
Şekil 4.7: Seri (hat) reaktör tasarımının akış şeması	76
Şekil 4.8: 400 V – 72,17 A – 0,77 mH reaktör şekli	78

Şekil 4.9: Maxwell devre çözümü şematik yapısı	80
Şekil 4.10: Tasarım ve üretimi yapılan modelin maxwell’de oluşturulan çizimi	81
Şekil 4.11: Tasarım ve üretimi yapılan modelin maxwell’de endüktans değerinin hesaplanması	82
Şekil 4.12: Tasarım ve üretimi yapılan modelin maxwell’de endüksiyon dağılımının gösterilmesi	83
Şekil 5.1: Prototipin harmonik yüklenme durumlarında incelenmesi için oluşturulan model	84
Şekil 5.2: Giriş gerilimleri	85
Şekil 5.3: Hat akımları	86
Şekil 5.4: Endüklenen gerilimler	86
Şekil 5.5: Nüve kayıpları (kW olarak)	87
Şekil 5.6: Nüve kayıpları (W olarak)	88
Şekil 5.7: Deney düzeneği	89
Şekil 5.8: Hat akımı (saf sinüs durumu)	89
Şekil 5.9: Reaktör uçlarında oluşan gerilim (saf sinüs durumu).....	90
Şekil 5.10: 50 Hz B-H eğrisi	90
Şekil 5.11: Hat akımı (harmonikli durumu)	91
Şekil 5.12: Reaktör uçlarında oluşan gerilim (harmonikli durumu)	91
Şekil 5.13: 50 Hz + 250 Hz B-H eğrisi	92
Şekil 5.14: 50 Hz ve 50 Hz + 250 Hz B-H eğrisinin kıyaslaması	92

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1: 6, 12, 18 ve 24 darbe doğrultucuları için AA besleme hat harmonik akımları karakteristiği	9
Tablo 2.1: Malzemeye göre değişen sabitler	40
Tablo 3.1: Orantılı nüve boyutları	63
Tablo 3.2: 100°'deki farklı frekanslar için bakırdaki yüzey derinliği	65
Tablo 4.1: 400 V – 72,17 A – 0,77 mH reaktör hesap tablosu	78

DEMİR ÇEKİRDEKLİ, HAVA ARALIĞI BULUNAN REAKTÖR ÇEŞİTLERİNİN İRDELENMESİ VE BİR PROTOTİP İÇİN UYGULAMA ÖRNEĞİ

Hakan TURAN

Anahtar Kelimeler: Reaktörler, Endüktans, Harmonikler

Özet: Günümüzde; motor hız kontrol sistemleri, kompanzasyon, akım ve gerilimin genliklerinin azaltılması, akım sınırlaması gibi pek çok değişik amaç için reaktörler kullanılmaktadır. Bu reaktörler demir çekirdekli olabildiği gibi bazı uygulamalarda hava çekirdekli de olabilirler. Genellikle sistemlerdeki istenen akım ve endüktans değerleri, demir çekirdekli reaktörlerin tasarımını zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, prototip üretimi ve testi yapılabilen seri (hat) reaktörleri ve harmonik filtre reaktörlerinin tasarımı incelenmiştir. Bu amaçla, teknik değerleri $U_n=400$ V, $I_n = 72.17$ A ve $L_n = 0.77$ mH olan, tasarım ve üretimi uygulamada yapılabilen bir reaktör modeli ele alınmıştır.

Reaktör tasarımı için gerekli olan tüm veriler ve hesap yöntemleri bir akış şeması yardımı ile açıklanmıştır. Excel programı ile tasarımda kullanılan ve oluşturulan reaktör dizayn parametrelerinin ve modelinin doğruluğu Maxwell 3D simulasyon programında incelenmiştir.

Son olarak, Maxwell geçici rejim analiz kısmı kullanılarak üretimi yapılan seri reaktörün analizi yapılmış olup performansı Kocaeli Üniversitesi test laboratuvarında test edilmiştir.

PROTOTYPE FOR AN APPLICATION CASE STUDY AND INVESTIGATION OF THE REACTOR TYPES WITH IRON CORE AND AIR GAP

Hakan TURAN

Keywords: Reactors, Inductance, Harmonics

Abstract: Nowadays, reactors are used for many different purposes such as motor speed control systems, compensation systems, reduction of the amplitude of current and voltage and current limiting. This iron core reactors could be in some applications such as air-core can also. Generally, the desired current and inductance values in the systems, requires the design of iron-core reactors.

In this thesis, design of series reactors and harmonic filter reactors which prototype production and testing can be carried out were investigated. For this purpose, the technical values $U_n = 400$ V, $I_n = 72,17$ A and $L_n = 0.77$ mH, which design and manufacture a reactor that can be done at the factory has been taken.

All data needed for reactor design, calculation methods are explained with the help of a flow chart. Accuracy of the design parameters and the model of the reactor which is calculated in Excel form were examined in Maxwell 3D simulation program.

Finally, the design of the manufactured series reactor are analyzed using the transient analysis of Maxwell and tested performance of the series reactors on laboratory of the Kocaeli University.

1. GİRİŞ

Reaktörler reaktif enerji depo eden elektromekanik elemanlardır. Alternatif akım şebekesine bağlandığında şebekeden reaktif güç çekerler. Demir çekirdekli ve hava çekirdekli olarak dizayn edilirler. Bilinen reaktör çeşitleri aşağıda belirtilmiştir:

Hat reaktörleri,
Harmonik filtre reaktörleri,
Motor yolverme reaktörleri,
Akım sınırlama reaktörleri,
Şönt reaktörler,
Nötr topraklama reaktörleri,
Ark fırını reaktörleri,
DC şok bobinleri.

Hat reaktörleri (Şok Bobinleri), genellikle motor hız kontrol sistemlerinde yarı iletken eleman ile seri olarak bağlanırlar.

Harmonik filtre reaktörleri, ya paralel ya da seri olarak sisteme bağlanırlar. Genellikle trafo merkezlerine, statik güç kompanzasyon sistemlerine ve HVDC hatlarına bağlanırlar. Harmonik filtreler, farklı frekanslar için akım ve gerilimin genliklerini azaltmak için kullanılırlar.

Motor yolverme reaktörleri, üç fazlı büyük asenkron ve senkron motorların kalkış anında çektikleri aşırı akımları sınırlarlar.

Akım sınırlama reaktörleri, kısa devre akımlarının uygun seviyelere indirilmesinde, anabarlarda, izolatörlerde, devre kesicilerinde ve diğer yüksek gerilim elemanlarında oluşan zorlayıcı etkilerin azaltılması amacıyla kullanılırlar. Ayrıca, paralel devrelerde akımı uygun oranlarda paylaşırma amaçlı da kullanılırlar.

Şönt reaktörler (Endüktif yük reaktörü), genellikle uzun ve az yüklü iletim hat ve kablolarda kapasitif reaktif enerjinin kompanze edilmesinde kullanılırlar ve böylelikle sisteme daha fazla aktif güç akışı sağlar. Şönt reaktörler genellikle ana transformatörlerin tersiyer sargılarına bağlanırlar. Şönt reaktörler ayrıca laboratuvarında endüktif reaktif güç yüklemesi amacıyla kullanılmaktadırlar.

Nötr topraklama reaktörleri, endüstriyel güç sistemlerinin endüktans üzerinden topraklanması için kullanılırlar. Genellikle; transformatörlerde, jeneratörlerde ve topraklama transformatörlerinde toprak ile nötr arasına bağlanırlar. Nötr topraklama reaktörleri bir yandan arıza akımlarını ekipmanlara zarar vermeyecek seviyelerde sınırlarken, diğer yandan da koruma rölelerine yeterli akımı sağlayarak bu sayede arızanın giderilmesini sağlar.

Ark fırını reaktörleri, değişken ark fırını gerilim ve akımının sınırlanması amacıyla seri olarak bağlanırlar. Hava çekirdekli dirler.

DC şok bobinleri, genellikle DC sistemlerde oluşan geçici aşırı akımları (ripple) ve harmonik akımlarını düzeltmek amacıyla kullanılırlar. Bu reaktörler, doğru akım titreşimlerini düzelterek kayıpları azaltır ve sistem performansını yükseltir. DC Şok Bobinleri, birçok endüstriyel uygulamada ve HVDC sistemlerde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, prototip üretimi deneysel olarak yapılan seri (hat) reaktörleri ve harmonik filtre reaktörleri incelenmektedir. $U_n = 400V$, $I_n = 72.17A$ ve $L_n = 0.77$ mH olan reaktör dizaynı yapılmış olup, simulasyon programında bu yapılan dizayn incelenmiştir. Simulasyon programında ve test sırasında reaktöre harmonik akımları uygulanarak, harmonik yüklemenin nüve üzerinde etkileri incelenmiştir.

1.1 Harmonik Tanımı ve Oluşmasının Nedenleri

Bilindiği üzere, elektrik dağıtım şebekesinde gerilim sinüs şeklindedir. Aynı şekilde şebekeden çekilen akımın da sinüs şeklinde olması beklenir. Ancak, günümüzde elektrik şebekelerinde saf sinüs şeklindeki gerilim ve akım dalga şekilleri ile

karşılaşmak çeşitli nedenler ile zorlaşmış, gerilim ve akım dalga şekilleri sinüs şeklinden farklı bir duruma gelmeye, yani harmonik içermeye başlamıştır.

Harmonikler Fourier Teoremi ile matematiksel olarak ifade edilir. Fourier Teoremi yardımı ile herhangi bir periyodik (kendini tekrar eden) dalga şeklini temel bileşen frekansındaki bileşen ve temel bileşenin katlarındaki frekanslardaki bileşenlerin toplamı olarak göstermek olasıdır. [1]

Dağıtım şebekesindeki gerilimin frekansı 50 Hz'tir (bazı ülkelerde 60 Hz kullanıldığına dikkat edilmelidir). Bu durumda, elektrik şebekesinde karşılaşılabileceğimiz herhangi bir dalga şeklini 50 Hz frekansındaki bir temel bileşen ve genliği ana bileşenin genliğinin harmonik katsayısına bölünmesi ve frekansı ise harmonik katsayıları ile türetilmiş frekans değeri ile titreşim şeklinde ifade edilebilir.

Harmoniklerin Oluşma Nedenleri ;

Günümüzde harmoniklerin oluşmasının temel nedeni, modern enerji dönüşüm teknikleri kullanan güç elektroniği cihazlarının sayısındaki hızlı artıştır. Örneğin artık birçok uygulamada verimlilik ve kontrol olanakları gibi nedenler ile elektrik motorları motor sürücüler tarafından kontrol edilmektedir. Bir güç elektroniği cihazı olan motor sürücü, şebekeden harmonik içerikli akımlar çeker. [1]

Endüstriyel tesislerde ve iş merkezlerinde yoğun olarak karşılaşılabilecek harmonik içerikli akımlar çeken cihazlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Motor sürücüleri (hız kontrol cihazları),
- Kesintisiz güç kaynakları (KGK'lar),
- Doğrultucular (redresörler) ve akü şarj cihazları,
- Endüksiyon ocakları,
- Bilgisayarlar ve ofis cihazları,
- Özellikle elektronik balastlı deşarj lambaları, (bazı elektronik balastlarda harmonik seviyeleri tasarımları gereği düşüktür).

Bunların dışında ark ocakları, dengesiz yüklenmiş motorlar vs. de güç elektroniği devreleri içermemelerine rağmen harmonik üretirler. Şebekeden harmonik içerikli akım çekilmesi sonucunda şebeke empedansı üzerinde harmonik frekanslarında gerilim düşümleri oluşur ve bu şekilde gerilim de harmonik içerikli duruma gelir.

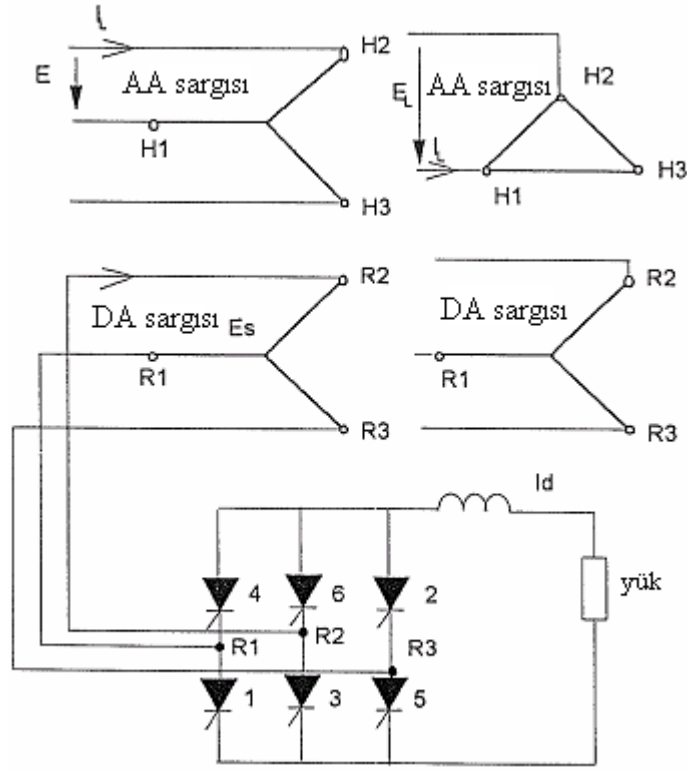
Harmoniklerin ölçülmesi günümüzde oldukça kolaylaşmıştır. Elektronikteki gelişmeler ve sinyal işleme teknikleri yardımı ile birçok firma tarafından enerji kalitesi ve harmonik ölçümü için kullanılabilecek cihazlar geliştirilmiştir.

- Elektrik panolarına monte edilebilen cihazlar: Bazı enerji analizörlerine enerji kalitesi ve harmonikler ile ilgili parametreleri ölçme özelliği de eklenmiştir. Ölçüm yapılmak istenen panolara monte edilen bu cihazlar ile o noktadaki birçok ölçüm değerine ulaşmak mümkündür. Ölçüm değerleri cihaz özelliklerine bağlı olarak cihaz ekranından veya bilgisayar bağlantısı aracılığı ile monitörden izlenebilmektedir. Birçok cihazda farklı noktalara yerleştirilen enerji analizörlerinin tek bir bilgisayar aracılığı ile izlenmesi özelliği de vardır. Cihaz ve program özelliklerine bağlı olarak değerlerin kaydedilmesi, çeşitli durumlarda alarmlar verilmesi gibi olanaklar da vardır.
- Portatif ölçüm cihazları: Enerji kalitesi analizörü olarak adlandırılan bu cihazların tek ve üç fazlı olanları vardır. Gerilim bağlantı uçları bara ve bağlantı noktalarına tutturulabilecek şekildedir. Akım ölçümü için genellikle kavrayacak şekilde bara ve kablo üzerine takılabilen akım algılayıcıları kullanılır. Bazı durumlarda enerji sisteminde bulunan akım transformatörlerinden de ölçüm alınabilir. Genellikle enerji kalitesi ve harmonikler ile ilgili birçok parametrenin yanı sıra akım, gerilim, güç ve enerji ile ilgili parametreleri de ölçebilirler. Değerler birçok cihazda anlık olarak cihaz ekranında görüntülenebilir, istek üzerine de daha sonra incelenmek üzere cihaz hafızasına kaydedilebilir. Kaydedilen değerler bilgisayara aktarılarak inceleme yapılır. Bazı cihazlarda ise cihaz ekranından sadece sınırlı bilgiye ulaşılabilir. Bu tip cihazlar daha çok kayıt alıp daha sonra bilgisayar ortamında inceleme yapmak üzere geliştirilmiştir.
- Sabit profesyonel cihazlar: Bazı üreticilerin ürettiği, daha çok enerji üretim, iletim ve dağıtım alanlarında çalışan firmaların kullanmaları için tasarlanmış cihazlardır.

1.2 Statik Güç Konverterleri

1.2.1 Giriş

Statik güç konverterleri (doğrultucular, inverterler, kıyıcılar vb.), akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmanın önemli düzeyde olduğu kaynaklardır. DA yükündeki maksimum endüktans ve AA besleme devresindeki sıfır komütasyon, endüktans varsayımına dayalı gerilim ve akım dalga şekilleri ile ilişkili tipik bir doğrultucu devresi Şekil 1.1 de gösterilmiştir.



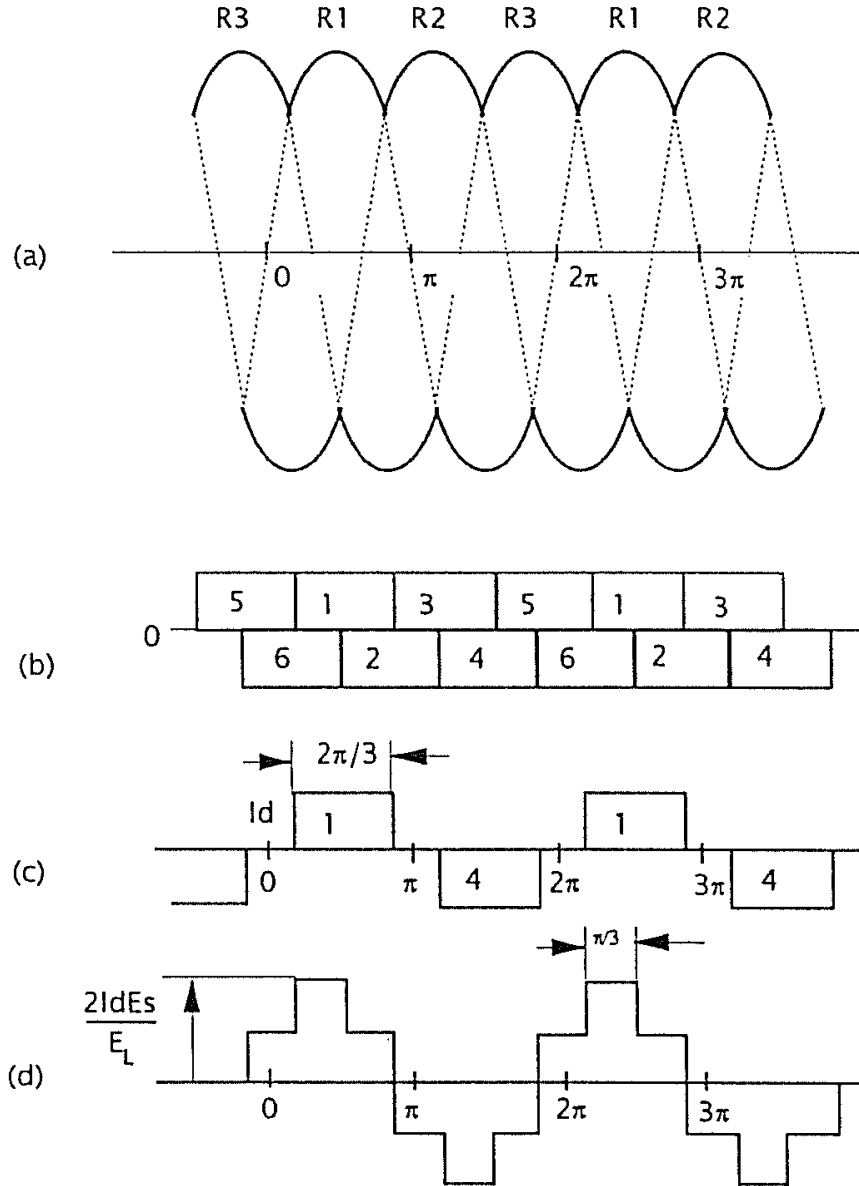
Şekil 1.1: Doğrultucu devresi [1]

Şekil 1.2 harmonik bileşenlerine aşağıdaki formülle ayrıştırılabilir ;

$$i = \sqrt{2} \times I_1 \times \left[\begin{aligned} & \sin wt - \frac{\sin 5wt}{5} - \frac{\sin 7wt}{7} + \frac{\sin 11wt}{11} + \frac{\sin 13wt}{13} + \dots \\ & \dots + \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6} \times \frac{\sin nwt}{n} + \dots \end{aligned} \right] \quad (1.1)$$

burada I_1 AA hat akımının temel bileşeninin efektif değeridir.

$$I_1 = \frac{6}{\pi} \times I_d \quad (1.2)$$



Şekil 1.2: Doğrultucu devresinden elde edilen gerilim ve akım dalga şekilleri [1]

(a) Transformatör DA sargı gerilimleri

(b) Doğrultucu elemanları akımları

(c) R1 DA sargısındaki akım

(d) Hat akımı

Şekil 1.1 de gösterildiği gibi transformatörün AA sargısı üçgen bağlanırsa, 30° faz kaymalı olarak aynı dalga şekli elde edilir. İlgili akım dalga şekli aşağıdaki şekilde harmonik bileşenleri içerisinde tekrar ayrıştırılabilir.

$$i = \sqrt{2} \times I_1 \times \left[\begin{array}{l} \sin wt + \frac{\sin 5wt}{5} + \frac{\sin 7wt}{7} + \frac{\sin 11wt}{11} + \frac{\sin 13wt}{13} + \dots \\ \dots + \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6} \times \frac{\sin nwt}{n} + \dots \end{array} \right] \quad (1.3)$$

İki denklem arasındaki fark 5. , 7. , 17. , 19. vs. harmonik bileşenlerinin negatif işaretli olmasıdır. Bunun anlamı; bu iki doğrultucu eşit hat akımları ile paralel olarak çalıştırılırsa, bu harmonik çiftleri AA hat akımını iptal edecektir. Bu işlem 12-darbeli olarak adlandırılır.

1.2.2 Köprü doğrultucu için gerilim dalga şekilleri

Simetrik bir faz kontrolü ile üç faz köprüünün çıkış geriliminin dalga şekli altı darbelidir. Sonsuz büyük bir endüktans ile bir yükün seri bağlı olduğu varsayılırsa, çıkış akımı harmonik bileşensiz saf doğru akımdır, fakat gerilim harmoniklerle yüklüdür.

Diğer taraftan, konverterler sonsuz bir çubuğa bağlanırsa, konvertere uygulanan gerilim saf sinüzoidal fakat giriş akımı harmoniklerle doludur. Bu harmonikler giriş akımında veya çıkış geriliminde konverterin karakteristik harmonikleri olarak adlandırılır.

1.2.3 Giriş akım harmonikleri

Konvertere giren AA hat akımı tek harmonik serilerini içeren ve alternatif dikdörtgen şeklindedir. Bu harmonik akımların büyüklükleri aşağıdaki şekilde hesaplanır. [2]

$$I_n = \frac{1}{n} \times I_1 \quad (1.4)$$

Burada, I_1 temel akımı, n harmonik sayısıdır. 6 darbeli doğrultucu için ;

$$n = 6k \pm 1 \quad (1.5)$$

$k = 1, 2, 3, \dots$

Şekil 1.2 (d) AA besleme devresindeki sıfır endüktans varsayımıyla ideal dalga şeklini göstermektedir.

Efektif giriş akımı;

$$I_{eff} = \sqrt{I_{1eff}^2 + I_{5eff}^2 + I_{7eff}^2 + I_{11eff}^2 + \dots} \quad (1.6)$$

veya kısaca,

$$I_{eff} = \sqrt{I_{1eff}^2 + I_{heff}^2} \quad (1.7)$$

burada, I_{heff} toplam harmonik giriş akımının efektif değeridir.

Akım harmonik faktörü h_i giriş akımı için tanımlanabilir.

$$h_i = \frac{I_{heff}}{I_{1eff}} = \sqrt{\frac{I_{eff}^2 - I_{1eff}^2}{I_{1eff}^2}} = \sqrt{\frac{I_{eff}^2}{I_{1eff}^2} - 1} \quad (1.8)$$

Harmonik akım büyüklüklerinin temel yüzdeleri Tablo 1.1 de gösterilmiştir. [3]

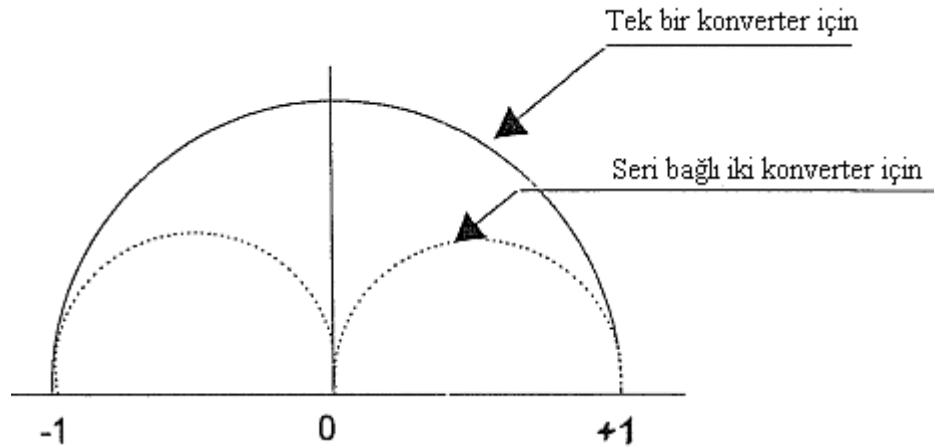
Tablo 1.1: 6, 12, 18 ve 24 darbeleri doğrultucular için AA besleme hat harmonik akımları karakteristiği [3]

Harmonik Sayısı N	Doğrultucu Sistem Darbe Sayısı, q 6 12 18 24	Harmonik Frekans Temel = 60	6 - darbeleri doğrultucu Harmonik Akım Temel yüzdesi		
			Teorik	X _c = 0,15 α = 0	X _c = 0,15 α = 32
5	x	300	20	16.2	18.9
7	x	420	14.2	9.3	12.7
11	x x	660	9.09	3.04	6.7
13	x x	780	7.69	1.86	4.96
17	x x	1020	5.88	1.261	2.6
19	x x	1140	5.26	1.08	1.78
23	x x x	1380	4.35	0.66	0.63
25	x x x	1500	4	0.53	0.28
29	x	1740	3.45	0.43	0.36
31	x	1860	3.23	0.39	0.48
35	x x x	2100	2.86	0.28	0.59
37	x x x	2220	2.7	0.24	0.59

X_c : Birim başına komutasyon reaktansı.

1.2.4 Statik güç konverterlerinin reaktif güç ihtiyacı

Hat komütasyonlu statik güç konverterleri, dönüştürülmesine veya doğrultulmasına rağmen reaktif güce ihtiyaç duyarlar. DA'a yakın çalışmada daha fazla reaktif güç gereklidir. Şekil 1.3'te konverterin DA gerilimdeki reaktif güç karşılaştırması gösterilmiştir [4].



Şekil 1.3 : Konverterin DA gerilimdeki reaktif güç karşılaştırması [4]

Reaktif güç gereksinimlerinin minimize edilmesinin birçok yolu mevcuttur. Reaktif güç tedariki ile güç faktörünün 0,95'e düzeltilmesi ekonomik bir yoldur. [5,6]

1. Faz kontrolünü sınırlayarak: Statik güç konverterleri, güç sistem geriliminin \pm %10'un üzerindeki değişme ile tatmin edici bir şekilde çalışabilir. Eğer güç sistem geriliminin dar bir aralıkta korunma ihtiyacı gerekirse, konverter transformatörünün sekonder gerilimi olarak konverter anahtarının iletim açısının minimum olduğu değer seçilir.

Diğer taraftan, konverter beslemesinin geniş bir gerilim aralığına ihtiyaç duyduğu yükte, gerilim α 'nın sınırlandırıldığı sonuçta transformatör kademeleri tarafından kontrol edilebilir.

2. Konverter trafolarının düşük reaktansı: Mıknatıslanma ve kaçak reaktans uyarımı için, reaktif güç gereksinimi vardır. Bunun yanı sıra reaktif güç ve komütasyon açısı, mıknatıslanma akımı ve kaçak reaktansların zayıflatılması ile azaltılabilir.

3. Asimetrik ve ardışık kontrol: Bu tip kontrol, iki konverterin seri olarak bağlanmasını içermektedir. Bir tanesi tam gerilimde ($\alpha=0$) çalıştırılır, diğeri de bu gerilime ekleme ve çıkarmada kullanılır. Şekil 1.3'teki kesik çizgiler, seri bağlı iki konverterin reaktif güç gereksinimlerini göstermektedir. Bu metod karmaşık ve pahalı olduğundan nadiren kullanılır.

1.3 Harmoniklerin Etkileri ve Çözüm Yöntemleri

Harmoniklerin olumsuz etkileri kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- Kompanzasyon kondansatörlerinin çok kısa sürede bozulması,
- Kompanzasyon kademe sigortalarının veya kompanzasyon şalterinin açması,
- Şalterlerde ve diğer koruma sistemlerinde anlamsız açmalar,
- Dağıtım transformatörünün beklenenden fazla ısınması,
- Özellikle hassas elektronik cihazlarda hatalar, anlamsız arıza kodları ve duruşlar,
- Ölçüm sistemlerinde hatalar,

- İletişim sistemlerindeki parazitlerdir.

Harmoniklerin çözümü için farklı yöntemler uygulanabilir. Bir çözüm yöntemi konusunda karar vermeden önce aşağıdaki adımlar izlenmelidir:

- Yapılan harmonik ölçümü sonucunda elde edilen veri doğru olarak ve mühendislik bakış açısı ile değerlendirilmelidir. Örneğin ölçüm yapılan noktada harmonik seviyeleri yüksek olabilir, ancak bunun bir zararı olmayabilir. Ölçülen değerleri sadece bazı standartlar ile karşılaştırmak yeterli olmayabilir.
- Sorunun nedeni tam olarak anlaşılmalıdır.
- Çözüm uygulaması sonucunda ulaşılmaması gereken değerler gerçekçi bir şekilde belirlenmelidir.

Harmoniklerin çözümü için genellikle aşağıdaki yöntemlerden biri veya birkaçı uygulanır:

- Kompanzasyon sisteminin filtreli kompanzasyon sistemine dönüştürülmesi,
- Aktif harmonik filtre uygulanması,
- Üçüncü harmonik filtresi gibi pasif harmonik filtre uygulamaları,
- Elektrik tesisatında yük dağılımları değiştirilerek yapılan çalışmalar sonucunda problemin çözülmesi,
- Harmonik üreten yüklerde yapılacak çeşitli çalışmalar ile problemin çözülmesi,

Hangi uygulamanın yapılacağına ve sonuçlarının neler olacağına yapılacak mühendislik çalışmaları sonucunda karar verilir. En uygun çözüm yöntemi maliyet te göz önüne alınarak belirlenir.

1.4 Kompanzasyon Nedir, Neden Yapılır?

Elektrik şebekesine bağlanan bazı tüketiciler şebekeden sadece aktif enerji çekerler. Bu durumda şebeke gerilimi ile şebekeden çekilen akım arasında herhangi bir faz farkı yoktur. Bu tip omik karakterli tüketicilere örnek olarak akkor telli lambalar ve ısıtma için kullanılan rezistanslar gösterilebilir.

Bazı tüketicilerin çektikleri akım ise şebeke gerilimi ile aynı fazda değildir. Akım ile gerilim arasında bir faz farkı bulunur. Bu durumda şebekeden aktif enerjinin yanında reaktif enerji de çekilir. Bu tip tüketicilere örnek olarak elektrik motorlarının kullanıldığı endüstri tesisleri gösterilebilir. Reaktif enerji çeken bazı tüketiciler (örneğin elektrik motorları) omik-endüktif karakterli olup şebekeden aktif enerjinin yanında endüktif reaktif enerji de çekerler. Bazı tüketiciler ise omik-kapasitif karakterlidir ve şebekeden aktif enerjinin yanında kapasitif reaktif enerji çekerler. Reaktif enerji şebekeden çekilip, tekrar şebekeye geri verilen bir enerjidir. Bu nedenle reaktif enerji çekilmesi durumunda, şebeke gereksiz yere yüklenir, şebeke kaynaklarının kullanım verimi ve kapasitesi düşer, kayıplar ise artar.

Böylece, elektrik enerji firmaları, reaktif enerji tüketimi yönetmeliklerde belirlenmiş sınır değerlerin üzerinde olan tüketicilerden reaktif enerji bedelini de talep ederler. Bu da tüketici için elektrik enerji maliyetini yükseltir.

Reaktif enerji bedelini ödemek durumunda kalmamak için reaktif güç kompanzasyonunun yapılması gereklidir. Reaktif güç kompanzasyonunun temel mantığı, yüklerin normalde şebekeden çektikleri reaktif enerjinin şebeke yerine yüke yakın bir kaynaktan karşılanmasıdır.

Birçok tüketici omik-endüktif karakterlidir. Omik-endüktif karakterli tüketicilerin normalde şebekeden çektikleri reaktif enerji tüketici yakınındaki bir konuma yerleştirilen kapasitif karakterli kompanzasyon kondansatörleri tarafından sağlanabilir. Bu işleme reaktif güç kompanzasyonu adı verilir.

Bazı durumlarda, omik-kapasitif karakterli sistemler ile de karşılaşılabılır. Bu durumda ise, reaktif güç kompanzasyonu endüktif karakterli şönt reaktörler ile yapılır.

Reaktif güç kompanzasyonunun tek yararı reaktif enerji bedeli ödememek gibi gözükse de aslında birçok yararı vardır. Reaktif güç kompanzasyonu yapmanın yararları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Reaktif enerji bedeli ödenmedi durumunda kalınmaz. Elektrik enerjisi birim maliyeti düşer.
- Hatlardan ve transformatörlerden çekilen akım düşer. Bu şekilde mevcut altyapı kullanılarak daha fazla tüketiciye hizmet verilebilir.
- Çekilen akım düştüğü için kayıplar azalır. Bu şekilde kayıpların maliyeti de azalır. Verim artar.
- Kayıplar azaldığı için, her geçen gün önemi daha da artan çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi konularda büyük rol oynayan, enerji üretimi sırasında ortaya çıkan zararlı maddeler azalır.

1.5 Geleneksel Kompanzasyon

En yaygın olarak kullanılan kompanzasyon sistemidir. Geleneksel kompanzasyon sistemleri lokal veya merkezi kompanzasyon sistemlerinde kullanılabilir. Otomatik çalışma, manuel çalışma ve sabit kompanzasyon uygulamaları yapılabilir.

Geleneksel kompanzasyonda devrede olan kondansatör grupları direkt olarak şebeke gerilimine bağlıdır.

Geleneksel kompanzasyon sistemleri, birçok uygulamada tasarımları doğru olarak yapılmış ve sistem düzgün çalışıyor ise, uygun sonuç verecektir. Ancak sistemdeki harmonik oranları yükselmeye başladığında geleneksel kompanzasyon sistemlerinde sorunlar başlar. Çünkü bu sistemlerde: [1]

- Harmoniklere karşı herhangi bir koruma yoktur.
- Kondansatörler üzerinden harmonik içeriği yüksek akımlar akabilir. Bu durumda kondansatörler kısa sürede arızalanır.
- Kompanzasyon sisteminin şebeke ile rezonansa girmesi sonucu (harmonik rezonans durumu) sonucunda kompanzasyon kademe sigortalarının atması, şalter açması gibi durumlar ile karşılaşılır.
- Ayrıca harmonik rezonans durumunda şebeke gerilimi bozulur ve harmonik içerikli duruma gelir. Bu durumdan özellikle hassas elektronik cihazlar olumsuz olarak etkilenirler.

Bu nedenler ile özellikle harmonik oranlarının yüksek olduğu veya yeni yapılan, ancak harmonik oranlarının yüksek olmasının beklendiği tesislerde geleneksel kompanzasyon sistemleri yerine filtreli kompanzasyon sistemleri tesis edilmesi doğru olacaktır.

Filtreli kompanzasyon uygulamasının gerekli olup olmadığı işletme olan tesislerde kolaylıksa yapılacak harmonik ölçümü ile, yeni kurulmakta olan tesislerde ise yüklerin tipleri incelenerek belirlenebilir.

1.6 Filtreli Kompanzasyon

Harmonik oranlarının yüksek olduğu tesislerde geleneksel kompanzasyon sistemleri ile yaşanabilecek sorunlara değinmiştik. Filtreli kompanzasyon sistemleri bu sorunlara hızlı, kolay ve ekonomik bir şekilde çözüm sağlar.

Filtreli kompanzasyon sistemlerindeki temel fark, devrede olan kondansatör gruplarının şebekeye direkt olarak bağlı olmaları yerine bir harmonik filtre reaktörü üzerinden bağlı olmalarıdır.

Değeri kullanılan kondansatör grubuna, sistemdeki baskın harmoniklere ve elde edilmek istenen sonuçlara göre özel olarak seçilmiş harmonik filtre reaktörü ile aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

- Sistem şebeke frekansında kapasitiftir. Bu şekilde reaktif güç kompanzasyonu işlevini yerine getirir.
- Güç kondansatörü veya kondansatörleri ile harmonik filtre reaktöründen oluşan kompanzasyon kademesinin rezonans frekansının (bu değer sistem tasarımı sırasında belirlenir) üzerindeki frekanslarda kompanzasyon sistemi endüktif duruma gelir. Şebeke de endüktif karakterli olduğundan harmonik rezonans olasılığı ortadan kaldırılmış olur.
- Kompanzasyon sisteminin rezonans frekansının üzerindeki frekanslarda sistemin empedansı hızlı bir şekilde artar. Bu şekilde sistemde gerilim harmonikleri bulunsa dahi kompanzasyon sisteminin yüksek empedansı nedeni ile

kompanzasyon sistemi üzerinden akacak harmonik akımları önemli ölçüde sınırlandırılmış olur.

Böylece:

- Kompanzasyon kondansatörleri harmonik akımlardan korunmuş olur.
- Kompanzasyon sistemi ile şebeke arasında harmonik rezonans durumu oluşmayacağı için harmoniklerin aşırı artması sonucu oluşabilecek kondansatör arızaları, sigorta atmaları, şalter açmaları ve aşırı gerilim bozulmaları engellenmiş olur.

Bunlara ek olarak filtreli kompanzasyon sistemleri kondansatörlerin devreye alınış anlarından çekilen yüksek darbe akımlarını önemli ölçüde sınırlandırarak kondansatörleri korurlar. Bu şekilde özellikle büyük güçlü kompanzasyon kademelerinin devreye alınmaları sırasında şebeke geriliminde oluşan olumsuzluklar da giderilmiş olur.

Filtreli kompanzasyon sistemleri her ne kadar geleneksel kompanzasyon sistemlerine yapı olarak çok benzeseler de gerekli mühendislik çalışmalarının doğru olarak yapılması, malzemelerin uygun olarak seçilmesi ve panonun doğru olarak tasarlanması, sistemin düzgün çalışması ve beklenen başarıyı sağlaması açısından çok önemlidir. [1]

Filtreli kompanzasyon sistemlerinde aşağıdaki noktalara özellikle dikkat edilmelidir:

- Bu sistemlerde kullanılan reaktörler ile kondansatör uç gerilimleri şebeke geriliminin üzerindedir. Nominal gerilimi şebeke gerilimi olan kondansatörler bu sistemlerde kullanılamazlar.
- Kondansatörlerin belirli bir süre şebeke geriliminin üzerindeki bir gerilime dayanabilmesi filtreli kompanzasyon sistemlerinde kullanılabilmesi için yeterli değildir.

- Kullanılacak kondansatörlerin nominal gerilimi şebeke gerilimin üzerinde olmalıdır. Nominal gerilimin en az ne kadar olması gerektiği seçilen rezonans frekansına bağlıdır.
- Rezonans frekansı sistemdeki baskın harmonikler dikkate alınarak seçilmelidir. Rezonans frekansının yanlış seçilmesi durumunda sistem iyi performansta çalışmayacağı gibi harmonik rezonans olasılığını da ortadan kaldırmayacaktır.
- Sistem bir rezonans devresi olduğu için kullanılan reaktörler kullanılan kondansatörlere göre seçilmelidir. Reaktörün akım değerinin yeterli olması seçim için yeterli bir kriter değildir.
- Standart ürün kataloglarında yer alan reaktörler ile birlikte hangi kondansatörlerin kullanılması gerektiğini gösteren bir seçim tablosu da genellikle yer alır. Bu tabloya uyulmalıdır. Uyulmayacak ise mutlaka konunun uzmanı bir kişiye danışılmalıdır.
- Pano tasarlanırken reaktörler nedeni ile oluşacak ek ısı kayıpları dikkate alınmalıdır.
- Güç kondansatörlerinin artan sıcaklık ile zarar görebilecekleri, bu neden ile pano içerisinde uygun konuma yerleştirilmeleri gerektiği ve özellikle reaktörlerin hemen yanlarında bulunmamaları gerektiği bilinmelidir.

Filtreli kompanzasyon sistemlerinde özellikle kondansatör ve reaktörlerin yanlış olarak seçilmesi sistemin rezonans frekansını uygun olmayan bir noktaya getirerek beklenmeyen sonuçlar oluşmasına (rezonans durumları gibi) neden olabilir.

1.7 Filtreli Statik Kompanzasyon

Bilindiği üzere, geleneksel kompanzasyonda kondansatörler veya kondansatör grupları kontaktörler aracılığı ile anahtarlanırlar. Bu durum çeşitli problemleri beraberinde getirir:

- Mekanik anahtarlama cihazları olan kontaktörler, kondansatör gruplarını anlık olarak devreye alıp devreden çıkartamazlar.
- Bir kondansatör grubu devre dışı bırakıldıktan sonra, kondansatör grubunun boşalması (deşarj olması) için belirli bir süre geçmesi gerekir. Bu süre, kullanılan

boşaltma yöntemine göre değişiklik gösterir. Boşaltma direnci kullanılması durumunda boşaltma süresi dakika seviyesinde, boşaltma reaktörü kullanılması durumunda ise saniyeler seviyesindedir (10 saniye gibi). Boşaltma işlemi sırasında kondansatör grubunun tekrar devreye alınması kondansatörler zarar verir ve kullanım sürelerini kısaltır. Bu neden ile kondansatör grupları reaktif güç kontrol rölesi üzerinde ayarlanan boşaltma süresinden önce tekrar devreye alınmazlar.

Reaktif güç gereksinimi hızlı değişen sistemlerde (örneğin punta kaynak makineleri olan bir tesis) bu iki durum kondansatör gruplarının kullanımını önemli ölçüde sınırlar.

Ayrıca:

- Özellikle büyük güçlü kondansatör gruplarının devreye alınması anında şebeke geriliminde dalgalanmalar (osilasyonlar) oluşabilir. Bu durum hassas elektronik cihazları olumsuz yönde etkiler.

Yük koşullarının hızlı değiştiği bu gibi durumlarda statik kompanzasyon sistemleri (bazı firmalar tarafından dinamik kompanzasyon olarak da adlandırılır) tesis edilmelidir.

Bu sistemlerde geleneksel kompanzasyon sistemlerinden farklı olarak aşağıdaki komponentler bulunur: [1]

- Reaktif güç gereksinimini çok hızlı olarak ölçebilen ve kondansatör gruplarına çok hızlı kumanda edebilen özel tip reaktif güç kompanzasyon rölesi,
- Kontaktörler yerine tristör modülleri,
- Normal NH sigortalar yerine tristör modüllerindeki tristörleri korumak için birçok durumda NH yarıiletken tipi sigortalar,
- Kondansatör devreye alma anlarında oluşabilecek ve tristörlere zarar verebilecek akım darbelerini engellemek için harmonik filtre reaktörleri veya akım sınırlama reaktörleri kullanılır.

Statik kompanzasyon sistemlerinde kullanılan özel reaktif güç kontrol rölesi reaktif güç gereksinimini sürekli olarak ölçer ve devreye alınması gereken kondansatör gruplarına bağlı tristör modüllerine kumanda eder. Tristör modülleri kondansatör gruplarını gecikmeksizin devreye alır. Bu şekilde reaktif güç kompanzasyonu sağlıklı bir şekilde yapılır.

Statik kompanzasyon sistemlerinin kalitesinde reaktif güç kontrol rölesinin ölçüm ve kumanda süresi ile tristör modülünün kondansatör grubunu devreye alma süresi çok büyük önem taşır. Piyasada farklı özelliklerde röle ve tristör modülleri bulunmaktadır. İyi bir röle ve tristör modülü için bu süreler bir periyottan (50 Hz'lik şebekede 20 ms) kısadır.

Statik kompanzasyon sistemlerinin avantajları şu şekilde sıralanabilir: [1]

- Reaktif güç koşullarındaki değişikliklerin çok hızlı bir şekilde ölçülmesi ve gerekli kondansatörlerin herhangi bir deşarj süresi beklemeksizin istenilen sıklıkta devreye alınıp devreden çıkartılabilmesi,
- Kondansatörlerin devreye alınma anlarının şebeke geriliminde herhangi bir olumsuz etkiye (salınım gibi) neden olmaması,
- Kondansatörlerin tristör modülleri aracılığı ile şebeke geriliminin en uygun anında devreye alınması sonucu kondansatörlerin korunması ve kullanım sürelerinin uzatılması,
- Hızlı değişen yük koşullarında reaktif güç kompanzasyonunun sağlıklı bir şekilde yapılması sonucu reaktif enerji kullanımından dolayı ortaya çıkabilecek reaktif enerji bedeli ödeme durumunun ortadan kaldırılması sonucu enerji giderlerinde tasarruf sağlanması,
- Kontaktörlü sistemlerde kondansatör devreye giriş ve çıkış anlarında kontaktörlerin oluşturduğu ve panonun kişilerin çalışma ortamında bulunması durumunda rahatsız edici olabilecek seslerin engellenmesi,
- Tristör modüllerinin hareketli parça içermemeleri nedeni ile kontaktörlerde karşılaşılan aşınma ve yıpranma problemlerinin olmaması sonucu bakım gereksinimlerinin azalmasıdır.

Statik kompanzasyon sistemleri filtreli olarak tesis edilmeleri durumunda (yaygın uygulama) filtreli kompanzasyon sistemlerinin harmonikleri karşı sağladıkları avantajları da sağlarlar.

2. MAGNETİK DEVRE, REAKTÖR TİPLERİ VE ENDÜKTANS HESABI

2.1 Giriş

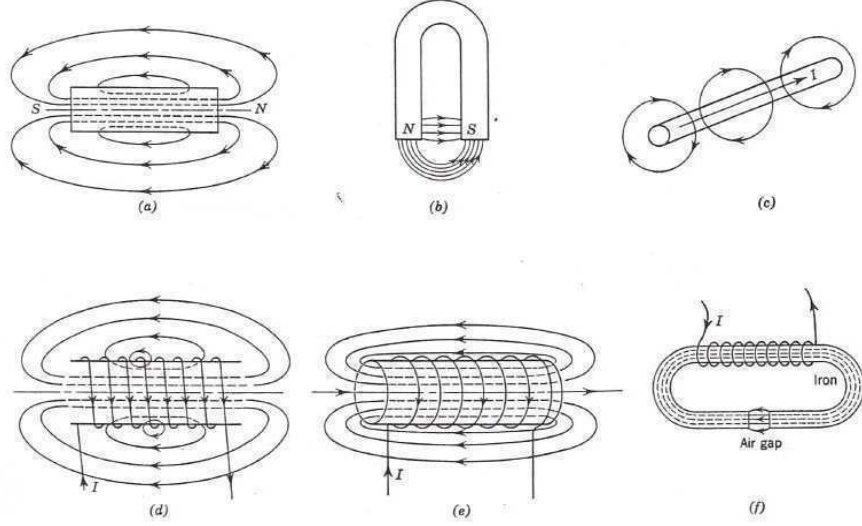
Elektromekanik sistemler, Faraday, Biot-Savart ve Amper yasaları üzerine kurulmuştur. Bu yasalara ilişkin, magnetik alan, magnetik akı yoğunluğu, ferromagnetik malzemeler, magnetik alan şiddeti, histerezis çevrimi, histerezis kaybı, fuko kayıpları ve relüktans hakkında tanım ve açıklamalar aşağıda yer almaktadır.

2.1.1 Magnetik alan akısı ve akı yoğunluğu

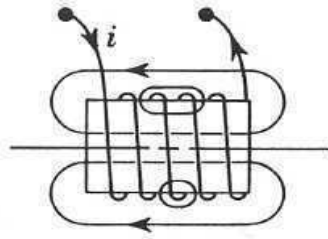
Faraday yasasına göre, “ Bir magnetik alan içinde hareket eden ya da hareket etmeyen, ancak halkaladığı akısı zamanla değişen iletkenlerde bir gerilim meydana gelir”. Bio’Savart yasasına göre ise, “Bir magnetik alan içinde akım taşıyan iletkenlere bir kuvvet etki eder”. Bu iki yasa, elektromekanik enerji dönüşümü için bir magnetik alana gereksinim olduğunu ortaya koymaktadır.

Magnetik alan, elektrik yüklerinin hareketi sonucunda ortaya çıkan bir etkidir. Bir maddenin en küçük parçası olan atomlarda negatif yüklü olan elektronlar, çekirdek etrafında yörüngesel bir hareket yaptıkları gibi, kendi eksenleri etrafında da bir dönme hareketi yaparlar. Elektrik akımının yüklü parçacıkların hareketi sonucunda meydana gelmesi nedeniyle bu hareketlere, bir çeşit mikroskopik akımlar gözüyle bakılabileceği, tabii ve yapay mıknatısların magnetik özellikler göstermesinde etkin oldukları ilk kez Ampere tarafından ileri sürülmüştür. Magnetik etkilerin, söz konusu bu mikroskopik akımlardan ileri geldiği savı, günümüzde de artık kesinlik kazanmıştır. Bu sava göre elektrik yüklü parçacıklar hareket halinde ise, ortamda bir değişiklik meydana gelir. İşte akım taşıyan bir bobinin ya da bir mıknatısın bulunduğu ortamda magnetik kuvvet olarak ortaya çıkan bu değişiklik, magnetik alan olarak adlandırılır. Magnetik alan; doğrultusu, yönü ve şiddeti ile belirlenen vektörel bir büyüklüktür. Her hangi bir ortamdaki magnetik alan, kuvvet çizgileri ya da

magnetik akı çizgileri ile gösterilir. Kuvvet çizgileri kapalı bir çevrim oluşturur. Şekil 2.1’de değişik yapıdaki mıknatıs ve akım taşıyan bobinlerde söz konusu olan magnetik alanın kuvvet çizgileri ile gösterilimleri verilmektedir. [7,8]



Şekil 2.1: Farklı yapıdaki mıknatıs ve akım taşıyan bobinlerde magnetik alan değişimleri [7]



Şekil 2.2: Akım taşıyan bir bobinde kuvvet çizgileri [7]

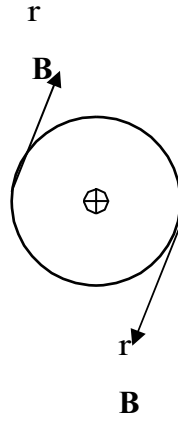
Şekil 2.1’de verilen çubuk ve at nalı mıknatıslardan da görüleceği üzere kuvvet çizgileri, N kutbundan çıkıp S kutbuna girerek mıknatıs içinden geçerek kapalı bir yol oluşturur. İletkenlerden oluşan bir bobin göz önüne alınır ve bu bobinden bir akım geçirilirse, yukarıda da belirtildiği gibi, bir magnetik alan meydana gelir. Bu alanın belirtilmesinde kullanılan kuvvet çizgileri, bobin ekseninde olmak üzere bobinin bir tarafından girip diğer tarafından çıkarlar (Şekil 2.2). Mıknatıslarda olduğu gibi, kuvvet çizgilerinin çıktığı bobin ucu N, çıktığı uç ise S kutbunu gösterir.

Magnetik alan oluşturulmasında üç değişik yol söz konusudur. Bunlar; elektrik akımı, daimi mıknatıslar ve elektrik alanın değişimidir. Bunlarla ilgili açıklamaları vermeden önce ilgili bazı kavramları açıklamak yerinde olacaktır.

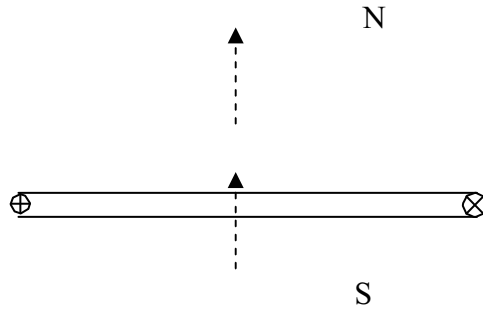
Magnetik Akı Yoğunluğu;

Bir magnetik alan içinde birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı magnetik akı yoğunluğu ya da magnetik endüksiyon olarak adlandırılır. Magnetik akı yoğunluğu vektörü, her noktada kuvvet çizgilerinin teğetleri doğrultusundadır. Magnetik alanın yönünü de belirten magnetik akı yoğunluğu yönü, bir N – S mıknatısında N kutbundan S kutbuna doğrudur. Akım taşıyan bir iletkende ise, merkezi iletken üzerinde olan daireye teğet olup, yönü ise akım yönüne bağlıdır. Akım ve magnetik akı yoğunluğu vektörlerinin doğrultuları arasındaki ilişki, sağ el burğu kuralıyla belirlenir. Başparmak akım yönünü göstermek üzere diğer parmakların doğrultusu, alanın ya da magnetik akı yoğunluğu doğrultusunu gösterir. Bir iletkende akım içeri doğru ise “+” simgesi ile, dışarı doğru ise “x” ile gösterildiğinde gösterildiğinde sağ el burğu kuralına göre içeri doğru olan bir akım tarafından oluşturulan magnetik alan yönü Şekil 2.3’te gösterildiği gibi olur. B simgesi ile gösterilen magnetik akı yoğunluğu uluslararası birim sisteminde, $[Wb/m^2]$ simgesi ile gösterilen weber/m² ile ölçülür.

Bir düzlemde bulunan ve kapalı bir çevrim oluşturan bir iletken göz önüne alınır ve bir akım taşıdığı varsayılırsa söz konusu düzlemde akımın girdiği ve çıktığı uçlarda kuvvet çizgileri ile gösterilen bir magnetik alan meydana gelir (Şekil 2.4). Yukarıda verilen açıklamalara göre, akım ve magnetik akı yoğunluğu şekilde gösterildiği gibi olur. Diğer taraftan gene yukarıda belirtildiği üzere, bir mıknatısta kuvvet çizgileri N kutbundan S kutbuna doğrudur. Bu nedenle Şekil 2.4’te verilen iletkenin üst kısmı N kutbu, alt kısmı ise S kutbu olur. Kutup terimi bir noktayı göstermesine karşın burada N kutbu, kuvvet ya da endüksiyon çizgilerinin iletkenin ya da bobinden dışa doğru, S kutbu ise bobinden içeri doğrudur. Bunun yanında kuvvet çizgilerinin kapalı bir yol oluşturduğu kısımlarda magnetik alan kuvvetli, kapalı yol oluşturmadığı kısımlarda ise zayıftır.



Şekil 2.3: Akım ve magnetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki [9]



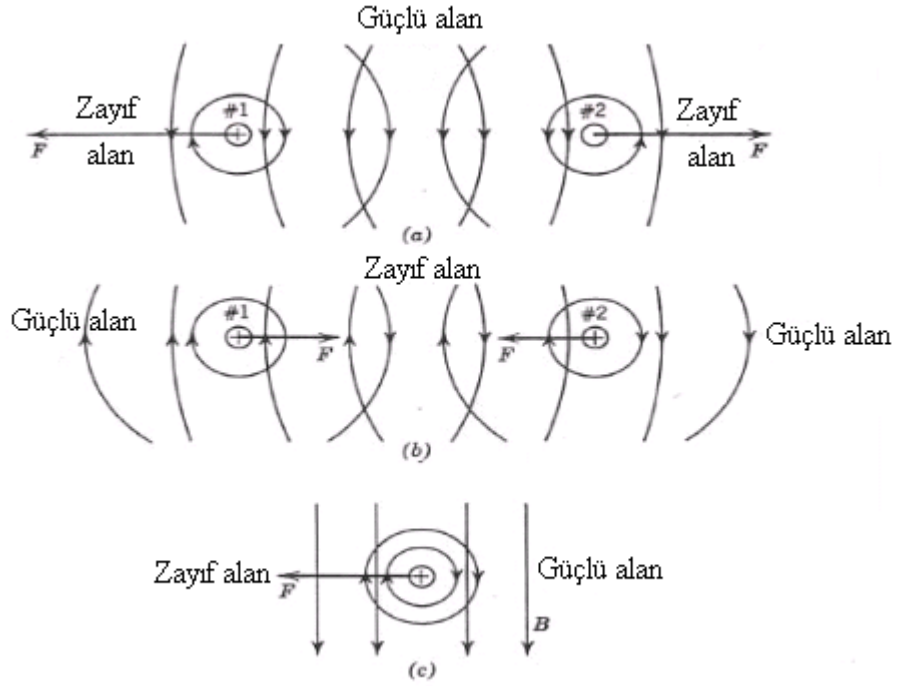
Şekil 2.4: Akım taşıyan bir çevrede kuvvet çizgileri [9]

Şekil 2.5.a'da birbirine ters yönde akım taşıyan paralel iki iletken verilmiştir. Yukarıda tanımlanan burğu kuralına göre kuvvet çizgilerinin yönü şekilde gösterildiği gibi olacaktır. Kuvvet çizgilerinin yönleri, iletkenlerin arasında aynı olduğundan bileşke magnetik alan, bunların toplamı ile belirleneceğinden iletkenler arasında kuvvetli, dolayısı ile enerji iki iletken arasında toplanacak ve oluşacak tepki kuvveti iki iletkeni birbirinden ayırma özelliğinde olacaktır. Buna karşın iletkenlerin dış kısımlarında kuvvet çizgileri ters yönlü olduklarından bunların farkı ile belirlenecek magnetik alan zayıf olacaktır. Şekil 2.5.b'de bu kez iletkenler aynı yönde akım taşımaktadır. Bu nedenle iletkenler arasında magnetik alan zayıf, dolayısı ile oluşacak kuvvet iletkenleri birbirine doğru çekecek özellikte olacaktır. Buna karşın, dış kısımlarda ise magnetik alan kuvvetli olacaktır. Şekil 2.5.c'de ise düzgün bir magnetik alan içinde akım taşıyan bir iletken verilmiştir. Magnetik alan ve akım sonucunda oluşan kuvvet çizgisi yönleri şeklin sağ tarafında aynı olduğundan bileşke alan kuvvetli, sol tarafta ise yönler ters olduğundan bileşke alan

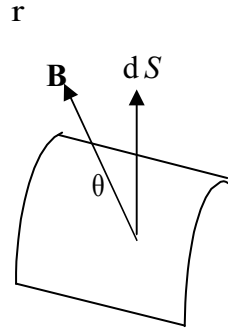
zayıf olacaktır Kuvvet, magnetik akı yoğunluğu yüksek olan kısımdan alçak olan kısma doğru olacaktır. [9]

Magnetik Alan Akısı;

Yukarıdaki bölümde de belirtildiği gibi birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı magnetik akı yoğunluğu olarak tanımlanır. Bu tanımdan hareketle magnetik alanda alınan belli bir yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı, magnetik akı olarak adlandırılır. Φ simgesi ile gösterilen magnetik akı, uluslararası birim sisteminde [Wb] simgesi ile gösterilen weber ile ölçülür.



Şekil 2.5: Akım taşıyan iletkenlerde magnetik alan [9]



Şekil 2.6: Magnetik akı tanımı [9]

Şekil 2.6’da verilen bir magnetik alan içindeki kapalı bir yol ya da akım taşıyan bir iletken tarafından oluşturulan bir çevrim için magnetik akı tanımı uygulandığında, genel olarak magnetik alan akısı,

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \times d\mathbf{S} \quad (2.1)$$

$$\phi = B \times S \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir.

2.1.2 Ferromagnetik malzemeler

Faraday, yaptığı araştırmalar sonunda tüm malzemelerin, magnetik alana bir tepki gösterdiğini ve bu tepki nedeniyle karşılıklı bir etkileşimin söz konusu olmasından dolayı malzemelerin üç grupta toplanabildiğini göstermiştir;

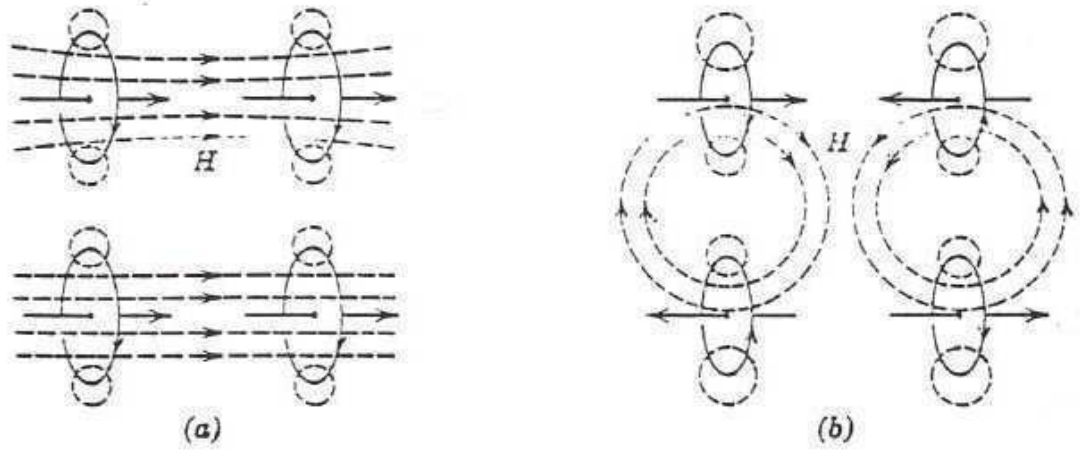
- i) Diamagnetik Malzemeler: Bağlı magnetik geçirgenlikleri $\mu_r < 1$ olan bu tür malzemeler, güçlü bir magnetik alana dik şekilde kendilerini yönlendirirler. Diamagnetizma, tek sayıda elektronlara sahip ve tamamlanmamış içi kabuğu olmayan malzemelerde görünür. Radyum, potasyum, magnezyum, hidrojen, bakır, gümüş, altın ve su diamagnetik gruba girerler.
- ii) Paramagnetik Malzemeler: Bağlı magnetik geçirgenlikleri $\mu_r > 1$ olan bu tür malzemeler, güçlü bir magnetik alana paralel şekilde kendilerini yönlendirirler.

Paramagnetizma çift sayıda elektronlara sahip malzemelerde görülür. Hava, alüminyum ve silisyum paramagnetik gruba girer.

iii) Ferromagnetik Malzemeler: Demir, nikel, kobalt ve alaşımlarını içeren malzemeler bu gruba girer.

Diamagnetik ve paramagnetik malzemelerin bağıl magnetik geçirgenlikleri 1 civarındadır. Bu nedenle uygulama her iki malzemeler için $\mu_r = 1$ alınır.

Yukarıda da belirtildiği gibi bir malzemenin atomları, çekirdekleri etrafında yaptıkları yörüngesel hareket yanında kendi eksenleri etrafında da bir dönme hareketi yaparlar. Bu hareketler malzemenin magnetik özelliklerini belirler. Elektrik alanı içinde bulunan duran ya da hareket eden bir elektrik yükü, elektriksel bir kuvvetin etkisi altında kalır. Buna karşın magnetik alan içinde bulunan bir yük, ancak hareket ettiği zaman bir magnetik kuvvetin etkisinde kalır. Bu nedenle her bir elektron kendi arasında yaptığı dönme hareketi sonucunda bir magnetik moment meydana getirir. Çoğu atomda, elektronların simetrik olarak dizimi nedeni ile net magnetik moment sıfırdır. Sadece elektronların iç kabuğu tamamlanmamış atomlarda magnetik moment söz konusudur. Başka bir deyişle magnetik moment, kendi eksenleri etrafındaki dönme yönü ters olan elektronlarla birleşmeyen elektronların, kendi eksenleri arasındaki hareketi sonucunda meydana gelir. Atomik sayıları 21 ila 28, 39 ila 45, 57 ila 78 arasında ve 89 ve büyük olan malzemelerde magnetik moment söz konusudur. En önemli aralık 21 ila 28 arasında olup, bu aralıkta bulunan vanadium, krom, manganez, demir, nikel, kobalt ve bunların alaşımlarında net magnetik moment sıfırdan farklıdır. Bu malzemelere ferromagnetik malzemeler adı verilir. Bu gibi malzemelerde birbirine komşu atomların dizilişleri Şekil 2.7a'daki gibi olup, yapıları nedeni ile elektronlarının döngü eksenleri hep aynı yönde olduğundan net magnetik moment sıfırdan farklıdır. Bunun yanında magnetik momentleri, Şekil 2.7 b'deki gibi birbirine ters olan malzemelerde net magnetik moment sıfır olup, bu malzemelere antiferromagnetik malzeme adı verilir. Ferromagnetik malzemelerde magnetik akı, atomların sıralanma yönü doğrultusu boyunca bir süreklilik içindedir. Buna karşın antiferromagnetik malzemelerde, akı sadece komşu magnetik momentleri halkalar (Şekil 2.7 b) ve akım taşıyan diğer bobinleri (atomları) halkalamaz. [10,11]



Şekil 2.7: a) Ferromagnetik malzeme b) Antiferromagnetik malzeme [10]

Sadece demir, nikel ve kobaltdan oluşan küçük bir saf elementler grubunda, aynı sıradaki momentler normal ısıda ferromagnetizma meydana getirir. Bununla beraber, normal ısının biraz altında bu elementlerdeki ferromagnetizma etkilenmez. Isı sonucunda oluşan kuvvetler, tamamen komşu atomlarda magnetik moment oluşturan elektronlar arasındaki mesafeye bağlıdır. Mesafenin belli bir değerinde ferromagnetik olan malzeme, bu belli değer altında magnetik olmayan malzeme duruma geçer. Antiferromagnetik malzemelerde bu mesafe oldukça küçüktür. Antiferromagnetik malzemelerde bu mesafe, magnetik olmayan malzemelerin alaşımıyla büyütülebilir. Böylece antiferromagnetik malzemeden, ferromagnetik alaşım meydana getirilebilir. Değişik bir uygulama, farklı magnetik momentlere sahip farklı dizilimli iki grup atom yapısından bir magnet elde edilebilmesidir. Bu yapı ferromagnetik bir yapı olup, bu gruptaki malzemeler ferrit olarak bilinmektedir.

Ferromagnetik malzemeler magnetik özellikleri bakımından, diamagnetik ve paramagnetik malzemelere göre ayrıcalık gösterir.

- Bağlı magnetik geçirgenlikleri 1'den çok büyüktür.
- Bağlı magnetik geçirgenlikleri, malzemenin cinsine, malzemeye daha önce uygulanan magnetik işlemlere ve magnetik alan şiddetinin değerine bağlı olarak değişkendir.
- Paramagnetik ve diamagnetik malzemelerde B magnetik akı yoğunluğu (endüksiyon) ile H alan şiddeti arasında doğrusal bir ilişki varken, ferromagnetik

malzemelerde bu ilişki doğrusal değildir.

- Magnetik histerezis değişimine sahiptirler.
- Ferromagnetik malzemeler, Curie sıcaklığı üzerinde paramagnetik malzeme durumuna geçerler.

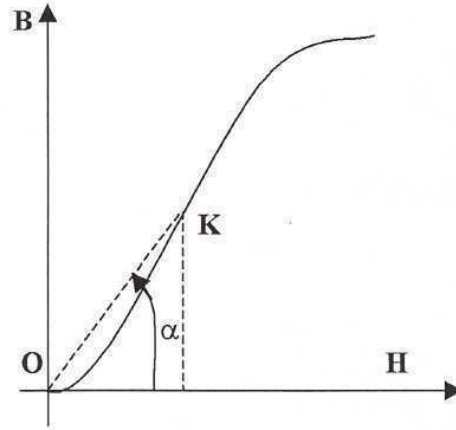
2.1.3 Magnetik alan şiddeti

Elektrik akımı taşıyan bir iletkenin bulunduğu ortamda meydana gelen magnetik alan ile bu akım arasındaki fiziksel ilişki, magnetik alan şiddeti olarak adlandırılan H ile belirlenir. Uluslararası birim sisteminde, [A/m] simgesi ile gösterilen amper/m ile ölçülür. Bir sistemde i akımının varlığı, magnetik akı yoğunluğunun oluşmasına yol açan magnetik alan şiddetine neden olur. Herhangi bir noktadaki magnetik akı yoğunluğu, H magnetik alan şiddeti yanında ortama da bağlıdır. Ortam, magnetik geçirgenlik ya da permeabilite olarak adlandırılan fiziksel bir büyüklükle belirlenir. [12,13]

Magnetik geçirgenlik (permeability), malzemenin akıyı iletme yeteneğidir. Belli bir akı yoğunluğundaki (endüksiyondaki) magnetik geçirgenliğin genliği, bu noktadaki kolay mıknatıslanmanın bir ölçütüdür. Yukarıda da belirtildiği gibi para ve diamagnetik malzemelerde magnetik akı yoğunluğunun H magnetik alan şiddetine göre değişimi doğrusaldır. Bu nedenle bu tür malzemelerde magnetik geçirgenlik sabittir. Buna karşın ferromagnetik malzemelerde H alan şiddetindeki küçük bir değişim, B magnetik akı yoğunluğunda büyük değişikliklere neden olur. Dolayısı ile magnetik geçirgenlik ferromagnetik malzemelerde magnetik akı yoğunluğu H'nın belli bir değerine kadar sabit kalırken, bu değerden sonra doğrusallıktan ayrılır.

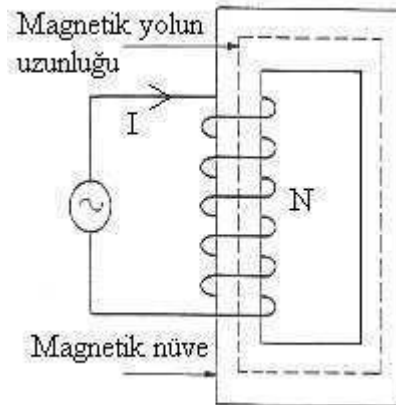
$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.3)$$

bağıntısı ile tanımlanan magnetik geçirgenlik (Permeabilite) ya bir çizelge ile, ya da mıknatıslanma eğrisi veya B-H eğrisi olarak adlandırılan eğrilerle verilir.



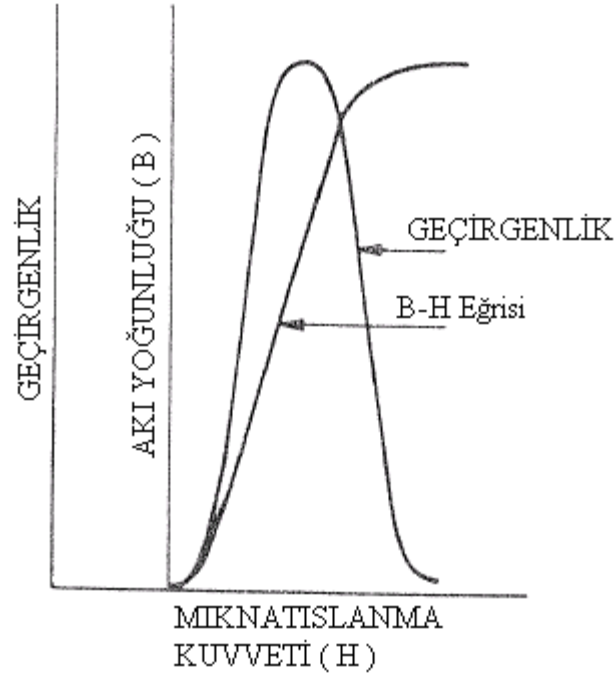
Şekil 2.8: Mıknatıslanma eğrisi [11]

Şekil 2.8’de başlangıçta mıknatıslanmamış olan bir malzemenin mıknatıslanma eğrisi verilmiştir. Bu eğriyi çizmek için ferromagnetik malzemedan yapılmış uygun bir çekirdek hazırlanıp, üzerine sarılan (yerleştirilen) ve uyarma sargısı olarak adlandırılan sargıdan akım geçirerek mıknatıslamak gerekir (Şekil 2.9). Eğri üzerinde herhangi bir noktadaki magnetik geçirgenlik, magnetik akı yoğunluğunun alan şiddetine olan oranı ile hesaplanır. Bu değer, eğri üzerinde alınan noktanın O noktası ile bileştirilerek elde edilen doğrunun, yatay H eksenini ile yaptığı açının tanjantı ile orantılıdır. Orantı katsayısı, B ve H için seçilen ölçeklere bağılıdır. O’dan eğriye çizilen teğetin eğriye değdiği noktada magnetik geçirgenlik maksimumdur.



Şekil 2.9: Ferromagnetik bir çekirdeğin mıknatıslanması [11]

μ ile H arasındaki ilişkiyi gösteren eğri Şekil 2.10'da verilmiştir. Birbirinden farklı olan birçok magnetik geçirgenlik tanımı vardır. Bunlar farklı alt indislerle gösterilir.



Şekil 2.10: Magnetik geçirgenliğin magnetik alan şiddeti ile değişimi [11]

μ_0 ; Mutlak magnetik geçirgenlik, boşluğun magnetik geçirgenliğidir.

μ_i ; Başlangıç magnetik geçirgenlik (Initial permeability),

μ_e ; Etkin (efektif) magnetik geçirgenlik. Magnetik devre homojen değilse, başka bir deyişle magnetik devre hava aralığını içeriyorsa hava aralıklı yapıya eşdeğer bir endüktans değeri veren aynı şekil, aynı boyutta ve aynı relüktansa sahip fiktif bir hava aralıksız yapının magnetik geçirgenliğidir.

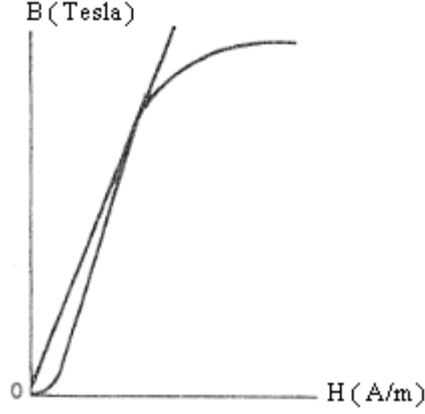
μ_r ; Bağlı magnetik geçirgenlik (relative permeability). Boşluğa göre malzemenin magnetik geçirgenliği,

μ_n ; Normal magnetik geçirgenlik (normal permeability). Miknatıslanma eğrisi üzerindeki herhangi bir noktadaki B/H oranı,

μ_{max} ; Maksimum magnetik geçirgenlik (maximum permeability). Orijinden diz noktasına çizilen teğetin yatay eksenle yaptığı açının tanjantı (Şekil 2.11),

μ_p ; Darbe magnetik geçirgenliği (pulse permeability). Unipolar uyarma için magnetik akı yoğunluğunun tepe değerinin magnetik alan şiddetinin tepe değerine olan oranıdır.

μ_m ; Malzeme geçirgenliği. 50 Gauss'tan daha küçük akı yoğunluğunda ölçülen eğimdir.



Şekil 2.11: Maksimum magnetik geçirgenlik (permeability) [11]

Yukarıda tanımları verilen magnetik geçirgenlikler arasında uygulamada en çok karşılaşılanları, başlangıç magnetik geçirgenliği ve maksimum magnetik geçirgenliktir. Bir çok uygulamada $H = 0$ değerindeki başlangıç permeabilite yerine $H = 0.4$ A/m deki permeabilite kullanılır ve μ_4 ile gösterilir.

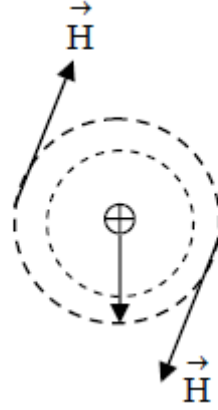
(2.3) ve (2.4) bağıntıları göz önüne alındığında magnetik akı yoğunluğu ve magnetik alan şiddeti arasında,

$$B = \mu_o \times \mu_r \times H = \mu \times H \quad (2.4)$$

eşitliği yazılır. Ortamın vakum ya da buna çok yakın bir özellik gösteren hava (boşluk) olması durumunda bu eşitlik aşığıdaki gibi yazılır.

$$B = \mu_o \times H \quad (2.5)$$

Buna göre, akım taşıyan bir iletkende magnetik akı yoğunluğu, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi olduğundan H magnetik alan şiddeti vektörü de Şekil 2.12'deki gibi olur.



Şekil 2.12: Bir iletkenen akım geçirildiğinde meydana gelen alan şiddeti [14]

Yukarıda da belirtildiği gibi, mıknatıslanma eğrilerinde B'deki artışın önce zayıf olduğu ve sonra kuvvetlenerek kıvrıldığı, bu noktadan (dirsek noktasından) sonra tekrar zayıfladığı görülür. Eğrilerin yatıklaştığı noktada endüksiyonu biraz daha arttırmak için alan şiddetinde büyük bir değişiklik yapmak gerekir. Bu bölgede magnetik malzeme doymaya girer. Doyma bölgesinde çalışıldığı zaman, uyarma sargısından geçecek akımlar daha yüksek, dolayısıyla uyarma sargısının boyutları daha büyük olacaktır. Bu nedenle uygulamada endüksiyonun değerleri doyma bölgesinin altında tutulur. [14]

μ_r , Ferromagnetik malzemelerin boşluğa göre tanımlanan bağıl magnetik geçirgenliğini göstermektedir. Elektrik makineleri ve transformatörlerde kullanılan malzemeler için tipik değeri 2000 ile 6000 arasında değişir.

Akım yoğunluğundaki artışı gösteren,

$$J = B - B_o \quad (2.6)$$

farkına magnetik polarizasyon adı verilir. Birimi, magnetik akı yoğunluğunki gibi [Wb/m²]. Bu artışa, ferromagnetik malzeme neden olmaktadır. Bu nedenle J, malzemenin magnetik akı yoğunluğundaki payını gösterir. Eğer, M mıknatıslanma şiddeti olarak tanımlanırsa,

$$J = \mu_o \times M \quad (2.7)$$

ve (2.6) eşitliği,

$$B = \mu_o \times (H + M) \quad (2.8)$$

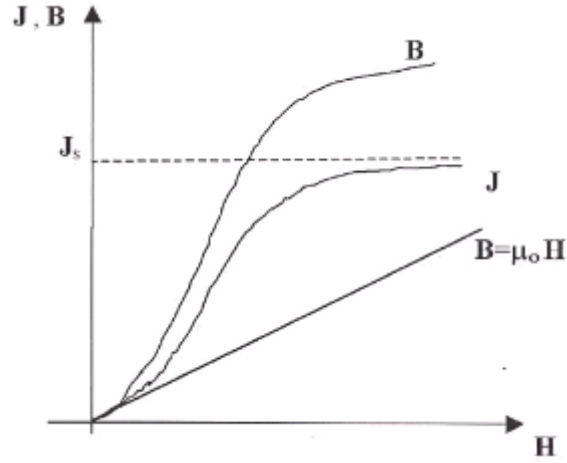
olur. M'nin birimi H gibi [A/m]'dir. Diğer bir ifade ile (2.6) eşitliği,

$$J = \mu_o \times (\mu_r - 1) \times H = \mu_o \times k_r \times H = k \times H \quad (2.9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $k_r = (\mu_r - 1)$ olup, bağıl süseptibilite adını alır. Birimsiz bir büyüklüktür. Birimi [H/m] olan $k = \mu_o k_r$ ise magnetik süseptibiliteyi gösterir. Magnetik süseptibilite paramagnetik malzemelerde pozitif ve diamagnetik malzemelerde negatiftir. Ancak bu maddelerde $\mu_r = 1$ olduğundan sıfıra eşittir. Ayrıca boşlukta da sıfırdır.

Şekil 2.13'te J - H eğrisi verilmiştir. Bu eğrinin mıknatıslanma eğrisinden farkı, J'nin H yükseldikçe sürekli bir şekilde artmayarak J_s ile gösterilen bir sınır değere yaklaşmasıdır. Bu sınır değere doyma polarizasyonu (saturation polarization) adı verilir. J_s magnetik polarizasyonu, 0.75 ila 1.5 [web/m2] arasında değişen değerler alır. Mıknatıslanma eğrisi, J - H eğrisine $B_o = \mu_o \times H$ doğrusu üstündeki endüksiyonlar eklenerek elde edilebilir. Doyma bölgesindeki artış sadece B_o ile ilgili olup, ferromagnetik malzemenin herhangi bir payı yoktur. Doyma polarizasyonuna karşılık düşen doyma mıknatıslanması $M_s = J_s / \mu_o$ 'dır.

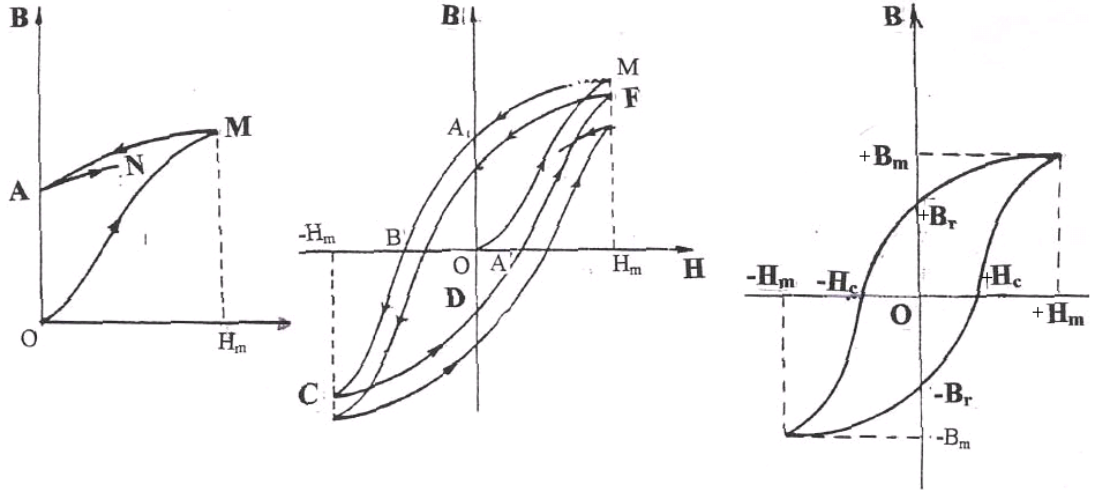
Bu açıklamalar elektromekanik enerji dönüşümü yapan sistemlerde daha büyük magnetik alan oluşturulması için ferromagnetik malzemelerin kullanılması gereğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.13: J'nin H'ya göre değişimi [14]

2.1.4 Histerezis çevrimi

Ferromagnetik malzemeler, histerezis çevrimi ile karakterize edilir. Histerezis çevrimi, tam bir mıknatıslanma periyodunda malzemenin magnetik alan şiddeti H ile magnetik akı yoğunluğu B arasındaki ilişkiyi gösterir.



Şekil 2.14: Histerezis çevriminin elde edilişi [15]

Başlangıçta mıknatıslanmamış ($B=0$) olan malzemenin ilk mıknatıslanma eğrisi Şekil 2.14.a'da OM ile gösterilmiştir. Uyarma akımı dolayısı ile H magnetik alan şiddeti arttırıldıkça B magnetik akı yoğunluğu da doyma noktasını gösteren M noktasına

kadar artar. Bu noktadaki alan şiddeti H_M ile gösterilmiştir. Bu noktadan itibaren uyarma akımı, dolayısı ile H alan şiddeti azaltılarak geri dönecek olursa B 'nin daha önce H 'nin arttırılırken aldığı değerlerden daha büyük değerler alarak MA eğrisi boyunca azaldığı görülür. Uyarma akımı kesilerek $H=0$ yapılsa bile B , OA ile gösterilen bir değeri alır. H 'nin aynı değerleri için B 'nin farklı değerler alması olayına histerezis adı verilir. Eğer H tekrar aynı yönde arttırılırsa B magnetik akı yoğunluğu bu kez AN eğrisi boyunca artar. Histerezisden dolayı B 'nin alacağı değer daha önce malzemenin geçirmiş olduğu magnetik hallere bağlı olmaktadır. Eğer A noktasına gelindikten sonra uyarma akımının yönü değiştirilerek magnetik alan şiddeti HD değerine kadar arttırılırsa B magnetik akı yoğunluğu ABC eğrisi boyunca değişir (Şekil 2.14.b). Bu sırada magnetik akı yoğunluğu OB ile ölçülen H değeri için sıfır olarak BC eğrisi boyunca yön değiştirir. Eğer C noktasından geri dönülürse alan şiddeti tekrar HD değerini alıncaya kadar magnetik akı yoğunluğu $CDEF$ eğrisini takip eder. Bu işlem, birçok kez tekrarlanırsa aynı H_M değerleri için iç içe yerleşen histerezis eğrileri elde edilir.

Aynı H_M değerleri için iç içe yerleşen histerezis eğrileri tepelerini birleştirerek Şekil 2.14.c'de verilen histerezis eğrisi denilen kapalı eğri elde edilir. Bu eğri başlangıç, O noktasına göre simetriktir. Histerezis bölgesinin ikinci bölgesindeki kısmına mıknatıslanmayı yok etme (demagnetization) eğrisi adı verilir. Histerezisden dolayı bir H değerine birden fazla B değeri ve bir B değerine birden fazla H değeri karşılık düşer. Bu nedenle belli bir magnetik akı yoğunluğu elde etmek için gerekli olan alan şiddetinin saptanmasında bir belirsizlik vardır. Bu belirsizlik ancak malzemenin daha önce geçirdiği magnetik haller belli olduğunda ortadan kalkar.

$H = 0$ değerine karşılık düşen $\pm B_r$ değerine artık mıknatıslanma ya da kalıcı mıknatısiyet ya da remanans magnetik akı yoğunluğu adı verilir. $B = 0$ değerine karşılık düşen $\pm H_c$ değerine zorlayıcı kuvvet ya da koersitif kuvvet adı verilir. Bu değerler özellikle daimi mıknatıslar için önemlidir. Farklı H_m maksimum değerleri için, farklı H_c ve farklı B_r değerleri elde edilir. Çizelgelerde H'_m nin doyma bölgesinde bulunması halinde elde edilen B_r ve H_c değerleri verilir.

H_c koersitif kuvvetinin değerine göre magnetik malzemeler, yumuşak ve sert magnetik malzemeler olarak sınıflandırılırlar. Öyle ki H'_c ye göre,

$H_c < 10$ A/cm: Yumuşak malzeme

$H_c > 10$ A/cm: Sert malzeme

şeklinde tanımlanır. Elektromekanik enerji dönüşümü yapan sistemler ve transformatörlerde yumuşak malzemeler kullanılır. Buna karşın ölçü aletleri ve daimi mıknatıslı küçük elektrik motorlarında magnetik alanı büyütecek uyarma sargısının bulunmaması nedeniyle sert malzemeler kullanılır. [15]

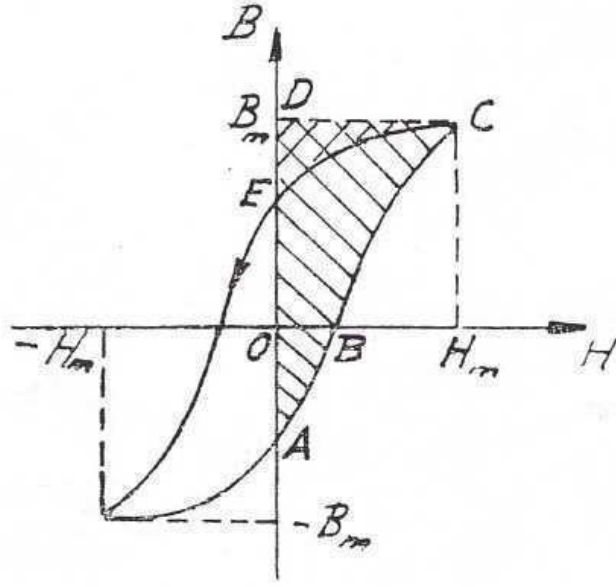
Histerezis evrimi, bir magnetik malzemenin bir çekirdeğin mıknatıslanırken ısı olarak kaybedilen enerjinin bir ölçüsüdür. Histerezis evriminin elde edilmesinde en uygun yol, doğru akım kullanılmasıdır. Uyarma sargısında doğru akımın kullanılması ile magnetik alan şiddetinin yavaş değişimi sağlanacaktır. Böylece malzemedede girdap akımlarının (eddy akımları) oluşumu nlenmiş olunacak, bunun sonucunda da histerezis kayıplarının daha sağlıklı bir şekilde belirlenmesi söz konusu olacaktır. Bu yolla elde edilen histerezis çevrimi, bir mıknatıslanma periyoduna karşılık düşer ve statik histerezis çevrimi olarak adlandırılır. Alternatif akım kullanılması durumunda mıknatıslanma periyodu sürekli olarak tekrarlandığından histerezis çevrimi dolayısıyla histerisiz kaybı, uygulanan akımın periyoduna, başka bir deyişle frekansına bağlı olur.

Histerezis kaybı, bir alternatif alana maruz kalan magnetik saın ya da çekirdeğin toplam kaybı yerine sadece bir kısmını gösterir. Bilindiği gibi Faraday yasasına göre zamanla değişen bir alan içinde bulunan iletken ve magnetik malzemelerde bir gerilim endüklenir. İşte malzemedede endüklenen bu gerilim sonucunda oluşan küçük elektrik akımları girdap akımları ya da eddy akımları olarak bilinir. Bu akımların genlikleri (büyüklükleri); frekans ve magnetik akı yoğunluğu yanında malzemenin özgül direnci ve kalınlığına bağlıdır. İşte hem histerezis, hem de girdap akımları kayıplarını içeren histerezis çevrimine dinamik histerezis çevrimi adı verilir.

2.1.5 Histerezis kaybı

Doğru akım ile uyarda bir mıknatıslanma çevriminin tamamlanması ya da alternatif akım ile uyarda akımın bir periyodunu tamamlaması ile malzemede ya da çekirdekte bir histerezis çevrimi elde edilir. Alternatif akım uyarması ile elde edilen histerezis çevriminde, H magnetik alan şiddeti ve B magnetik akı yoğunluğunun tepe değerleri (genlikleri) alınır. Şekil 2.15'te verilen çevrimde tepe değerler H_m ve B_m ile gösterilmiştir. Magnetik alan şiddeti sıfırdan H_m değerine yükseltildiğinde uyarma akımını sağlayan besleme kaynağından çekilen enerji çekirdeğin birim hacmi için ABCDA ile taralı yüzeyinin alanını ile orantılıdır. Diğer taraftan şekilden görüldüğü gibi, alan şiddeti H_m değerinden sıfır değerine düştüğünde endüksiyon da B_m değerinden B_r remanans değerine düşmektedir. B_r 'de bir azalma meydana geldiğinden dB diferansiyeli negatiftir. Bu nedenle birim hacim için CDEC yüzeyi ile taralı yüzey ile orantılı enerji, besleme kaynağına geri iade edilen enerjidir. Bu enerji ile orantılı CDEC taralı alanı, ABCDA ile taralı alandan çıkartılırsa yarım periyoda karşılık düşen ve malzemenin ısınmasına neden olan histerezis enerjisi elde edilir. Böylece birim hacim için yarım periyoda karşılık düşen histerezis kaybı, OECBAO taralı yüzey ile orantılı olacaktır. Sonuç olarak diğer yarım periyot için de aynı durum geçerli olduğundan bir tam periyot için birim hacimdeki histerezis kaybı, histerezis çevrimi ile sınırlı yüzeyle orantılı olacaktır.

Orantı katsayısı H ve B için seçilen ölçeklere bağlıdır. Fiziksel olarak histerezis kaybı, Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'dan da görüleceği gibi, malzemenin mıknatıslanması esnasında atomların yön değişimleri nedeniyle ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.15: Histerezis kaybı [16]

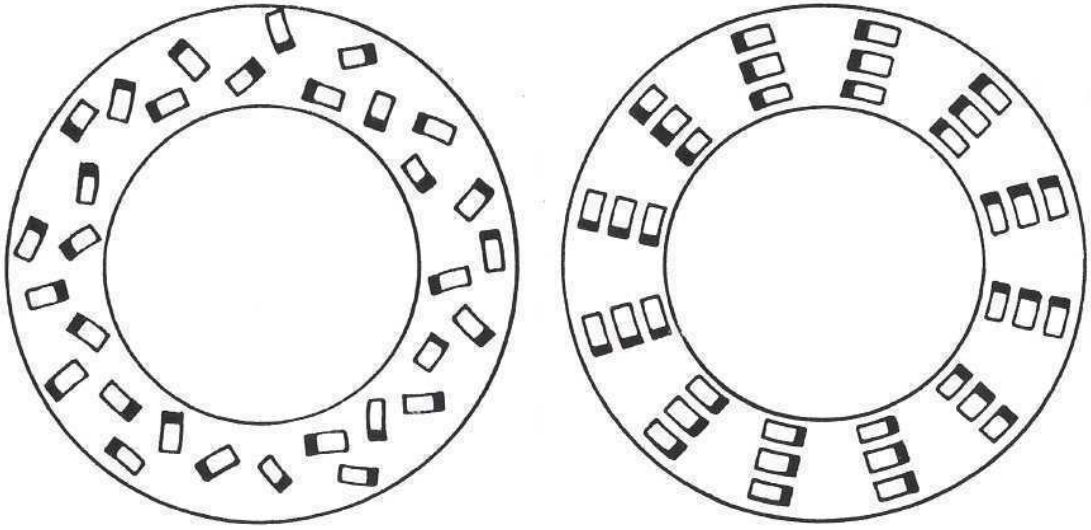
Birim hacimdeki histerezis kaybı w_h ile gösterilirse, malzemenin ya da çekirdeğin V hacmindeki kayıp enerjisi,

$$W_h = w_h \times V \quad (2.10)$$

olarak tanımlanır. Bu enerji kaybının alternatif akımın T periyoduna bölünmesi ile birim zamandaki enerji kaybı, başka bir deyişle histerezis gücü elde edilir. Diğer taraftan periyot ile frekans arasında $f = 1/T$ bağıntısı olduğundan besleme akımının frekansı cinsinden histerezis gücü,

$$P_h = w_h \times f \times V \quad (2.11)$$

formülü yazılır. Malzemenin ağırlığı hacmi ile orantılı olduğundan formül ağırlık cinsinden de yazılabilir. [16]



Şekil 2.16: Mıknatıslanmamış ve mıknatıslanmış bir malzemede atomların dizilişi [16]

Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı üzere, histerezis kaybını bulmak için histerezis çevrimin yüzeyinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu yüzey farklı B_m değerleri için farklı olacaktır. Bu nedenle uygulamada genellikle deneysel olarak bulunmuş formüllerden yararlanılır. Bu formüllerden biri Steinmetz tarafından verilen

$$P_h = \eta_h \times f \times V \times B_m^n \quad 1,6 \leq n \leq 1,8 \quad (2.12)$$

formülüdür. Burada η_h , malzeme sabitidir. n katsayısının değeri belirli bir malzeme için 1,6 ile 1,8 arasında olduğundan, bu eşitlik genel olarak,

$$\frac{W}{Kg} = K \times f^{(m)} \times B_m^{(n)} \quad (2.13)$$

şeklinde uygulamada kullanılır. (2.13) eşitliğinde B tesla ve f hertz birimindedir. Diğer taraftan K , n ve m sabitleri, kullanılan malzemelere bağlı olup, Tablo1’de değişik firmalarca kullanılan malzemelere ilişkin değerler verilmiştir.

Histerezis kaybının hesaplanmasında kullanılan diğer bir bağıntı Richter formülüdür;

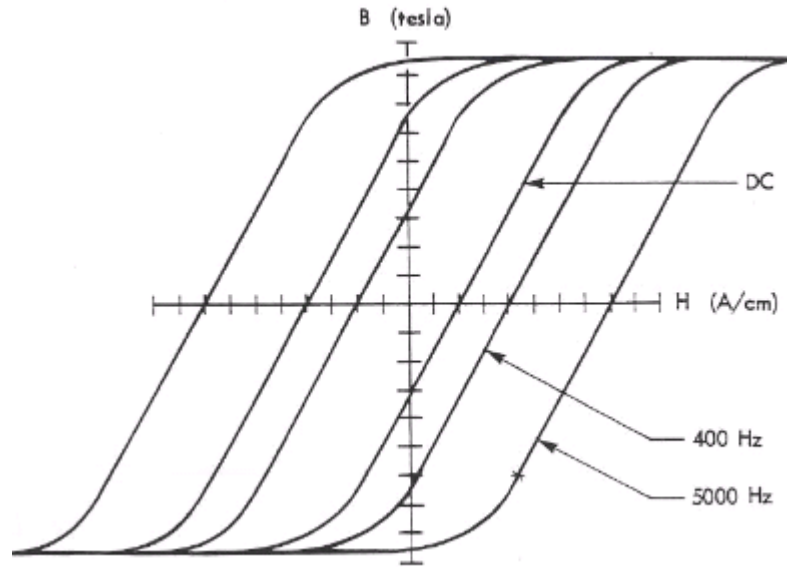
$$P_h = (a \times B_m + b \times B_m^2) \times f \times V \quad (2.14)$$

bu formülde a ve b, malzemeye göre değişen sabitlerdir.

Tablo 2.1: Malzemeye göre değişen sabitler [16]

Malzeme Türü	K	m	n
Arnold Silectron 2 mil	0.00597	1,26	1,73
Armco Silicon Steel 14 mil	0.000557	1,68	1,86
MAGNETICS Inc. Ferrite F material μ 3000	0.00164	1,31	2,49
MAGNETICS Inc. Permalloy 2 mil	0.000165	1,41	1,77
MAGNETICS Inc. 60 μ PP Powder Cores	0.000551	1,23	2,12
Amorf	0.000191828	1,51	1,74

Şekil 2.17’de bir malzemenin değişik frekanslardaki histerezis çevrimleri verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi, frekansın artması ile koersivite büyümekte, permeabilite ise küçülmekte ve histerezis kaybı artmaktadır.



Şekil 2.17: Değişik frekanslarda histerezis çevrimi [16]

2.1.6 Girdap akımı kayıpları

Girdap (eddy) ya da Fuko (Foucult) kayıpları olarak da adlandırılan girdap akım kayıpları, alternatif akım ya da zamanla değişen alanların söz konusu olduğu durumlarda malzemede ya da çekirdekte ortaya çıkan ısı (Joule) kayıplarıdır. Yukarıda da belirtildiği gibi, Faraday yasasına göre zamanla değişken bir alan içinde bulunan iletkenlerde bir gerilim endüklenir. Yukarıdaki bölümlerde açıklanan nedenlerle ferromagnetik malzemelerin moleküllerinde de bir gerilim endüklenir. Endüklenen bu gerilimler sonucu oluşan akımlar moleküller arasında çevrimini tamamlamaya çalışır ve böylece ferromagnetik malzeme, birçok kısa devre olmuş sargılar gibi davranır. Meydana gelen girdap akımları, magnetik alan frekansında olacağından elektronların birbirine sürtünmeleri neticesinde moleküller ve moleküllerin teşkil ettiği kısımlar ısınır (Şekil 2.18.a). Isı kaynağı oluşturan bu kısımlardan cisimlere doğru bir ısı akışı meydana gelir ve cisim ısınır, dolayısıyla ısı kayıpları ortaya çıkar. Meydana gelen girdap akımları, magnetik alanın frekansı yanında malzemenin cinsi, yapısı ve boyutlarına bağlıdır. Girdap akımlarının izledikleri yolları tam olarak belirlemek mümkün olmadığı gibi, izledikleri yol da düzgün değildir. Girdap akımları, sadece malzemenin ısınmasına değil, aynı zamanda kendisini oluşturan alana ters yönde olacağından magnetik alanın da zayıflamasına neden olurlar.

Girdap akımlarına, dolayısıyla girdap kayıplarına etkiyen büyüklükleri görmek amacıyla Şekil 2.18.b'de verilen kalınlığı h , uzunluğu l olan ferromagnetik malzemeden oluşan levhayı göz önüne alalım.

Levhanın pozitif yönü şekilde B ile gösterilen doğrultuda olan değişken bir magnetik alanın içinde bulunduğunu varsayalım. Bu değişken magnetik alan sonucunda oluşan girdap akımının devresinin genişliği d_y ve uzunluğu l olan kesitte tamamladığı düşüncesi ile bu devre tarafından halkalanan akı için, eğer $h < b$ ise

$$\Phi = B \times S = 2 \times y \times b \times B \quad (2.15)$$

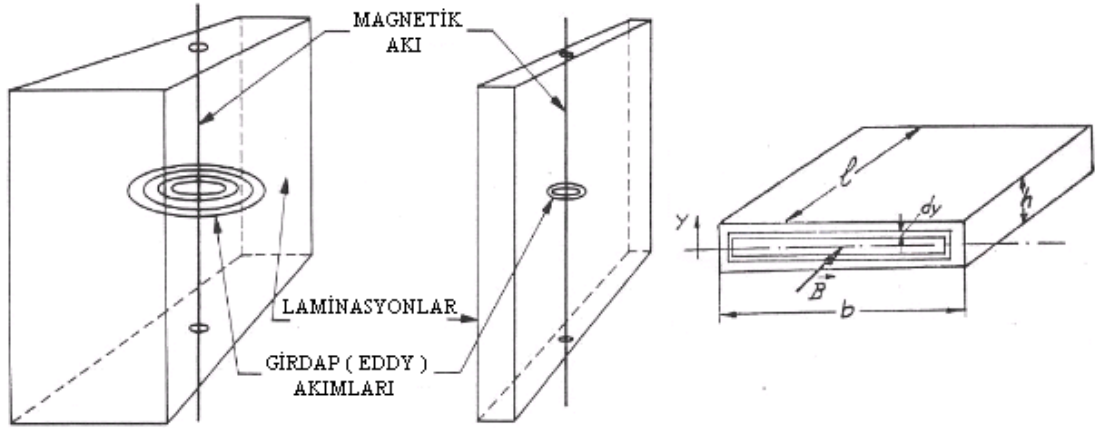
yazılır. Değişken magnetik alanın $B = B_m \times \sin \omega t$ şeklinde zamanla sinüzoidal olarak değiştiği varsayılırsa,

$$\Phi = 2 \times y \times b \times B_m \times \sin \omega t \quad (2.16)$$

elde edilir. Faraday yasasına göre endüklenen gerilim,

$$e = -\left(\frac{d\Phi}{dt}\right) = -2 \times y \times b \times \omega \times B_m \times \cos \omega t \quad (2.17)$$

olarak belirlenir.



Şekil 2.18: a) Girdap (Eddy ya da Fuko) akımı b) Ferromagnetik levha [16]

Levha malzemesinin öz direnci (resistivity) ρ ile gösterilirse, $2y$ uzunluğunu b genişliği yanında ihmal ederek girdap akım devresi direnci için,

$$R = \frac{\rho \times 2 \times b}{l \times dy} \quad (2.18)$$

yazılır. Endüklenen gerilimin etkin (efektif) değeri,

$$E = \left(\frac{2 \times y \times b \times \omega \times B_m}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.19)$$

olduğundan girdap akımının R direncinde meydana getirdiği güç kaybı,

$$dP_w = \frac{E^2}{R} = \left(\frac{\omega^2 \times b \times l \times B_m^2}{\rho} \right) \times y^2 \times dy \quad (2.20)$$

olacağından tüm levhadaki güç kaybı, bunun $y = 0$ ile $y = h / 2$ arasında entegre ederek,

$$P_w = \left(\frac{\omega^2 \times b \times l \times B_m^2 \times h^3}{24 \times \rho} \right) \quad (2.21)$$

ya da $\omega = 2\pi f$ olduğundan

$$P_w = \left(\frac{\pi^2 \times f^2 \times b \times l \times B_m^2 \times h^3}{6 \times \rho} \right) \quad (2.22)$$

elde edilir. Levhanın hacmi $V = b \times h \times l$ olduğundan (2.22) eşitliği,

$$P_w = \left(\frac{\pi^2 \times f^2 \times B_m^2 \times h^2 \times V}{6 \times \rho} \right) \quad (2.23)$$

olur.

(2.22) ya da (2.23) eşitlikleri ile verilen girdap akımı kayıpları; göz önüne alınan levhada kesitin aynı olduğu varsayımı ile elde edilmiştir. Halbuki girdap akımları nedeni ile kesit her yerde aynı değildir. Bunun yanında girdap akımlarının levhadaki dağılımı da aynı genlikte değildir. Bununla beraber $h < b$ almakla yapılan hata pek büyük değildir.

(2.22) ya da (2.23) eşitliklerinden görüleceği üzere, girdap akımları nedeniyle oluşan güç kaybı,

- Uygulanan mıknatıslanma akımının frekansının karesi ile doğru orantılı,
- Endüksiyonun maksimum değerinin karesi ile doğru orantılı,
- Levha kalınlığının karesi ile doğru orantılı,
- Levhanın öz direnci ile ters orantılıdır.

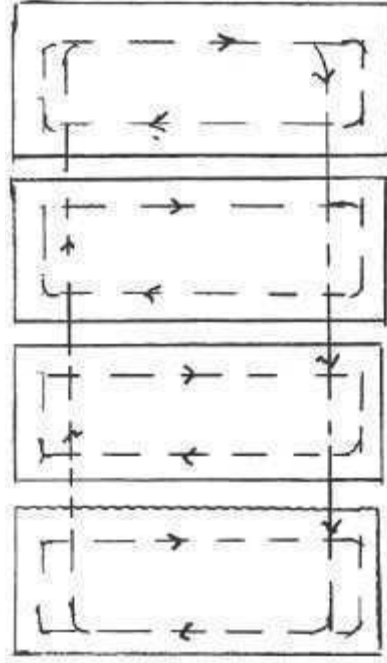
Bu özellikler nedeni ile fuko kayıplarını azaltmak için,

- Levha kalınlığı, başka bir deyişle saç kalınlıkları mümkün olduğu kadar küçük olmalı,
- Girdap akımlarının devreleri de birer elektrik devresi olduğundan akımların bir levhadan diğerine geçmesi ile levhalar arasında büyük akım yollarının oluşmaması için levhalar birbirinden izole edilmelidir,
- Öz direnci artırmak için özel alaşımlar kullanılır.

Yüzeylerde meydana gelen girdap akımları, Lenz kuralına gereği esas alanı zayıflatacak yönde etki eder. Öyle ki girdap akımları tarafından oluşturulan alan, cismin ortalarında alanın kuvvet çizgilerinin akmasını önleyecek şekilde davranırlar. Bu nedenle cismin ortası aktif olmaz. Şekil 2.19'da birbirinden yalıtılmamış (izole edilmemiş) levha paketlerindeki girdap akımlarınca oluşturulan alan ve esas alan şekli verilmiştir. Bu şekilde her bir paketteki girdap akımı kesik çizgilerle gösterilmiştir. Komşu olan levhalardaki akım yönleri göz önüne alındığında bunların birbirlerini yok ettikleri Şekil 2.19'dan görülmektedir. Her ne kadar komşu levhalardaki akım yönleri göz önüne alındığında birbirlerini yok etmeleri söz konusu ise de bir saç paketi göz önüne alındığında paket çevresinde bütün girdap akımlarının vereceği bir bileşke magnetik etki vardır. Bu bileşke etki nedeniyle esas alan levhanın iç kısmında etkin olmaz. İşte yukarıda belirtildiği gibi, levhalar birbirinden izole edilirler.

Saç levhaların kesilmesi ve işlenmesi esnasında levha kesim ve işleme yerlerinde sertleşme meydana gelir. Bu yüzden fuko kayıpları artar. Diğer taraftan işlenen ve kesilen kısımlarda pürüzler meydana gelir. Bunun gibi, levhalar arasında bulunan izole edici tabakanın muhtelif yerlerinde sürtünme ve hatalı baskı kuvveti ile

neticesinde zedelenme ve delinme, levhaların girdap akımları için kısa devre teşkil etmesine neden olurlar.



Şekil 2.19 Birbirinden yalıtılmamış levhalar [16]

Tüm yukarıda sıralanan nedenlerden dolayı formüllerle hesaplanan kayıplardan daha büyük fuko kayıpları olur. Kısa devre oluşmaması durumunda işleme ve kesme sonucunda oluşan kayıplar, teorik olarak hesaplanandan yaklaşık %50 daha büyüktür. Bu nedenle işleme faktörü tanımlanır. Bu katsayı işlemede gösterilecek titizliğe bağlıdır. Kötü işleme durumu için yaklaşık olarak 2 alınabilir. Kısa devrelerin oluşmasında ise bu katsayı 5'e kadar çıkabilir.

Histerezis ve fuko kayıpları birlikte malzemenin toplam kaybını verir. Buna göre zamanla değişken bir alan söz konusu olduğunda toplam güç kaybı,

$$P = P_h + P_w \quad (2.24)$$

olacaktır. Buna demir kaybı adı verilir. Demir kaybı, elektromagnetik elemanlar ve elektrik makineleri için önemli bir kayıptır. Demir kaybı, temelde frekans ve magnetik akı yoğunluğuna bağlıdır. Hc koersitivite kuvveti 10 A/cm'den küçük olan

yumuşak malzemeler, magnetik akı yoğunluğunun küçük değerlerinde bile belli bir frekansın altında kullanılmamalıdır. Girdap akımlarını sınırlayıcı olarak ortaya çıkan bu frekansın üstündeki frekanslar, malzemenin permeabilitesinde ($\mu < 1/\sqrt{f}$) azalmaya neden olurlar. Kısıtlama frekansı olarak adlandırılan bu frekans, permeabiliteye, levha kalınlığına ve malzeme öz direncine bağlı olup aşağıda verilen eşitlikle hesaplanır;

$$f_w \cong \frac{4 \times \rho}{\pi \times \mu \times d^2} \quad (2.25)$$

Bu eşitlikte d, levha kalınlığıdır.

2.1.7 Relüktans tanımı

Bir malzeme magnetomotor kuvvet (Magnetomotor force) sonucunda meydana gelen magnetik akı, malzemenin akıya karşı gösterdiği magnetik dirence bağlıdır. Bu magnetik direnç, relüktans olarak adlandırılır. Bir elektrik devresinde söz konusu olan dirence benzer olarak relüktans, malzemeye ve bu malzeme kullanılarak oluşturulan çekirdeğin (nüvenin) fiziksel boyutlarına bağlıdır. Bilindiği gibi bir iletkenin direnci; l iletkenin uzunluğu, A iletkenin kesiti ve ρ iletkenin malzemesinin öz direnci (resistivity) olmak üzere,

$$R = \left(\frac{\rho \times l}{A} \right) \quad (2.26)$$

dır. Benzer olarak magnetik devrelerde söz konusu olan relüktans, iletkenin öz direncine karşılık $1/\mu$ ile tanımlanan malzemenin relüktivitesi bağlı olmak üzere,

$$R_m = \frac{l}{\mu \times A_w} = \frac{l}{\mu_o \times \mu_r \times A_w} \quad (2.27)$$

eşitliği ile belirlenir (2.27) eşitliğinde l , ortalama magnetik yol uzunluğu olup [m] biriminde, A_w ise çekirdeğin kesiti olup, [m²] olarak ölçüldüğünde relüktansın birimi, $A / V_s = 1 / \Omega_s = 1 / \text{Henry}$ dir. Relüktansın tersi olan

$$G = \frac{1}{R_m} \quad (2.28)$$

magnetik iletkenlik ya da permeans adı verilir ve birimi, $[\Omega_s] = \{1 / \text{Henry}\}$ ‘dir.

Relüktans ifadesinden görüldüğü gibi, belli bir ortalama magnetik yol uzunluğu l ve belli bir A_w kesiti için yüksek permeabiliteli bir malzemenin relüktansı küçüktür.

2.2 Seri (Hat) Reaktörler

Hat reaktörleri (Şok Bobinleri) genellikle motor hız kontrol sistemleri gibi IGBT metodu ile çalışan cihazların giriş terminallerine seri olarak bağlanırlar.

Bu reaktörler % 4 gerilim düşümü sağlayacak biçimde dizayn edilmişlerdir. Farklı voltaj düşümleri için talep üzerine imalat yapılmaktadır [17].

Motor sürücüleri sağladıkları kontrol olanakları ve ek özellikler nedeni ile endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Motor kontrol devreleri üreticileri, sürücüler ile birlikte kullanılacak reaktörleri de genellikle isteğe bağlı olarak sunmaktadırlar. Bu reaktörler, piyasada şok ve şok bobini olarak da bilinmektedirler.

Motor sürücü uygulamalarında reaktörler iki farklı konuma bağlanabilirler:

- Şebeke ile motor sürücü arasına (Motor Sürücü Giriş Reaktörü)
- Motor sürücü ile motor arasına (Motor Sürücü Çıkış Reaktörü)

Reaktörler, görünüş ve yapı olarak transformatöre çok benzerler. Her faz için sarılmış bir sargı ve nüveden oluşurlar. Motor sürücüleri genellikle üç fazlı elektrik

şebekesi ile çalışırlar. Üç fazlı sürücüler ile birlikte üç fazlı reaktörler kullanılırlar. Tek fazlı sürücüler için ise tek fazlı reaktörler bulunmaktadır.

Motor sürücü giriş reaktörleri motor sürücü ile şebeke arasına seri olarak bağlanır. Bu tip reaktörlerin sisteme etkileri şu şekildedir:

- Harmonikleri azaltırlar. Motor sürücülerin girişinde bulunan doğrultucu devreleri şebekeden doğrusal olmayan (non-linear) akım çekerler. Çekilen akım yüksek miktarda harmonik içerir. Bu durum, hem güç faktörünü düşürür, hem de sistemdeki koruma elemanlarının hatalı çalışması, hassas cihazlarda etkileşim ve hatalı çalışma, elektronik cihazlarda kart arızaları gibi birçok probleme neden olur. Motor sürücü devresinin girişine eklenecek giriş reaktörü, sürücünün çektiği akımdaki ani değişimleri ortadan kaldırarak oluşan harmonikleri azaltır.
- Sağladığı gerilim düşümü ile motor sürücüyü yüksek gerilimlerden korur. Güç elektroniği devreleri ve diğer hassas elektronik elemanlardan oluşan motor sürücülerinde yüksek şebeke gerilimleri arızalara ve sürücünün devre dışı kalarak iş kayıplarına neden olabilirler. Sürücünün önüne eklenecek reaktör üzerinde oluşacak gerilim düşümü sürücüyü yüksek gerilimlerden korur.
- Ani akım değişimlerini engellerler.
- Sistem bileşenlerinin ömrünü uzatırlar. Motor sürücü giriş reaktörü siparişi verilirken motor sürücü gücü veya akım değerinin belirtilmesi gerekmektedir. Tasarımlar sürücülerin girişinde yaygın olarak kullanılan doğrultucu devrelerin oluşturduğu harmonik değerlerine uygun olarak gerçekleştirilirler.

Motor sürücü ile motor arasında bağlanan motor sürücü çıkış reaktörleri ise yaygın olarak kullanılan motor çeşitleri olan asenkron motorlar ve DC motorlar için üretilirler. Endüstride sıklıkla kullanılan üç fazlı asenkron motorları kontrol eden motor sürücülerin çıkışında bulunan evirici değişik genişliklerde darbeler üreterek motoru kontrol eder. Bu sistem Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM-Pulse Width Modulation) olarak bilinir.

Bu tip reaktörler aşağıdaki yararları sağlarlar:

- Motor sürücüler üzerinden beslenen motorların çalışma sıcaklığı normal şebeke gerilimi ile beslenen motorlardan daha yüksektir. Bunun nedeni motor sürücünün çıkışında Darbe Genişlik Modülasyonu nedeniyle yüksek frekans harmoniklerin oluşmasıdır. Bu harmonikler motorda ek kayıplar oluşmasına ve motor çalışma sıcaklığının artmasına neden olurlar. Motor sürücüsünün çıkışında bir reaktör kullanılması durumunda, harmonikler azalacağından motorun çalışma sıcaklığı da düşecektir. Ayrıca kayıpların azalması sistemin verimini arttıracaktır.
- Motor sürücüsünün PWM işaretini oluşturan evirici kısmının anahtarlama frekansı genel olarak birkaç kHz'tir. Bu anahtarlama frekansı insan kulağının duyma sınırları içerisinde. Bu nedenle motor sürücüleri üzerinden beslenen motorlarda yüksek frekansta istenmeyen sesler duyulur. Reaktörler yüksek frekans bileşenlerini önemli ölçüde ortadan kaldırdıklarından motorların daha sessiz çalışmalarını sağlarlar.
- Motor sürücüsü ile motor arasında bulunan kabloda veya motorda kısa devreler oluşabilir. Motor sürücülerinde genel olarak kısa devrelere karşı koruma sistemleri vardır. Ancak bazı kısa devre durumlarında akım bir anda çok yüksek değerlere ulaşabileceğinden koruma sistemi devreye girinceye kadar motor sürücüsünün evirici kısmındaki yarıiletken anahtarlar zarar görebilir. Reaktörler bir kısa devre anında akımın bir anda artmasına engel olacağından motor sürücüsünün kısa devre koruma sisteminin devreye girmesine zaman tanır ve sürücüyü korurlar.

Bazı uygulamalarda motor sürücüsü, motorun hemen yanına yerleştirilmez. Bu durumda motor ile motor sürücü devresi arasında uzun bir kablo kullanılır. Kablonun endüktansı ve kapasitesi nedeni ile motorun terminallerinde anlık yüksek gerilimler oluşur. Bu durum motorun ömrünü kısaltır.

Motor sürücüsü çıkış reaktörleri bu durumu engelleyerek motorun ömrünü uzatır.

Motor sürücüsünün çıkış reaktörleri görüldüğü gibi birçok yarar sağlamaktadırlar. Bu nedenle motor sürücüleri ile birlikte reaktör kullanılması motor sürücü üreticileri tarafından da önerilmektedir.



Şekil 2.20 : Seri (hat) reaktör [17]

2.2.1 Fonksiyonları

- Motor hız kontrol cihazlarının ürettiği harmonik akımların sınırlanması,
- Yol verme akımlarının sınırlanması,
- Tepe akımlarının sınırlanması,
- Motorların sessiz çalışmasının sağlanması,
- Nominal motor akımına göre sigorta seçilebilmesinin sağlanması,
- Motor ısınmasının azaltılması,

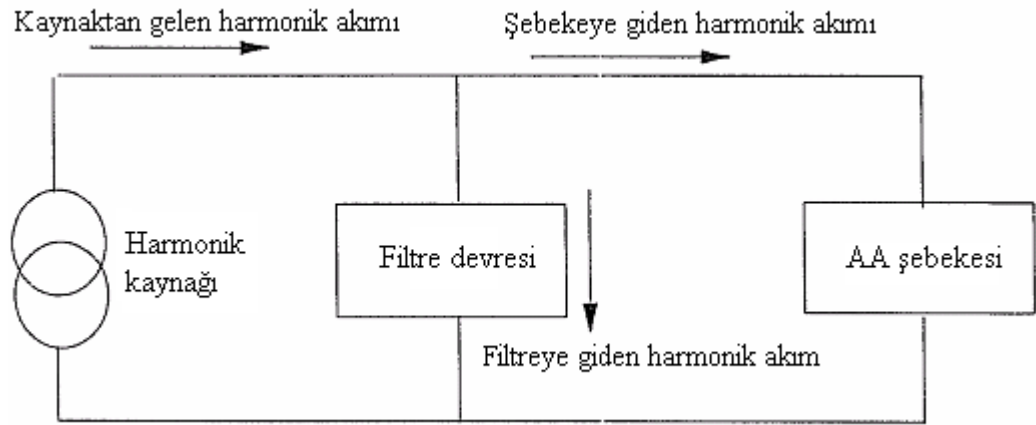
2.3 Harmonik Filtre Reaktörü

2.3.1 Giriş

Güç sistemi içerisinde gerilim ve akım harmoniğinin ana etkileri;

- Seri ve paralel rezonanstan harmonik seviyelerinin sonucunun amplifikasyonları,
- Enerji üretimi, iletimi ve kullanımında verimliliğin azalması,
- Elektrik tesislerindeki bileşenlerin izolasyonlarının yaşlanması ve böylece faydalı ömürlerinin kısılmasıdır.

Bir güç doğrultucusu harmonik akımları ürettiğinden, sabit akım kaynağı [18] olarak düşünülebilir. Eşdeğer devre Şekil 2.21'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.21: Harmonik akımlarının analizi için devre [18]

Güç konverterleri ve bunların sürücü sistemlerinden enjekte edilen harmonik akımlarına engel olamayız. Güç sisteminin içindeki harmonik akımların akışını sınırlamak için bir çözüm olmalıdır.

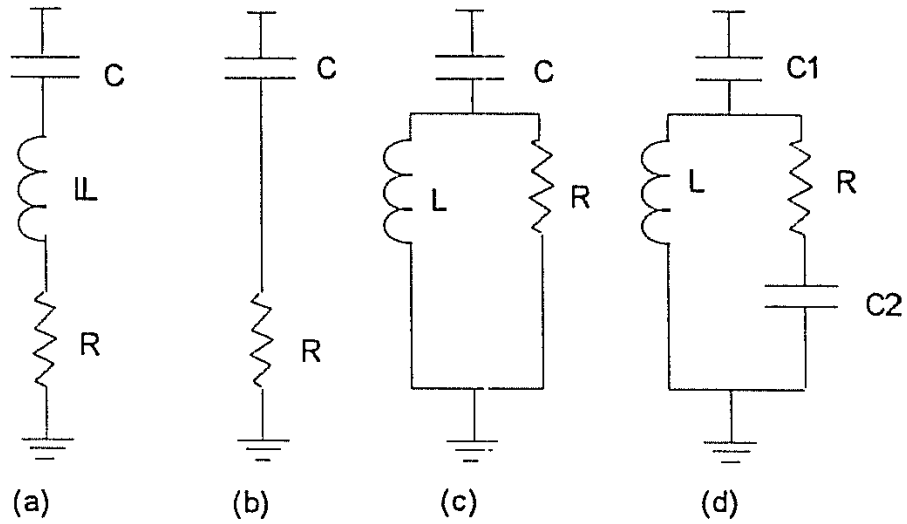
Harmonik filtreleme bu olay için çözümlerden bir tanesidir. Temel olarak iki tip filtre mevcuttur.

- Pasif filtre,
- Aktif filtre,

Pasif filtreler, direnç, endüktör ve kondansatör gibi pasif bileşenlerden oluşan filtrelerdir. Aktif filtreler, diğer taraftan akım ve gerilim kaynakları tarafından kontrol edilir.

Muhtemelen iki tip pasif harmonik filtreleme mevcuttur. İlk metod, seri hat reaktörü vasıtasıyla kaynak empedansını artırmaktır. Bu çok cazip değildir, çünkü tüm yük akımını taşımak zorunda ve tüm hat geriliminden izole edilmiş olmalıdır. İkinci metod, en pratik yaklaşım olan şönt filtre kullanmaktır. Şönt filtreler temel frekansta reaktif gücü besleyebilir ve tüm yük akımının sadece küçük bir kısmını taşır. Bunun yanı sıra doğrultucuların güç faktörü düzeltilmesinde kullanılabilirler. Bununla birlikte seri hat reaktörlerinden çok az pahalıdır.

Farklı tiplerde şönt filtreler bulunmaktadır [19]. Bunların içerisinde en yaygın olan şönt filtreler, tek ayarlı filtrelerdir. Güç faktörü düzeltilmesi için istenen temel frekanstaki reaktif gücün tamamını veya birazını sağlarlar.



Şekil 2.22: Şönt Filtreler [19]

- (a) Tek ayarlı filtre
- (b) İlk öncelikli yüksek-geçiş filtresi
- (c) İkinci öncelikli yüksek-geçiş filtresi
- (d) Üçüncü öncelikli yüksek-geçiş filtresi

2.3.2 Uygulamaları

Günümüzde sık kullanılan AA ve DA motorların hız kontrol cihazları, kompakt flüoresan lambalar, kesintisiz güç kaynakları gibi sinüs dalgasını kıyma esasına göre çalışan cihazlar, elektrik şebekelerinde temel frekansın dışında (ki bu genellikle 5. ve

7. harmoniklerdir) frekanslarda dalgalar üreterek şebeke kirlenmesine yol açarlar [20] .



Şekil 2.23 : Harmonik filtre reaktörü [20]

2.3.3 Kullanılma nedenleri

- Elektrik dağıtım ekipmanlarının ve kabloların aşırı ısınması,
- Artan elektriki izolasyon gerilimi,
- Elektrik motorlarında artan gürültü seviyesi,
- Bilgisayar ve faks gibi cihazlarda elektronik bozulmalar,
- Kondansatör aşırı yüklenmesi,
- Artan bakım masrafları,
- Flüoresan lambalarda titreşim,
- Termik şalterlerin beklenmedik zamanlarda açmasıdır.

Harmonik filtre reaktörleri ya paralel ya da seri olarak sisteme bağlanırlar. Genellikle trafo merkezlerine, statik var kompanzasyon sistemlerine ve HVDC linklere bağlanırlar [20].

Reaktörler; Q faktörü, endüktans toleransları, gereken frekansta en uygun akordu sağlayabilmek için yüksüz kademe değiştiricilerinin bağlantıları gibi birçok değişken göz önünde bulundurularak dizayn edilmektedirler.

Endüstri tesislerinde reaktif güç kompanzasyon amaçlı kullanılan güç kondansatörleri, uygun değerde endüktanslar seri bağlanırsa, kompanzasyon görevi yanı sıra filtreleme de yapabilirler. Rezonans risklerinden kaçınmak için genellikle, rezonans frekansı $f_r = (2\pi \times \sqrt{L_n \times C_y})^{-1}$ 'nın genellikle yüzde yirmi kadar ötelelerde endüktans seçilir. En yaygın kullanılan filtreler 189 Hz ve 210 Hz dir. Kapasiteye seri bağlanacak reaktörün reaktansı X_L , kondansatör reaktansı X_C ise, $\%p = X_L / X_C = \%7$ ve $\%5.67$ 'ye denk gelmektedir. 6 darbeli kıyıcı yüklerin yaklaşık harmonik miktarları: $I_5 = 0.25 \times I_1$, $I_7 = 0.13 \times I_1$, $I_{11} = 0.09 \times I_1$ U_{CN} gerilim değerinde, Q_{CN} (kVAr) gücünde bir kapasite p değerinde (X_L / X_C) bir endüktans seri bağlı ise, U_N gerilimine sahip bir şebekeye aktarılan reaktif güç Q_C ise,

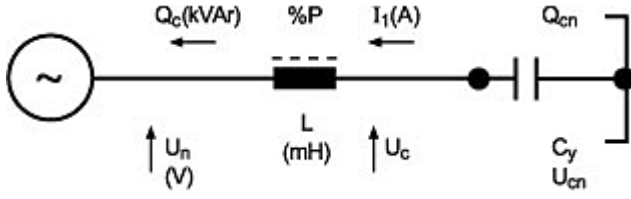
$$Q_c = \frac{Q_{cn} \times U_n^2 \times \left(\frac{50}{f_n}\right)}{U_{cn}^2 \times \left(\frac{1-p}{100}\right)} \quad (2.29)$$

Q_{cn} kondansatörünü " f_r "de rezonansa getirecek endüktans

$$L_n = \frac{f \times U_{cn}^2}{2 \times \pi \times f_r^2 \times Q_{cn}} \quad (2.30)$$

Örnek : $\%p = 7$ olan reaktörle seri bağlı bir kondansatörün $U_n = 400V$ 'luk gerilimli bir şebekeye $Q_c = 50$ kVAr aktarması için $U_{cn} = 440V$ 'luk bir kapasitörün $Q_{cn} = 56.3$ kVAr olması gerektiği bulunur. Kondansatörün gerilimi $U_c = U_n / (1-\%p) = 400 / (1-0.07) = 430$ volt bulunur.

$U_{cn} = 400$ V olan güç kondansatörleri $\%10$ aşırı gerilime dayanacak şekilde imal edildiğinden bu örnekte 400V kondansatör kullanılabilirse de, $U_{cn} = 440V$ tercih edilmelidir. Gereğinden büyük transformatör kullanmak ve 6 darbeli inverter yerine 12 darbeli kullanmak harmonik miktarını azaltır.



Şebeke akımı I_{eff} :

$$I_{rms} = I_{th} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} \quad (2.31)$$

Güç kondansatörleri devreye alınması sırasında normalin 300-400 katı akım çekerler. Bunu 100 katın altına düşürmek için $p = \%1$ değerindeki reaktör uygun olur.

2.3.4 Avantajları

Harmonik filtre reaktörleri özellikleri ile kullanıldıkları yerlerde pek çok avantaj sağlarlar. Bunlardan başlıcaları ;

- Ekipman ve kondansatörlerin uzun ömürlü olmalarını sağlarlar,
- Yüksek kısa devre kuvvetlerine karşı mükemmel mekanik dayanım,
- Sınırlanmış sıcaklık yükselmesi özelliğiyle daha uzun ömür,
- UV ve kirlilik sınıfı IV olan bölgelerde üstün koruma özellikleriyle maksimum performans,
- Bakım gerektirmeyen dizayndır [20].

2.3.5 Rezonans, şönt kondansatör ve filtreler

Sabit bir harmonik kaynağı ile birlikte bir devrenin işletme prensipleri Şekil 2.24'teki gibi resimlendirilebilir [3].

$$i_n = i_{sn} + i_{fn}$$

i_n ; Harmonik akımının nominal değeri,

Z_s ; Kaynağın eşdeğer empedansı,

Z_f ; Kondansatörün uçlarındaki empedans,

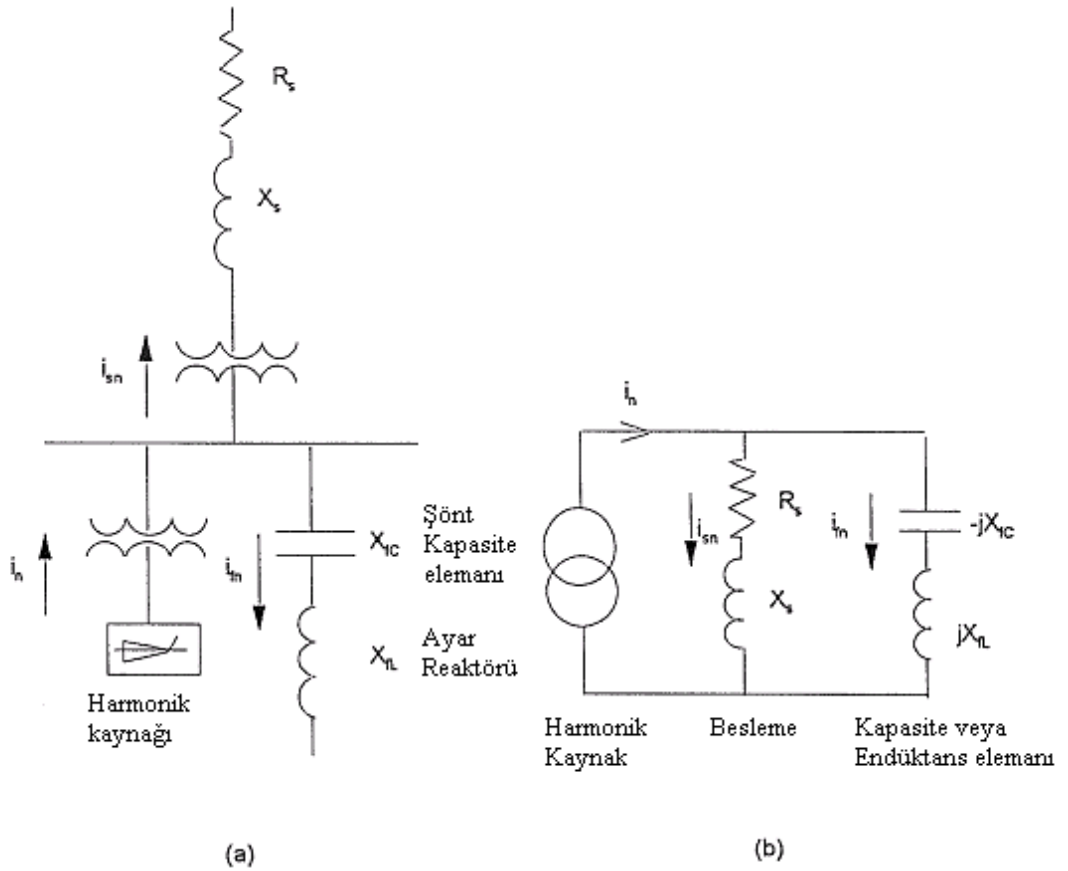
Z_{fc} ; Kondansatörün eşdeğer empedansı,

Z_{fl} ; Ayarlı reaktörün empedansı,

$$i_{fn} = \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} \times i_n = \rho_f \times i_n \quad (2.32)$$

$$i_{sn} = \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} \times i_n = \rho_s \times i_n \quad (2.33)$$

Burada ρ_s dağıtım faktörü olarak adlandırılır. Bu değer harmonik frekansta mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Aksi takdirde, kondansatördeki harmonik akımı ve gerilimi aşırı olabilir. Harmonik frekansında $Z_f + Z_s = 0$ ise sistem o frekansta rezonanstadır.



Şekil 2.24: Sabit bir harmonik kaynaklı bir sistemin çalışması [3]

Şekil 2.24'te, kondansatör ile seri bağlı olan ayar reaktörünün fonksiyonu, seri rezonans kolu veya filtreyi biçimlendirmektir. Harmonik için $Z_f = 0$ ise, beslemeye geri dönen harmonik akımı yoktur ($i_{sn} = 0$), tüm girişler filtrededir.

2.4 Harmonik Filtreleri

Harmonik filtreleri farklı frekanslarda akım ve gerilimlerin genliklerini azaltmak için kullanılırlar. Bu akım ve gerilimlerin farklı kaynakları mevcuttur. Bunlardan bazıları;

1. Dış dalgaları veya dönen makinelerin gerilim dalga şekillerindeki dalgalar,
2. Senkron makinelerdeki akı bozulması,
3. Transformatörün harmonik bileşenli mıknatıslanma akımları,
4. Yüklerden dolayı şebekedeki lineersizlik, örneğin; statik güç konverterleri, kaynak makineleri, ark fırınları, gerilim kontrolörleri ve frekans konverterleri,
5. Statik-güç kompanzatorlardır.

Filtreler, endüktif ve kapasitif reaktansı eşit olacak şekilde bir frekansa ayarlanır.

Böylece, filtreler ayarlanmış frekansta çok düşük empedans yolu olarak hareket eder.

Filtreler, ayarlanmış frekansın altında kapasitif empedans karakteristiğini gösterirler.

Ayarlanmış frekansın üstünde ise endüktif karakterli gibi gözükür. Bununla birlikte, kaynak empedansı endüktif ise, ayarlanmış frekansın altında bir rezonans pik vardır.

2.4.1 Filtre parametrelerinin seçimi

Filtre boyutu temel frekansta verilen reaktif güç olarak tanımlanır. Temel frekansta, bu güç kondansatörün reaktif gücüne eşittir. Toplam filtre boyutu bundan dolayı, harmonik kaynağın reaktif güç ihtiyacı tarafından belirlenir.

Reaktans değeri istenen harmonik frekansına (ayarlanan frekansa) göre hesaplanır. Endüktans elemanının kalite faktörü ayarın keskinliğini belirler.

Direnç için yaygın uygulama, reaktörün iç direnci filtre direncini sınırlamaktır. Bu sonuç çok keskin bir filtreleme faaliyetidir. Bazı durumlarda dış direnç ayarın keskinliğini değiştirmek için eklenebilir.

2.4.2 Filtre tipinin seçimi

Filtreler simülasyon programından veya harmonik kaynakta ölçülen miktarlardan elde edilen akım ve gerilimin harmonik içeriklerine göre tasarlanırlar. Kayıt edilen dalga şekillerinin birçoğunda en düşük harmoniklerde bozulma vardır. Harmonik isteği artarken, harmonik akım büyüklükleri azalır. Tek ayarlı filtreler düşük harmoniklerin ortadan kaldırılmasında iyidir. Daha yüksek harmoniklerin sönümü için yüksek geçiş filtresi önerilir. Bu filtreler, yüksek harmoniklerde sabit direnç empedansı ve düşük harmoniklerde yüksek empedans yolu gibi davranırlar.

Nominal frekansta reaktif güç genellikle çeşitli filtre kolları içerisinde bölünür.

Nominal frekans reaktif güç kompanzasyonu [21] :

X_{cf} , X_{Lf} , R_{Lf} ayarlanan frekansta tek ayarlı filtrenin her biri ayrı olarak nominal frekans değerinde kapasitif, endüktif ve rezistif bileşenler olduğu varsayılırsa,

$$\frac{1}{n \times \omega_o \times C_f} = n \times \omega_o \times L_f \quad (2.34)$$

veya

$$\frac{XC_f}{n} = n \times XL_f \quad (2.35)$$

burada $f_o = \frac{\omega_o}{2\pi}$, güç sisteminin nominal frekansdır.

n frekansın nominal değerinin çarpanlarıdır.

$$w_n = 2 \times \pi \times f_n = 2\pi \times (n \times f_o) \quad (2.36)$$

buradan,

$$n \times w_o = w_n = \frac{1}{\sqrt{L_f \times C_f}} \quad (2.37)$$

Eğer bobin direnci küçük ise, nominal frekanstaki verilebilen toplam reaktif güç;

$$Q_f = \frac{|V|^2}{(X_{L_f} - X_{C_f})} \quad (2.38)$$

burada V, filtrenin yerleştirildiği baradaki nominal gerilim değerinin büyüklüğüdür.

(2.35) formülünü (2.38) formülü içerisine yerleştirirsek,

$$Q_f = \frac{|V|^2}{\left(\frac{X_{C_f}}{n^2} - X_{C_f}\right)} = \frac{|V|^2}{X_{C_f}} \times \frac{n^2}{1-n^2} \quad (2.39)$$

ve

$$X_{L_f} = \frac{X_{C_f}}{n^2} = \frac{|V|^2}{Q_f \times (1-n^2)} \quad (2.40)$$

buradan,

$$R_{L_f} = \frac{n \times X_{L_f}}{Q} \quad (2.41)$$

burada, Q bobinin kalite faktörüdür.

Tek ayarlı filtre genelinde toplam gerilim, endüktans, kondansatör ve her bir filtre barasındaki gerilimlerin toplamıdır. Filtrenin ana bileşen ve harmonik bileşenlerindeki reaktif güç, aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$\frac{V_c^2}{X_{cf}} = Q_f \times \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} \text{ kvar} \quad (2.42)$$

$$\frac{\left\{ I_{fn} \times \frac{X_{cf}}{n} \right\}^2}{\frac{X_{cf}}{n}} = I_{fn}^2 \times \frac{|V|^2 \times n^2}{Q_f \times n \times (n^2 - 1)} \quad (2.43)$$

burada, I_{fn} ayarlı harmonik frekansında filtre içinden geçen akımdır.

3. REAKTÖRÜN TASARIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENEREK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

3.1 Giriş

Genellikle endüktans elemanları, istenen özellikleri ile sahasında kolayca bulunmadığı için, özellikle verilen bir uygulama için tasarlanırlar. Bu bölümde, düşük frekans rezonans devreleri, güç besleme filtrelerinde kullanılan ve düşük frekans tipi endüktans elemanları için basit tasarım temelleri açıklanmıştır.

Endüktans elemanı olarak kullanılan reaktörlerin birçok farklı şekilleri, boyutları ve manyetik özellikleri mevcuttur. Bir nüve malzemesi içinde beş özellik dikkate alınmalıdır. [22]

1. Geçirgenlik,
2. Doyma,
3. Elektriksel direnç,
4. Kalıcı mıknatısiyet (remanans) değeri,
5. Artık mıknatıslık özelliği,

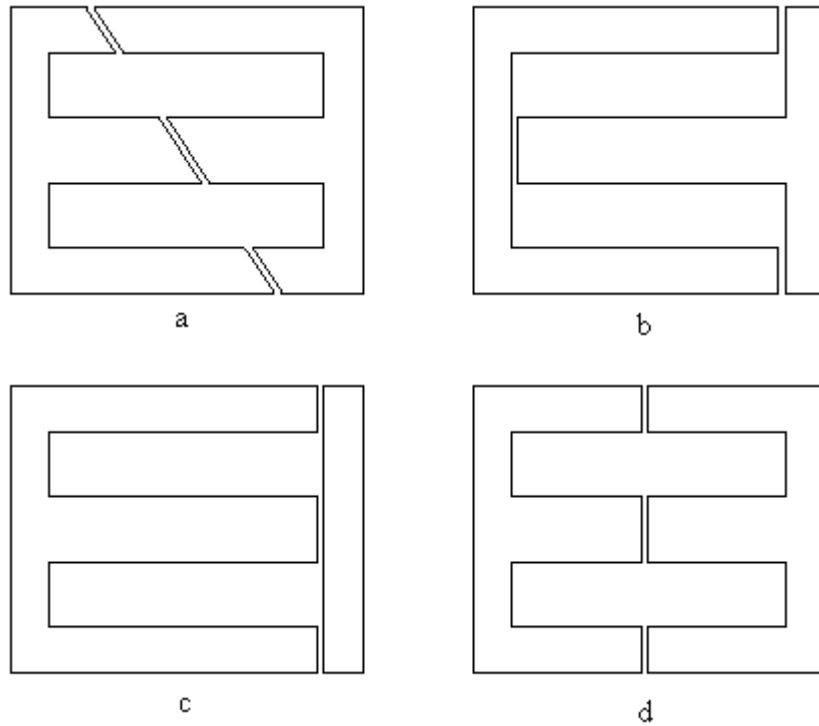
Bileşenlerine göre kategorize edilmiş alaşımlar 6 ana grupta sınıflandırılır.

1. Düşük karbonlu çelik,
2. Silikon çelik,
3. Nikel-demir,
4. Kobalt-nikel-demir,
5. Kobalt-demir,
6. Ferrit,

Bu malzemeler demir ve diğer manyetik malzemelerin oksit karışımıdır. Elektriksel direnci yüksek, fakat akı yoğunlukların doyma değerleri düşüktür. Girdap (eddy) akımı kayıpları yoktur. Düşük girdap (eddy) akımlarından dolayı yüksek frekanslardaki işlemlerde tercih edilirler (10 kHz'den büyük frekanslarda). [22]

3.2 Nüve Boyutu ve Şekli

Reaktör üretiminde, birçok farklı boyut ve şekilde nüveler kullanılmaktadır, bir formül kullanarak bir seçim yapmak imkansızdır. Reaktör tasarımı deneme ve hata metodu yerine deneyime ve ampirik veriye ihtiyaç duyar. Şekil 3.1'de genel nüve şekilleri verilmektedir. Şekil 3.1'de c konfigürasyonundaki E-I tipi en popüler olanıdır. Bu şeklin bir avantajı, bobinlerin nüveden ayrı olarak sarılabilmesi ve sonra nüveye monte edilebilmesidir. [22]



Şekil 3.1: Nüve konfigürasyonunun farklı tipleri [22]

Şekil 3.1'de 4 farklı yapıda gösterilen shell tipi nüvede, orta bacak dış bacaklardan daha geniştir. Genelde 2 katı geniştir. Çünkü tüm akı orta bacak tarafından taşınır,

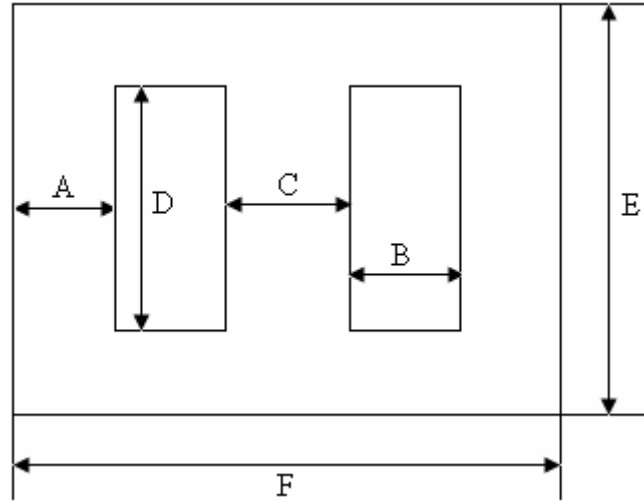
fakat akının sadece yarısı dış bacaklardan geçer. Nüve tipi olanda ise tüm bacak genişlikleri aynıdır, çünkü akı değeri tüm nüve etrafında aynı değerdedir.

Diğer taraftan, shell tipi üç fazlı reaktör / transformatör bacakları aynı genişliğe sahiptir.

Endüktör tasarımında bazı şekiller diğerlerine göre daha uygundur. Tablo 3.1 bazı oranları göstermektedir. Ölçüler, Şekil 3.2'deki B boyutunun katları olarak verilmiştir. Tablo 3.1'deki 1. satır kolay üretim ve ucuzluk açısından genel bir referanstır.

Tablo 3.1: Orantılı nüve boyutları [22]

A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)
1	1	2	3	5	6
0.5	1	1	2.5	3	4
0.73	1	1.36	1.36	2.72	4.8
0.33	1	0.58	1.75	2.33	3.25



Şekil 3.2: Tablo 3.1 için referans [22]

3.3 Bakır Dolgu Faktörü

Sargıdaki toplam bakır alanı birçok faktörden dolayı sargı alanından küçüktür. İlk olarak, iletkenin geometrik şekli sargıyı komple doldurması için uygun değildir. İkincisi, kısa devre olmaması için sarımlar arasında izolasyon olması gerekmektedir.

Toplam bakır alanının sarım alanına oranı bakır dolgu faktörü k_{cu} olarak adlandırılır ve aşağıdaki şekilde formüllendirilir ; [22]

$$k_{cu} = \frac{N \times A_{cu}}{A_w} \quad (3.1)$$

3.4 Isıl Değerlendirmeler

Reaktördeki güç kaybı, nüve kaybı ve bakır kaybı olarak iki bileşenden oluşmaktadır. Yükün akım isteği ile ilgili bakır kaybı değişken, nüve kaybı (histerezis ve fuko akımı kayıpları) ise sabittir. Bakır kaybı, akımın karesi ile doğru orantılıdır. Bakır kaybı ile nüve kaybının eşit olduğu durum elde edildiğinde maksimum verim alınır.

Manyetik malzemede, nüve kayıpları ve bakır kayıpları (bakır sargının direnç artışından dolayı) ısı ile artar. Bundan dolayı ısı artışı, manyetik malzemenin performansını bozacak bazı maksimum değerlerin aşağısında tutularak kontrol altında olmalıdır [22]. Pratik olarak maksimum ısı genelde 100-125°C de sınırlı tutulmaktadır.

3.5 Yüzey Etkisi (Skin Effect)

DC ve düşük frekanslarda, iletken tarafından taşınan akım iletken kesiti boyunca düzgün olarak dağıtılmaktadır. Fakat yüksek frekanslarda, akım iletken yüzeyine yakın yerde yoğunlaşmaktadır. Bu olay yüzey etkisi olarak adlandırılır. Toplam akım yoğunluğu iletken yüzeyinde en fazladır ve iletkenin içerisine doğru katlanarak zayıflar. Karakteristik zayıflama boyu yüzey derinliğidir ve yüzey derinliği aşağıda belirtilmektedir; [22]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w \times \mu \times \sigma}} \quad (3.2)$$

burada $f = \frac{w}{2\pi}$ uygulanan magnetik alanın frekansı,

μ = nüve malzemesinin manyetik geçirgenliği,

σ = manyetik malzemenin iletkenliğidir.

Tablo 3.2 'de 100° deki farklı frekanslar için bakırdaki yüzey derinliği gösterilmektedir.

Tablo 3.2 : 100°deki farklı frekanslar için bakırdaki yüzey derinliği [22]

Frekans	50 Hz	5 kHz	20 kHz	500 kHz
δ	10.6 mm	1.06 mm	0.53 mm	0.106 mm

Eğer kullanılan iletkenlerin kesit boyutu yüzey derinliğinden büyük ise, akım yüzeye yakın ince kat üzerinden akacağından iletkenin efektif direnci dc dirençten çok daha büyük olacaktır. Bu da sargı kayıplarında artışla sonuçlanır.

Bu problem yüzey derinliği sırasında kesit boyutu ile iletkenler kullanılarak önlenabilir.

Yüzey etkisi, nüvede de bakır sargılar için açıklanan aynı tarzda meydana gelir. Eğer nüvenin kesit boyutu yüzey derinliğine göre büyük olduğu karşılaştırıldığında, manyetik akı yoğunluğu nüve yüzeyinde maksimumdur ve nüvenin içine doğru katlanarak zayıflar.

Bundan dolayı, manyetik malzemeler birçok ince lamine saçlardan yapılır ve her bir lamine saç bir diğerinden üzerine ince bir izolasyon kaplanarak elektriksel olarak izole edilir. Dolgu faktörü, manyetik malzemenin kesit alanının nüvenin kesit alanına oranı olarak tanımlanır. Dolgu faktörü tipik olarak 0,9-0,95 arasında alınır. Çünkü nüvenin toplam alanının bir kısmı izolasyon katlarından meydana gelmektedir. Yüzey derinliğinin tipik bir değeri 60 Hz'de 1 mm'dir.

4. MODELİN ÜRETİLMESİ

4.1 Harmonik Filtreleme, Seri (Hat) Reaktör Uygulamaları

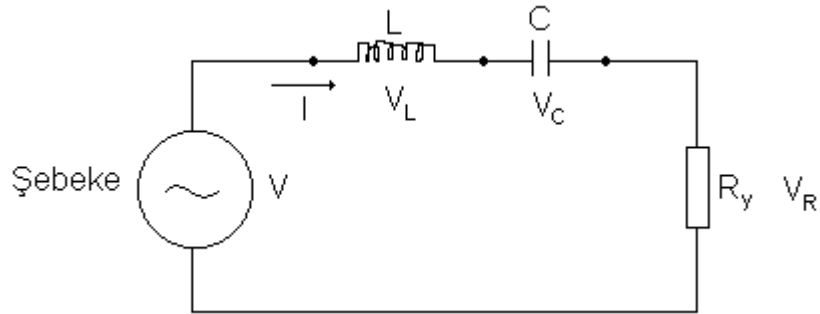
Reaktörler reaktif enerji depo eden elektromekanik elemanlardır. Alternatif akım şebekesine bağlandığında şebekeden reaktif güç çekerler. Kapasiteler de reaktif enerji depo eden elemanlardır; kapasitelerin depo ettiği enerji reaktörlerin depo ettiği enerjiye göre ters işaretlidir. [23]

Sinüzoidal gerilim veren bir alternatif akım şebekesine, endüktansı L (H) olan bir reaktörle kapasitesi C (F) olan bir kapasite bir R (Ω) yükü üzerinden birbiri ile seri olarak bağlanmış olsun. Şekil 4.1' de bağlantı, akım ve gerilimler gösterilmektedir.

$$IV_L I = [(2 \times \pi \times f) \times L] \times I = X_L \times I \quad (4.1)$$

$$IV_C I = \left[\frac{1}{(2 \times \pi \times f) \times C} \right] \times I = X_C \times I \quad (4.2)$$

$$IV_R I = R_y \times I \quad (4.3)$$



Şekil 4.1: Gerilimi V olan bir şebekeye bağlı L, C ve R elemanları [23]

Bu devrede sürekli sinüzoidal çalışmada gerilim ve güç bağıntıları aşağıda verilmiştir;

$$V = V_R + V_L + V_C \quad (4.4)$$

$$V = [R_y + j \times (X_L - X_C)] \times I \quad (4.5)$$

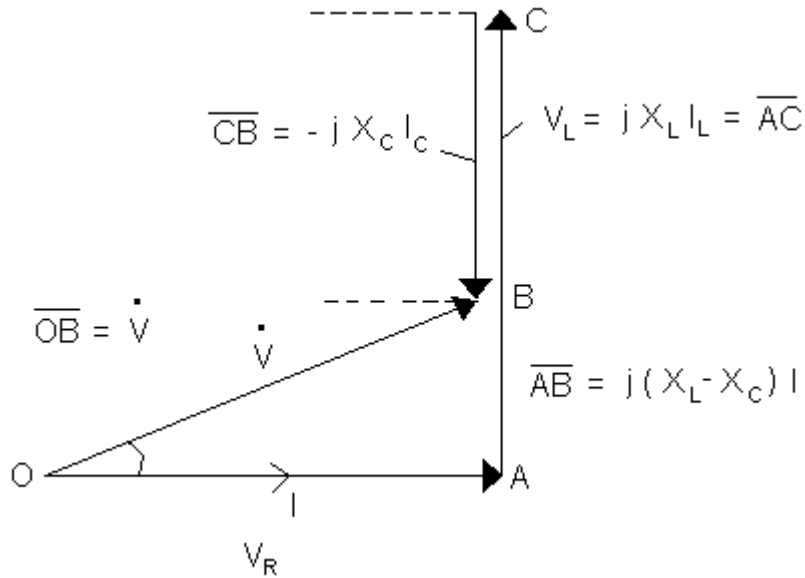
Şebekeden alınan aktif ve reaktif ortalama güçlerin toplamı, (4.4) denklemini I^* ile çarparsak

$$S = R \times I^2 + (X_L - X_C) \times I^2 \quad (4.6)$$

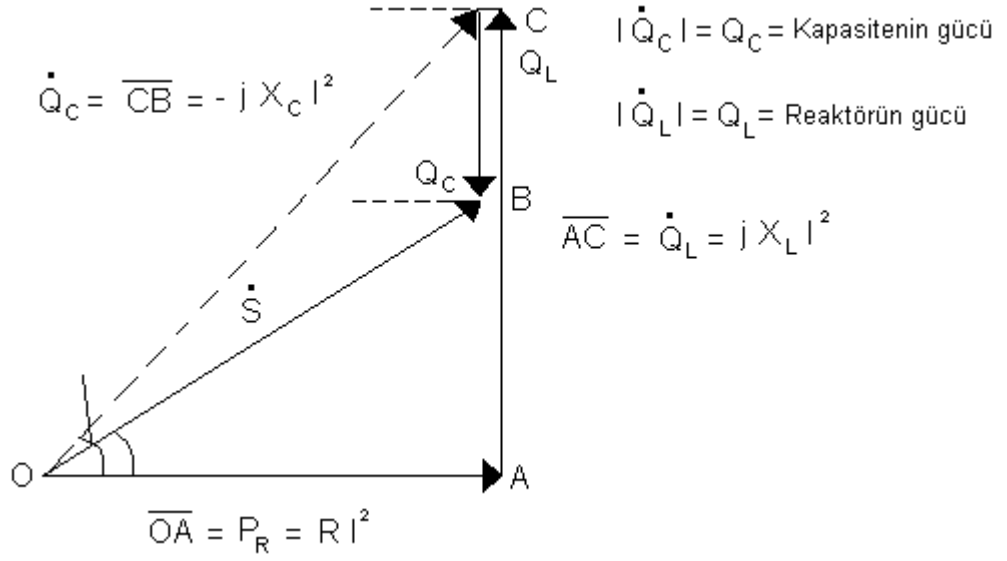
Görünen Güç = Aktif Güç + Reaktif Güçtür. Ortalama güçler ;

$$P_r = R \times I^2 \quad Q_L = X_L \times I^2 \quad Q_C = -X_C \times I^2 \quad (4.7)$$

Gerilim ve güçleri birer diyagramla gösterebiliriz. Alternatif akımda $I^2 = (I) \times (I^*)$ dır. Güçler için, fazörleri;



Şekil 4.2: Seri bağlı R_y , L ve C elemanlarından oluşan bir devrenin sinüzoidal çalışmada fazör diyagramı [23]



Şekil 4.3: Ry, L ve C elemanlarından oluşan seri bağlı bir devrede ortalama güçler [23]

kullanarak

$$S = P_R + Q_L - Q_C \quad (4.8)$$

yazılır. Burada;

\dot{S} = görünür güç fazörü [VA]

P_R = R direncinde harcanan aktif güç [Watt]

\dot{Q}_L = Reaktörün ortalama güç fazörü [VAr]

\dot{Q}_C = Kapasitenin ortalama güç fazörü [VAr]

Reaktörler, şebekelerde kapasitif akımları küçültmek için; Kapasiteler, şebekelerde endüktif akımları küçültmek için kullanılırlar. Kapasiteler, yalnız başına güç faktörü (Cos ϕ)' yi büyütmek amacı ile kompanzasyon devrelerinde kullanılır. Kapasitelerle reaktörler, akım ve gerilim harmoniklerini süzmek amacı ile filtre devrelerinde

kullanılır; ancak bu halde hem filtre görevi ve hem de güç faktörü kompanzasyonu görevini de yaparlar.

4.1.1 Filtre devrelerinde kullanılan reaktörlerin endüktans değerleri

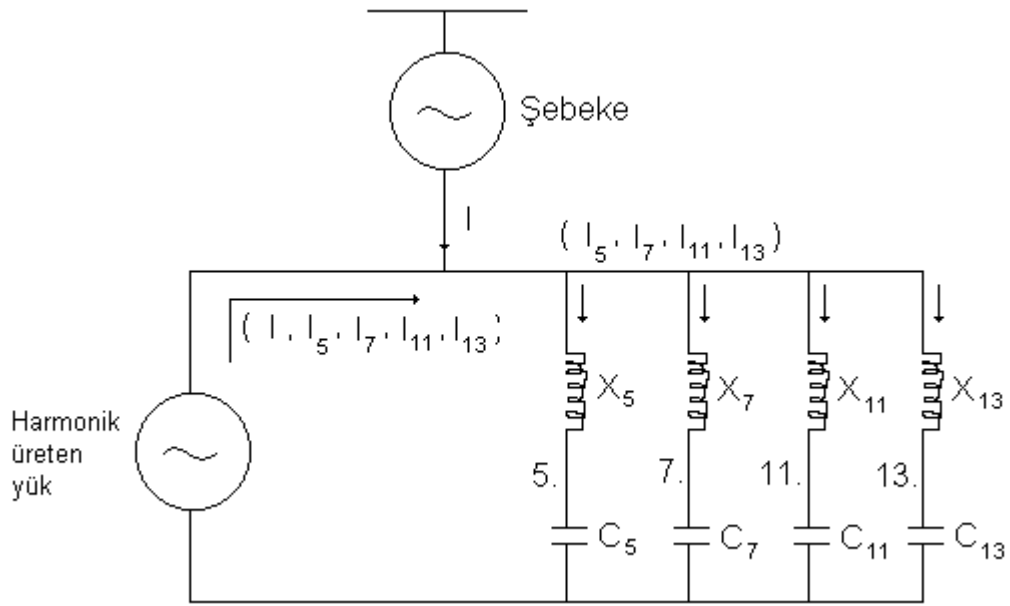
Güç elektroniği elemanları (Tristör, Triak, vb.....), doğrultucular, UPS'ler (uninterruptable power supply = kesintisiz güç kaynağı), frekans değiştiren sürücüler, eviriciler, bilgisayarlar, lineer olmayan elektrik devreleri, değişik mertebeli akım ve gerilim harmonikleri üretirler. Harmonikler 2,3,4,5,7,9,11,13,15,17,19,21 ., mertebeli olabilir. [23]

Harmonikler filtre devreleri ile yok edilmedikçe, endüstride seri ve paralel rezonanslara neden olarak, büyük arıza ve kayıplara neden olurlar. Ayrıca sistem kayıplarını da artırır. Özellikle, endüstride 5 ve 7. harmoniklerin kompanzasyonu büyük önem taşımaktadır.

Filtreler, aslında harmonikleri küçülten kontrollü özel rezonans devreleridir. Burada seri rezonans devreli filtreler ele alınacaktır.

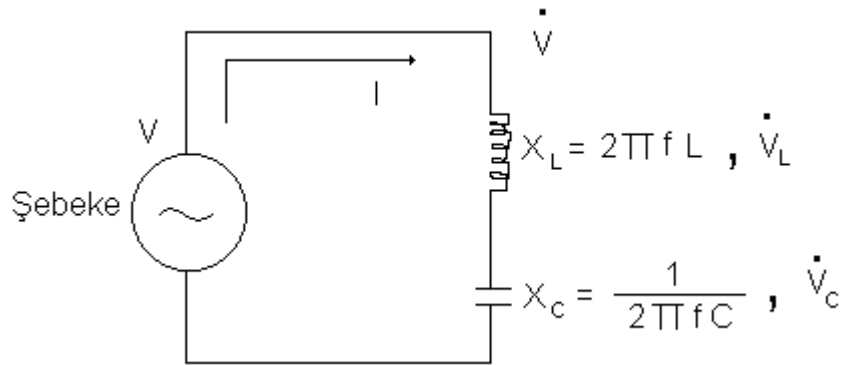
4.1.2 Seri rezonans ilkesine göre çalışan harmonik filtreler

Sinüzoidal gerilim veren bir şebekede 5, 7, 11, 13 harmoniklerini üreten bir yük (elektrik ark ocağı, elektroliz sistemi, motor sürücüsü gibi harmonik üreten bir yük) bağlandığını varsayalım. Şekil 4.4'te şebeke, yük ve harmonikleri kompanze edecek 5, 7, 11 ve 13. harmonik seri rezonans devreleri gösterilmiştir. [23]



Şekil 4.4: 5, 7, 11 ve 13. harmonikleri kompanse eden filtreler [23]

Şimdi sadece belli bir harmoniği kompanse edecek olan filtre devresini göz önüne alalım.



Şekil 4.5: Seri rezonans filtresi; sadece belli bir harmoniği kompanse eden filtre devresi [23]

50 Hz'lik bir şebekede, 5.ci harmonik akım ve geriliminin frekansı $(5) \times (50) = 250$ Hz; 7.ci harmonik akım ve geriliminin frekansı $(7) \times (50) = 350$ Hz; n.ci harmonik akım ve geriliminin frekansı $(n) \times (50)$ Hz olur. Tam rezonans noktasında, seri rezonans devresinin n. harmonik için aşağıdaki eşitliği sağlar.

$$X_L = X_C \text{ ya da } LC (n\omega)^2 = 1 \quad (4.9)$$

ya da $(n\omega) = \omega_r$ denirse, rezonans açısal frekansı için

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \times C}} \quad (4.10)$$

elde edilir.

Bir seri rezonans devresinde temel bileşenin frekansı f_o , açısal frekansı ω_o olsun. Herhangi bir yaklaşık harmonik frekansı f_r' , açısal frekansı ω_r' olsun. Rezonans faktörü (p);

$$p = \left(\frac{\omega_o}{\omega_r'} \right)^2 = \left(\frac{f_o}{f_r'} \right)^2 \quad (4.11)$$

olarak tanımlanır. Burada, f_o Hz olarak sistem frekansını, f_r' ise L ve C elemanlarının yaklaşık rezonans koşulunu yerine getirmesini istediğimiz frekanstır. Rezonans faktörünün aşağıdaki reaktans, gerilim ve reaktif güç oranlarına eşit olduğu gösterilebilir.

$$p = \left(\frac{\omega_o}{\omega_r'} \right)^2 = \left(\frac{X_{Lo}}{X_{Co}} \right) = \left(\frac{V_{Lo}}{V_{Co}} \right) = \left(\frac{Q_{Lo}}{Q_{Co}} \right) \quad (4.12)$$

(4.12). bağıntıdan 50 Hz'deki reaktansların oranı,

$$\left(\frac{X_{Lo}}{X_{Co}} \right) = \left(\frac{L \times \omega_o}{\frac{1}{C \times \omega_o}} \right) = L \times C \times \omega_o^2 \quad (4.13)$$

(4.13) eşitliğinin sağ yanını $(\omega_r^2 / \omega_o^2)$ ile çarparsak,

$$\left(\frac{X_{Lo}}{X_{Co}}\right) = L \times C \times \omega_o^2 \times \left(\frac{\omega_r^2}{\omega_o^2}\right), \quad L \times C \times \omega_r^2 = 1$$

$$\left(\frac{X_{Lo}}{X_{Co}}\right) = \left(\frac{\omega_o}{\omega_r}\right)^2 \quad (4.14)$$

Burada, ω_r filtre devresini ayarlamak istediğimiz rezonans açısal frekansını gösterir. Örnek olarak, sistemde var olan akım ve gerilim harmoniklerinin, rezonansa yol açacağı frekans $(5) \times (50) = 250$ Hz; ve $\omega_r = 5 (2 \times \pi \times 50)$ rad / san'dir. Filtre tam bu frekansa ayarlanmaz; ayarlanırsa seri rezonans halinde akım sonsuza ve paralel rezonans halinde ise gerilim sonsuza gider. Doğal olarak buna izin verilmez.

Bu nedenle, filtre devresinin rezonans frekansı $\omega_r = 5 (2 \times \pi \times 50)$ ye ayar edilmez; örneğin ya $\omega_r < 5 (2 \times \pi \times 50)$ ya da $\omega_r > 5 (2 \times \pi \times 50)$ ye ayar edilir. 5. harmonik için pratikte $\omega_r (2 \times \pi \times 225 \dots 2 \times \pi \times 210 \dots 2 \times \pi \times 189)$ ya da $\omega_r (2 \times \pi \times 275 \dots 2 \times \pi \times 300 \dots 2 \times \pi \times 310)$ seçilebilir. Benzer şekilde reaktif güç oranı için,

$$\left(\frac{Q_{Lo}}{Q_{Co}}\right) = \left(\frac{V_{Lo} \times I}{V_{Co} \times I}\right) = \left(\frac{L \times \omega_o \times I^2}{\frac{I^2}{C \times \omega_o}}\right) = L \times C \times \omega_o^2 \times \left(\frac{\omega_r^2}{\omega_o^2}\right),$$

$L \times C \times \omega_r^2 = 1$ olduğundan,

$$p = \left(\frac{Q_{Lo}}{Q_{Co}}\right) = \left(\frac{\omega_o^2}{\omega_r'^2}\right) \quad \text{ya da benzer şekilde} \quad (4.15)$$

$$\left(\frac{V_{Lo}}{V_{Co}}\right) = \left(\frac{\omega_o}{\omega_r'}\right)^2 \quad (4.16)$$

Şebekeden, (L, C) seri bağlı elemanların aldığı akım ve reaktif güç,

$$I = \frac{|V|}{|X_L - X_C|} = \frac{V}{X_L - X_C} \quad (4.17)$$

reaktif güç

$$Q_{To} = V \times I = V \times \frac{V}{(X_{Lo} - X_{Co})} = \frac{V^2}{(X_{Lo} - X_{Co})} \quad (4.18)$$

burada,

V = şebeke ya da sistem gerilimi [V]

X_{Lo} = reaktörün 50 Hz'teki reaktansını [Ω]

X_{Co} = kapasitenin 50 Hz'teki kapasite değerini [Ω]

Q_{To} = toplam reaktif gücü [VAr], filtre gücünü göstermektedir.

Q_{Co} ve Q_{To} 'ı bağıntılarda kullanarak X_{Co} 'yi belirlersek,

$$V = V_{Co} - V_{Lo}$$

$$Q_{To} = Q_{Co} - Q_{Lo}$$

$$V \times I = Q_{To} = (V_{Co} \times I) - (V_{Lo} \times I) \quad (4.19)$$

olduğundan, (4.15) bağıntısından;

$$Q_{Lo} = p \times Q_{Co}$$

$$Q_{To} = Q_{Co} - (p \times Q_{Co}) = Q_{Co} \times (1 - p) \quad (4.20)$$

$$Q_{To} = \left(\frac{Q_{Lo}}{p} \right) - Q_{Lo} = Q_{Lo} \times \frac{(1 - p)}{p} \quad (4.21)$$

sonuç olarak,

$$Q_{Co} = \left(\frac{Q_{To}}{1-p} \right) \quad (4.22)$$

$$Q_{Lo} = Q_{To} \times \frac{P}{(1-p)} \quad (4.23)$$

$$p = \left(\frac{f_o}{f_r} \right)^2$$

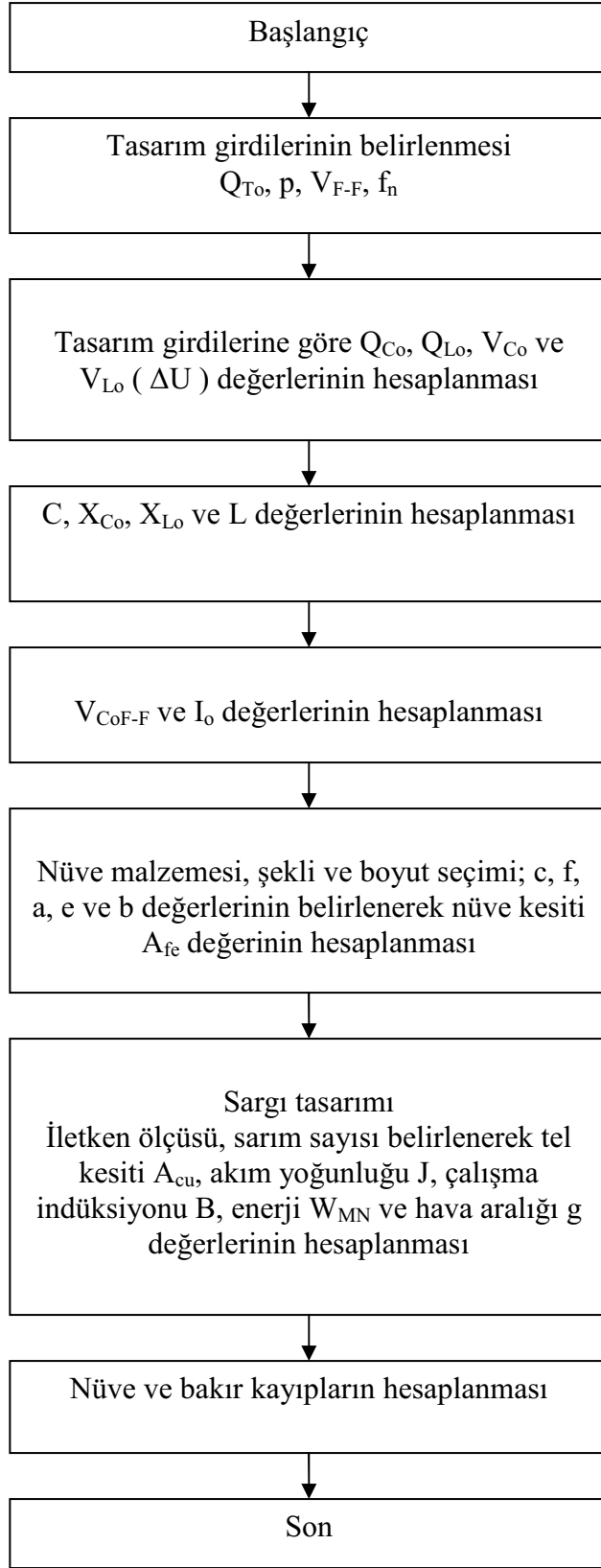
Q_{To} ve p verildiğinden (4.22) ve (4.23) bağıntılarından Q_{Co} ve Q_{Lo} bulunur.

Buradan $I_{\text{reaktör}}$ ve I_{kapasite} akımları bulunur.

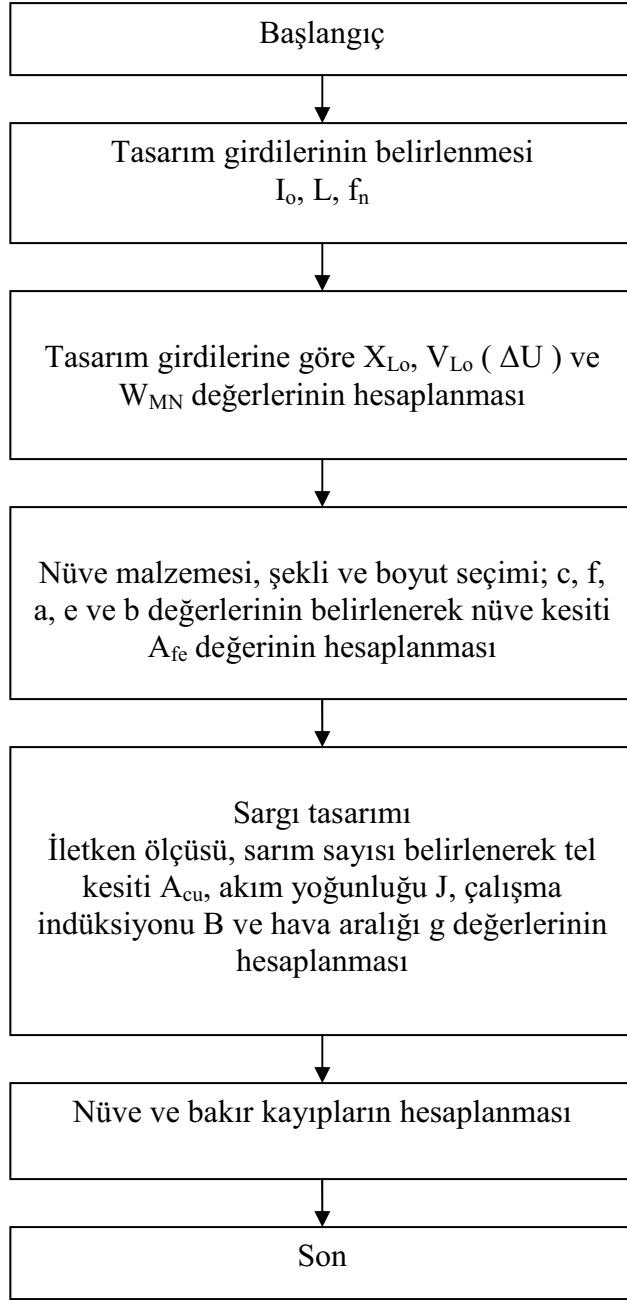
$P = 0$ için; $Q_{Co} = Q_{To}$, $Q_{Lo} = 0$ olur. Bu halde, güç faktörünün ($\text{Cos } \varphi$) büyütülmesi olarak tanımlanan kompanzasyon yapılır. Orijinal $\text{Cos } \varphi$ değerini istenen $\text{Cos } \varphi'$ değerine büyötmek için gereken kapasite gücü;

$$\tan \varphi' = \left(\frac{Q_L - Q_C}{P_R} \right)$$

olur. Q_L , P_R , φ' verilirse, Q_C kompanzasyon gücü bulunur.



Şekil 4.6: Filtre reaktör tasarımının akış şeması



Şekil 4.7: Seri (hat) reaktör tasarımının akış şeması

ÖRNEK :

$$Q_{T0} = 50 \text{ kVAr}$$

$$p = \% 7$$

$$V_{FF} = 400 \text{ V}$$

değerlerindeki bir harmonik filtre reaktörünün hesabı ;

$$V_{FN} = 400 / \sqrt{3} = 231 \text{ V} \quad ; \quad (4.22) \text{ ve } (4.23) \text{ ten}$$

$$Q_{Co} = Q_{T0} / (1-p) = 50 / (1-0,07) = 53,76 \text{ kVAr}$$

$$Q_{Lo} = Q_{T0} \times [p / (1-p)] = 50 \times [0,07 / (1-0,07)] = 3,76 \text{ kVAr}$$

$$V_{Co} = V_{FN} / (1-p) = 231 / (1-0,07) = 248,34 \text{ V}$$

$$V_{Lo} = V_{Co} - V_{FN} = 248,34 - 231 = 17,387 \text{ V}$$

$$C = (Q_{Co} \times 1000) / (3 \times \omega_0 \times V_{Co}^2) = (53,76 \times 1000) / (3 \times 314 \times 248,34) = 925,52 \text{ } \mu\text{F}$$

$$X_{Co} = 1 / (\omega_0 \times C) = 1 / (314 \times 0,001851) = 3,44 \text{ } \Omega$$

$$X_{Lo} = p \times X_{Co} = 0,07 \times 3,44 = 0,24 \text{ } \Omega$$

$$L = (X_{Lo} \times 1000) / 314 = 0,77 \text{ mH}$$

$$V_{CoFF} = V_{Co} \times \sqrt{3} = 248,34 \times 1,732 = 430,1 \text{ V}$$

$$I_0 = V_{Lo} / X_{Lo} = 17,387 / 0,24 = 72,17 \text{ A}$$

Tablo 4.1: 400 V – 72,17 A – 0,77 mH reaktör hesap tablosu

VERİLER	
QTo	: 50 kVAr
Un	: 400 V
fn	: 50 Hz
p	: 7,00 %
fr	: 189 Hz

SARGI	
TEL	: 120 X 0,50 mm
N	: 25 SPIR
S	: 60 mm ²
J	: 1,20 A/mm ²

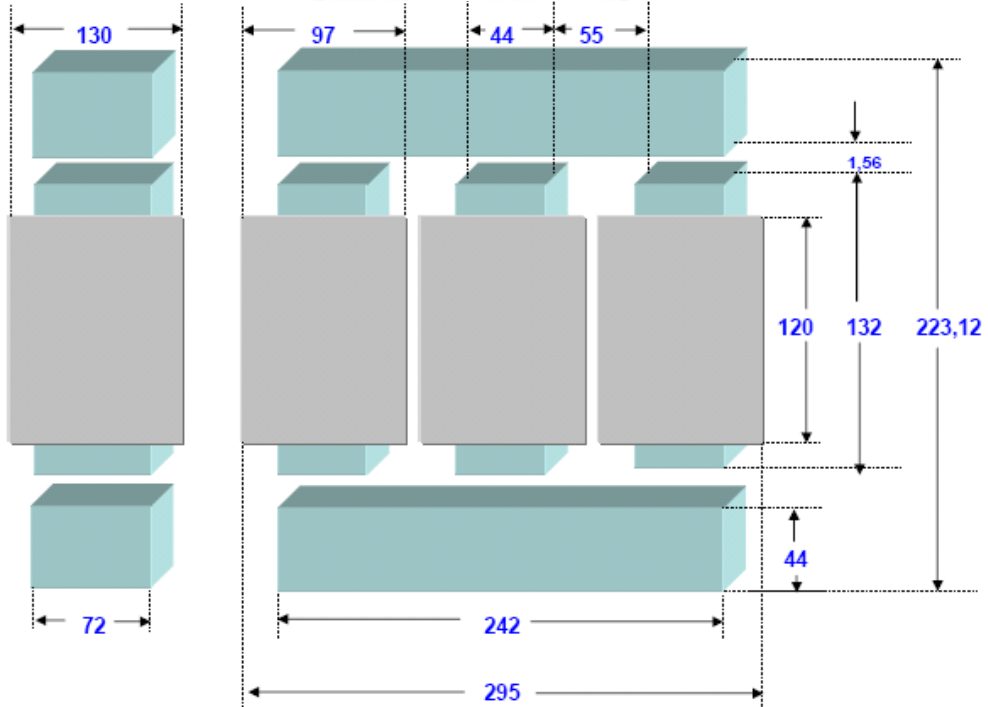
SONUÇ	
XL	: 0,241 ohm
△U	: 17,388 V
A	: 30,41 cm ²
B	: 1,029 T
WMN	: 1,997 VAs
g	: 1,56 mm

HESAPLAR	
QCo	: 53,76 kVAr
Qlo	: 3,76 kVAr
Vco	: 248,33 V
VLo	: 17,38 V
Cn	: 925,52 µF
XCo	: 3,441 Ω
XLo	: 0,241 Ω
Ln	: 0,77 mH
Io	: 72,17 A
VCo FF	: 430,10 V

NÜVE	
c	: 44 mm
f	: 72 mm
A	: 30,41 cm ²
a	: 242 mm
e	: 132 mm
b	: 176 mm
SONUÇ	
Bw	: 26,5 mm
Gal	: 4,3 kg
Gfe	: 20,5 kg
HGW	: 0,7 kg
Gcu	: 14,2 kg
NMN	: 0,5 kg

HESAP KONTROLÜ	
fr	: 189 Hz
QC	: 50 kVAr
Ln	: 0,767 mH
p	: 7,00 %

KAYIPLAR	
MLT	: 31,74 cm
RAI	: 0,0037 Ω
PAI	: 58,09 W
RCu	: 0,0023 Ω
PCu	: 35,68 W
PFe	: 8,601 W



Şekil 4.8: 400 V – 72,17 A – 0,77 mH reaktör şekli

4.2 Maxwell Benzetim Programı ile Modelin Oluşturulması

4.2.1 Maxwell

Maxwell; üç boyutlu elektrik, magnetostatik, girdap akımı ve geçici problemlerin çözümleri için sonlu elemanlar analizi kullanan yüksek performanslı interaktif yazılım paketidir.

4.2.2 3D elektrik alanlar

Dielektrik içindeki 3D Elektrostatik alanlar, kullanıcı tarafından tanımlanan gerilim ve akım dağıtımı ile oluşurlar. Ek olarak hesaplanan miktarları moment, kuvvet ve kapasiteyi içerecek şekilde tanımlanabilir. İletkenler içindeki 3D Elektrik alanlar, gerilim, elektrik alan ve DC akım yoğunluğu dağıtımı ile karakterize edilirler.

4.2.3 Magnetostatik analiz

Lineer ve non-lineer 3D magnetostatik alanlar kullanıcı tarafından tanımlanan DC akım yoğunluğu, gerilim, kalıcı mıknatıslık veya dışarıdan uygulanan magnetik alanların dağıtımı ile oluşurlar. Ek olarak hesaplanan miktarları moment, kuvvet ve endüktansları içerir şekilde tanımlanabilir.

4.2.4 Girdap (eddy) akımlarının analizi

Katı iletkenler içerisinde endüklenen girdap akımları ile harmonik (zaman içerisinde sinüzoidal değişim) kararlı durum 3D magnetic alanlar kullanıcı tarafından tanımlanan AA akımlar veya dışarıdan uygulanan magnetik alanların dağıtımı ile oluşurlar. Girdap akımı çözümü, elektromagnetik dalga radyasyon etkilerini içeren tam dalga çözümüdür.

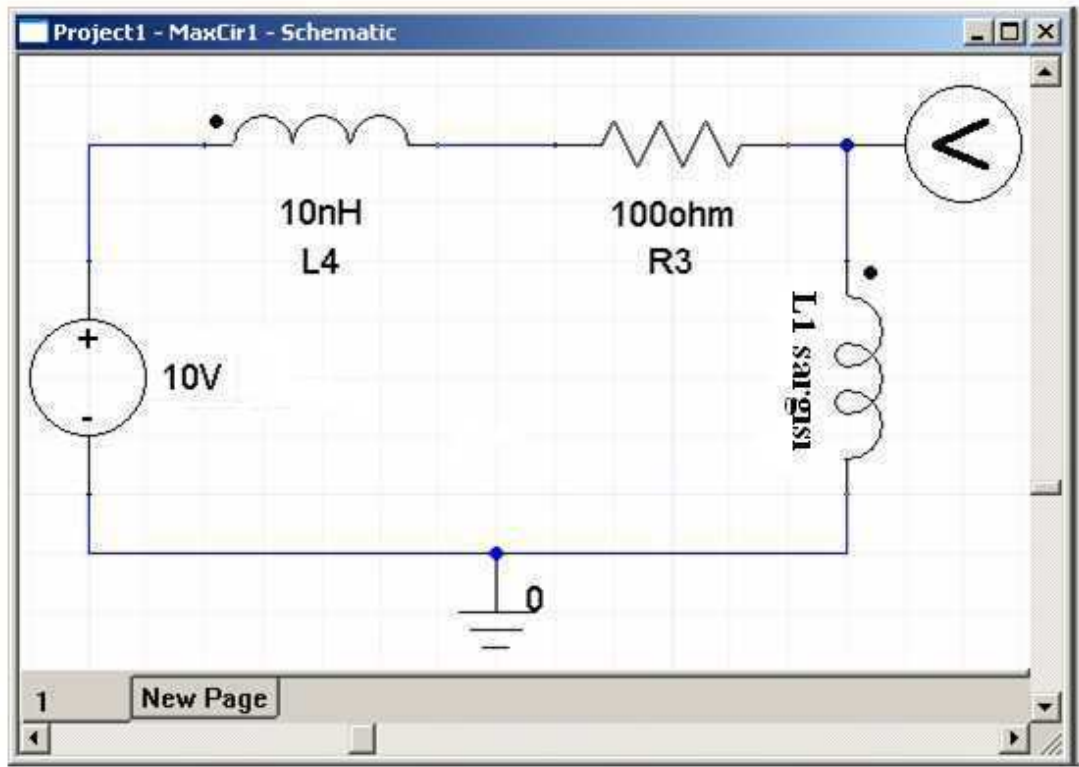
4.2.5 Geçici rejim analizleri

Zaman alanı 3D magnetik alanlar, gerilim ve/veya akım kaynağı tarafından beslenen

kalıcı mıknatıslar ve sargılar tarafından zamanın bir fonksiyonu olarak oluşurlar. Elektriksel devre sargılara bağlanacaktır. Dönen ve çevrimsel hareket etkileri simülasyonda içerecek şekilde olabilir.

4.2.6 Maxwell devre çözümleri

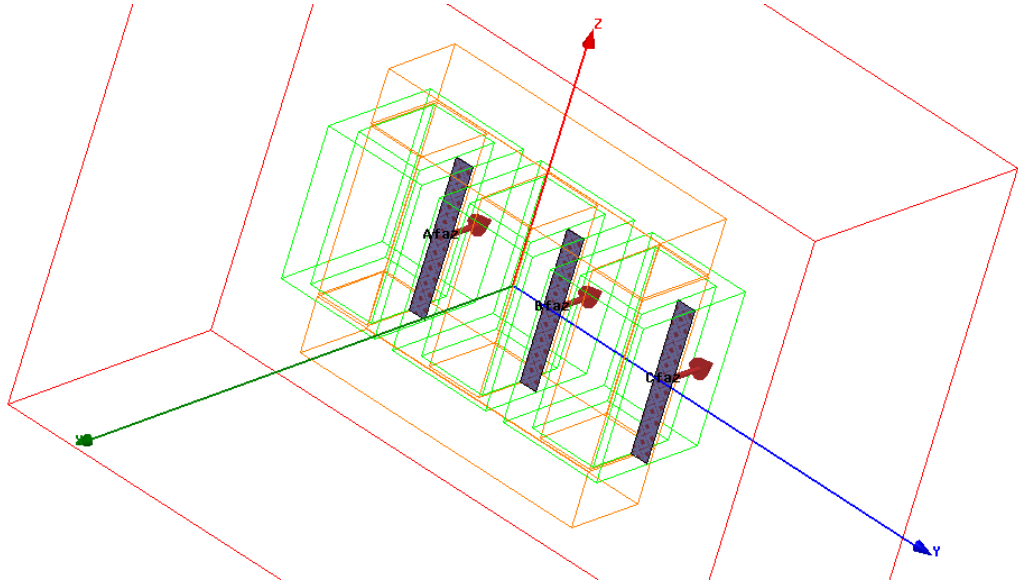
Maxwell benzetim programı yardımıyla, sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenmiş olan magnetik devrelerin zaman domenindeki analizlerinin yapılması mümkün olmaktadır. Bu nedenle öncelikle Maxwell programında tasarlanan reaktörün endüktans değeri hesaplanılacak, daha sonra geçici rejim analizleri yapılarak yüklenme durumlarına bağlı olarak kayıp değerlerinin hesaplanması sağlanacaktır. Maxwell devre çözümlerini gösteren şematik yapı aşağıda Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9: Maxwell devre çözümü şematik yapısı

4.3 400 V – 72.17 A - 0,77 mH Seri Reaktör İçin Maxwell Modeli

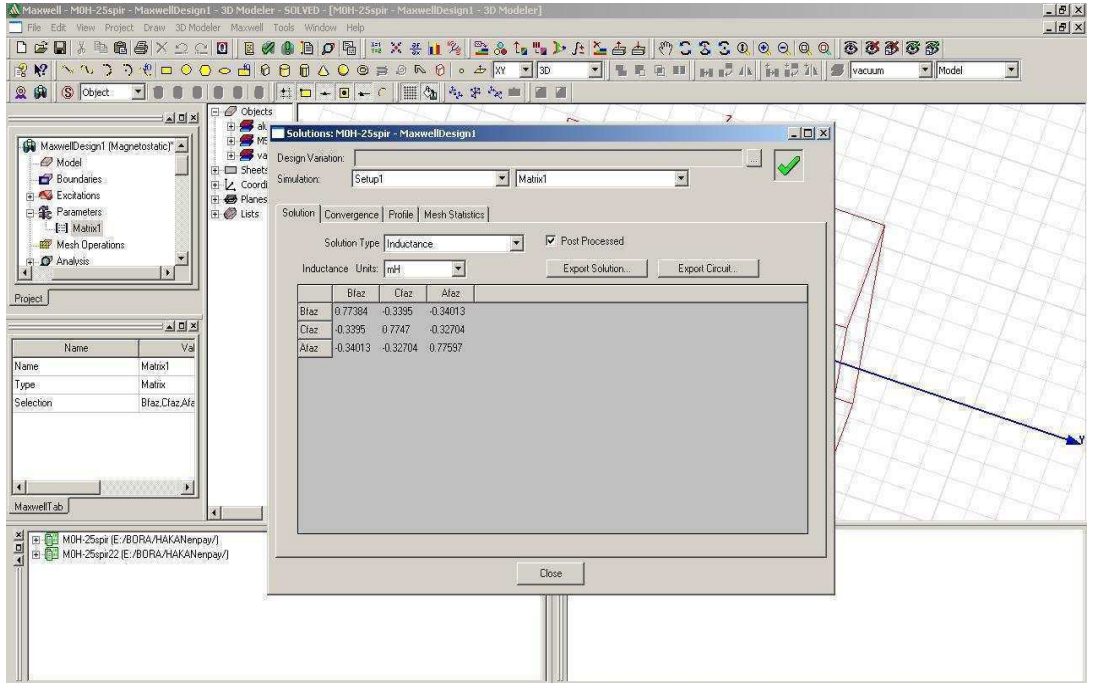
Bir önceki bölümde dizaynı gerçekleştirilen seri hat reaktörünün Maxwell benzetim programı kullanılarak magnetostatik analizleri bu kısımda gerçekleştirilecektir. Bu amaçla, bölüm 4.1.2’de hesaplanan bobin sarım sayısı, yükseklikleri ve nüve ile ilgili bilgiler kullanılmıştır. Buna göre oluşturulan model Şekil 4.10 da gösterilmektedir.



Şekil 4.10: Tasarım ve üretimi yapılan modelin maxwell’de oluşturulan çizimi

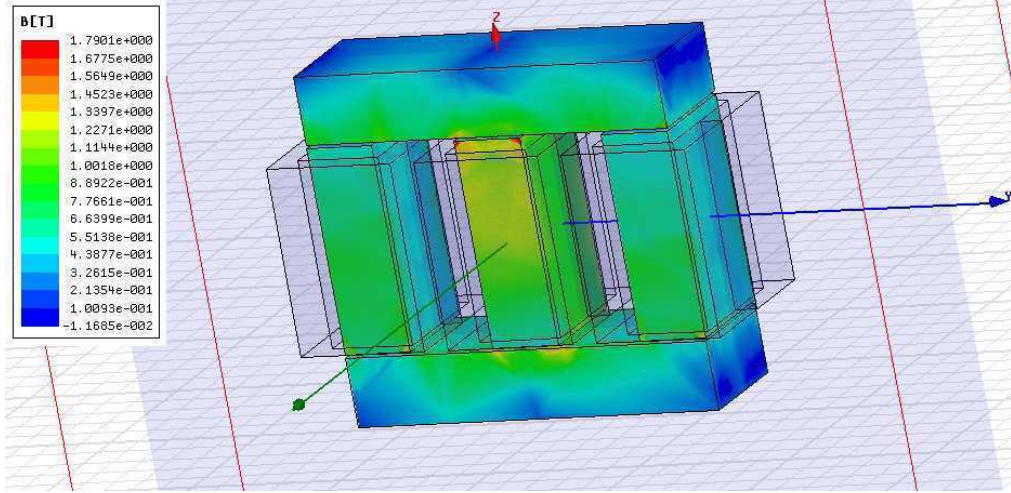
Oluşturulan modelde giriş akımı olarak 72,17 A ve sarım sayısı olarak 25 sarım/bacak sarım oluşturularak programa tanımlanmıştır. Oluşturulan modelden alınan sonuçlarda 0.77 mH değeri bulunmuştur. Fabrikada yapılan ölçümler ve hesaplamalarla bulunan değerler arasında hata sadece %1 mertebesindedir. Simülasyon sonucunda bulunan değerler Şekil 4.11 da gösterilmiştir.

Bu hatanın nedeni ölçme devresindeki yanlışlıklar veya bırakılan hava aralığı değerinin gerçek uygulamalarda tam verilen değerde yapılamaması olarak açıklanabilir.

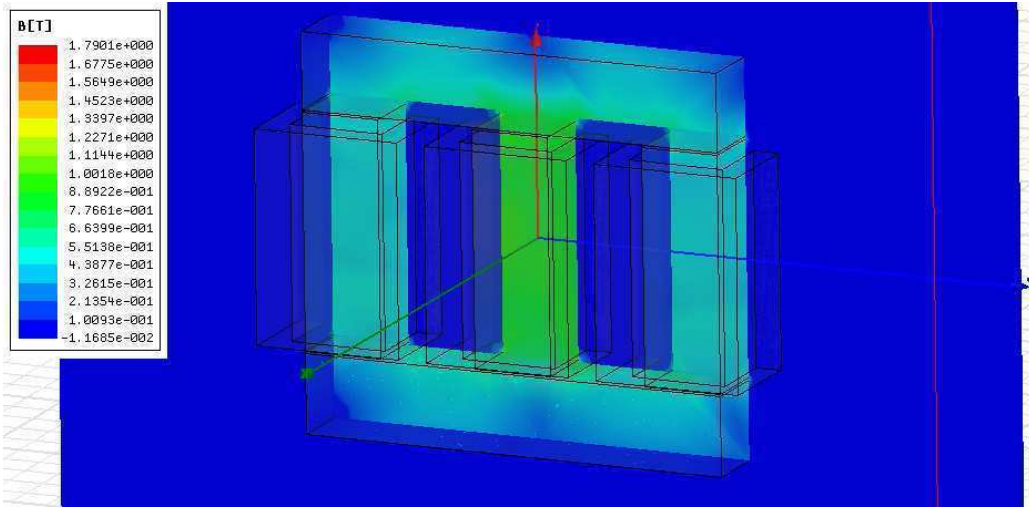


Şekil 4.11 : Tasarım ve üretimi yapılan modelin maxwell'de endüktans değerinin hesaplanması

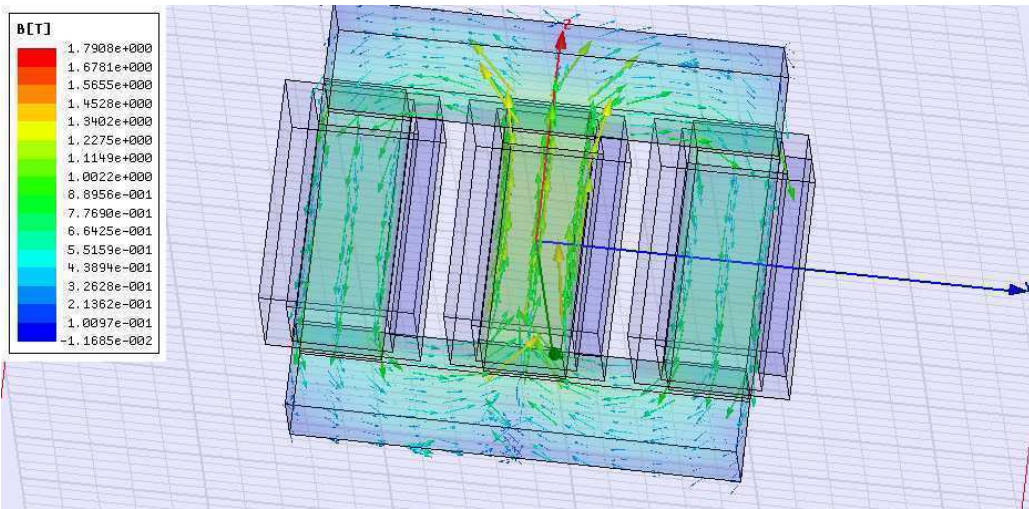
Yapmış olduğumuz simülasyonlardan elde ettiğimiz bir diğer önemli sonuç da, nüve üzerinde istenen magnetik endüksiyon değerlerinin belirlenebilmesidir. Aşağıda uygulanan akım değerlerine göre $t=0$ anına ait endüksiyon dağılımları görülmektedir. Her ne kadar sivri uçlarda endüksiyon değeri 1.7 Tesla olarak görülmekte ise de, nüvenin geneline bakıldığında hesapta kabul ettiğimiz 1 tesla değerini bulmuş olmaktadır. Magnetik akının nüve üzerinde dağılımını gösteren şekiller aşağıda verilmektedir.



(a)



(b)



(c)

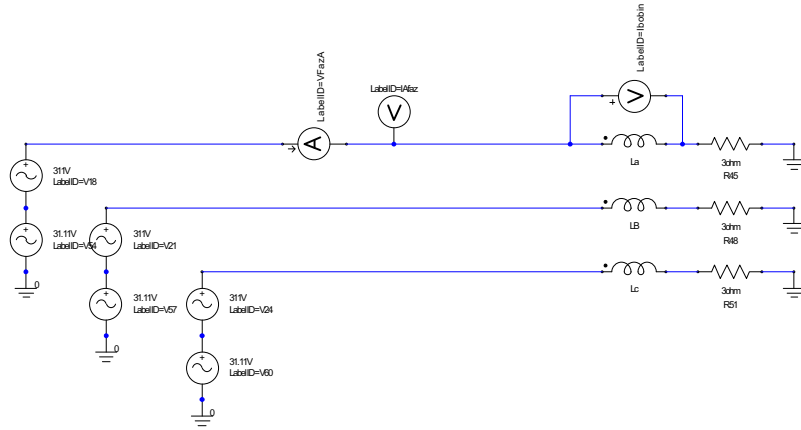
Şekil 4.12 : Tasarım ve üretimi yapılan modelin maxwell'de endüksiyon dağılımının gösterilmesi

5. MODELİN HARMONİK YÜKLENME DURUMLARINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Maxwell geçici rejim analiz kısmı kullanılarak daha önceki bölümlerde prototipi yapılan seri reaktörün hem analizi hem de laboratuvar ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

5.1 Bilgisayar Simülasyonları

Oluşturulan reaktörün harmonik yüklenme durumlarında performansını değerlendirebilmek için, aşağıda verildiği gibi üç farklı harmonik yüklenme durumunda davranışı benzetim çalışmaları kullanılmıştır. Oluşturulan magnetik devrenin zaman domeninde analizlerini yapabilmek için maxwell devre çözümleyicisinde öncelikle modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model şekil 5.1’de gösterilmektedir.

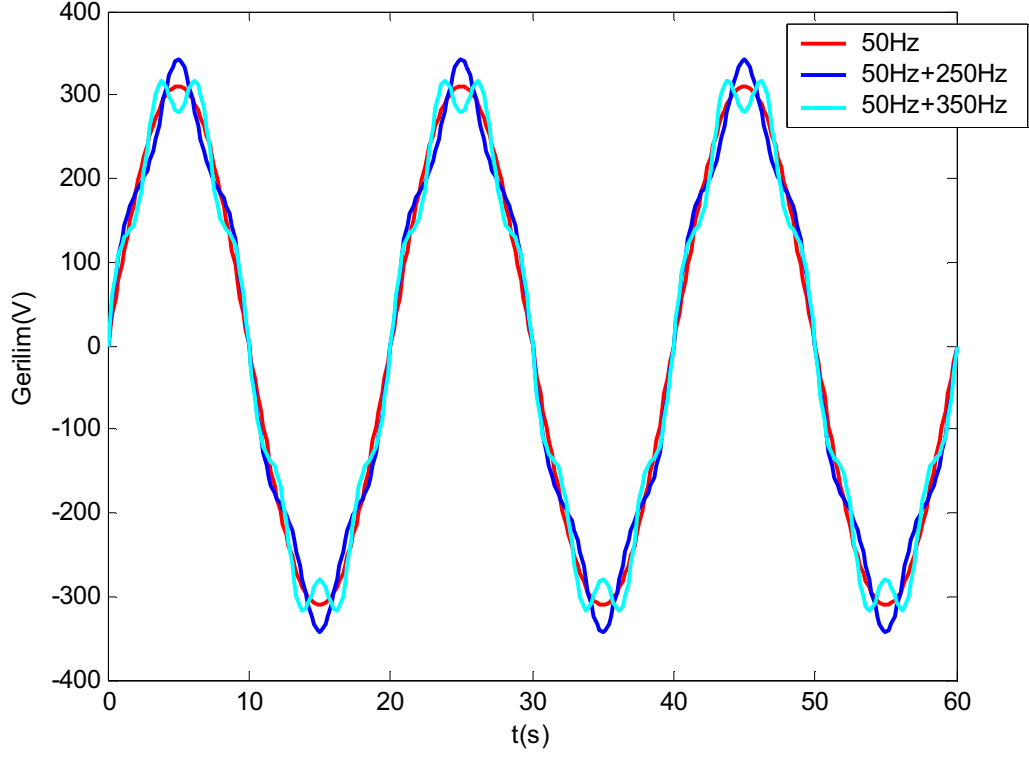


Şekil 5.1: Prototipin harmonik yüklenme durumlarında incelenmesi için oluşturulan model

Seri reaktöre uygulanan gerilim değerleri:

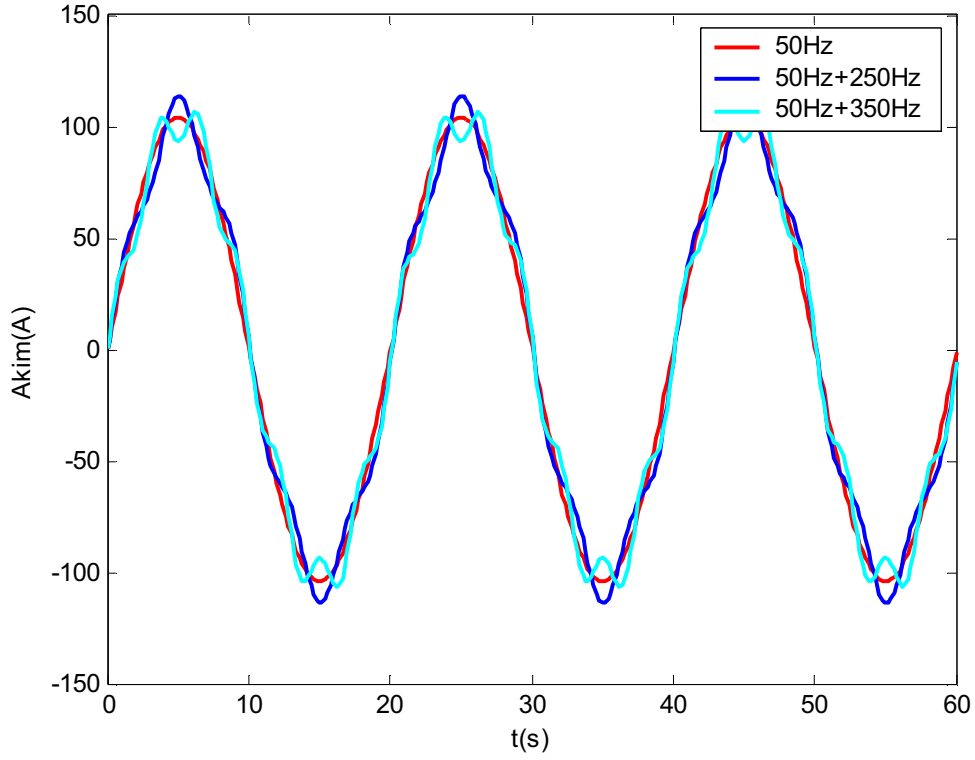
- 50 Hz, 72A (eff), 380/220 V (kırmızı)
- 50 Hz, 250 Hz % 10 V_g - 250 Hz ; % 90 V_g – 50 Hz (mavi)
- 50 Hz, 350 Hz % 10 V_g - 350 Hz ; % 90 V_g – 50 Hz (yeşil)

Bilgisayar simülasyonundan elde edilen değerler aşağıda verilmektedir. Bu değerlere örnek olarak giriş gerilimi, endüklenen gerilim, hat akımı ve nüve kayıpları verilebilir. Her bir durumda elde edilen değerler aynı eksen takımında gösterilerek aralarında oluşan değişiklikleri incelemek mümkün olmaktadır.



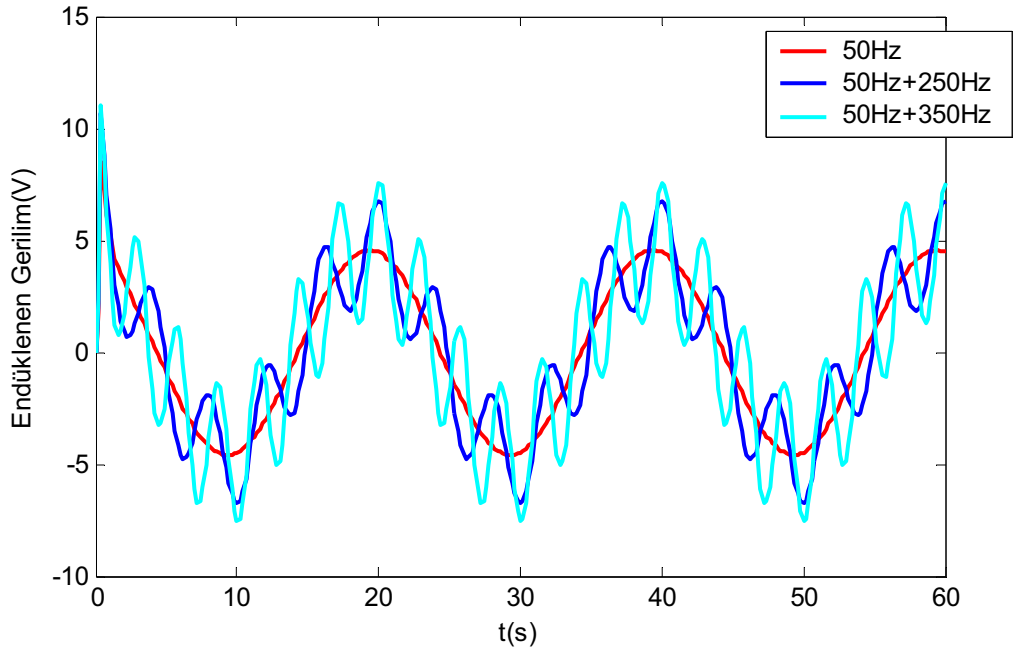
Şekil 5.2: Giriş gerilimleri

Reaktöre giriş gerilimi olarak saf sinüs, saf sinüse 5.harmonik ve saf sinüse 7.harmonik bindirilmiş gerilimler uygulanmıştır. Uygulanan gerilimler şekil 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.3: Hat akımları

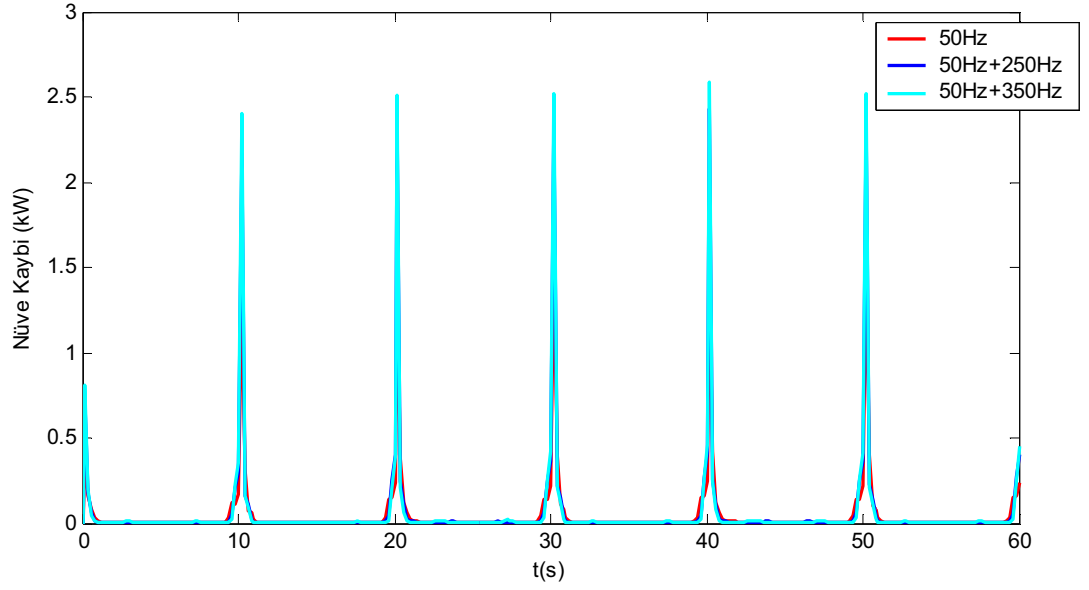
Daha sonra programdan uygulanan gerilime bağlı olarak reaktör üzerinden akan akımlar ölçülmüştür. Beklenildiği gibi uygulanan gerilimle orantılı yük akımı reaktör üzerinden geçmektedir.



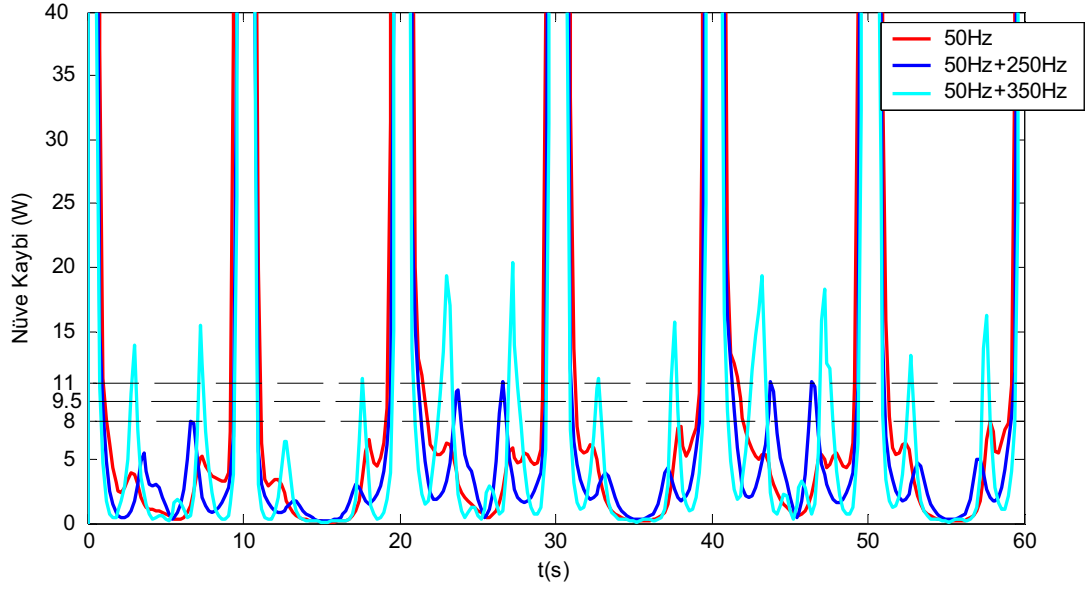
Şekil 5.4: Endüklenen gerilimler

Reaktör üzerinde magnetik endüksiyon değerini ve kayıpları belirleyici nitelikte olan endüklenen gerilim, programdan alınmıştır. Bu değişimler Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Endüklenen gerilim değerine bakıldığında 7.harmonikte en büyük değer oluşmaktadır.

Bilgisayar simülasyonundan nüvede uygulanan gerilime göre oluşan kayıp değerleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir. Harmonik yüklenme değeri arttıkça nüvede oluşan kayıplar artmaktadır. Şekillerin ortalaması alındığında saf sinüs yüklenme durumunda bu reaktör için 8 W kayıp bulunurken, en kötü harmonik yüklenme durumunda ise bu değer 11 W değerlerine yaklaşmaktadır. Zaten daha önceki bölümlerde bu saç için nüve kaybı 50 Hz de 8,6 W civarında bulunmuştu.



Şekil 5.5: Nüve kayıpları (kW olarak)



Şekil 5.6: Nüve kayıpları (W olarak)

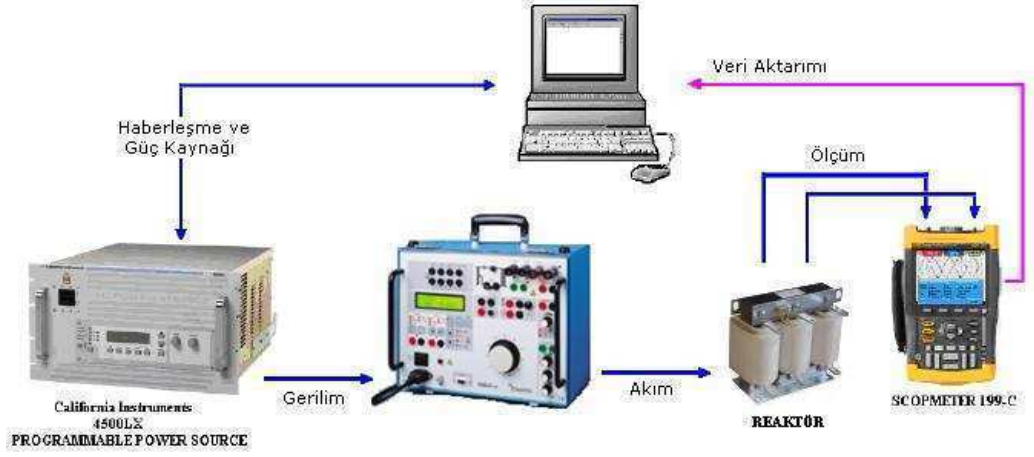
5.2 Test Sonuçları

Bilgisayar simülasyonlarında bulunan değerleri doğrulamak ve oluşturulan modelin gerçekliğini ispatlamak için oluşturulan prototip aşağıdaki test düzeneğinde denenmiştir.

Öncelikle reaktöre aşağıda verilen harmonik gerilimleri uygulanmıştır.

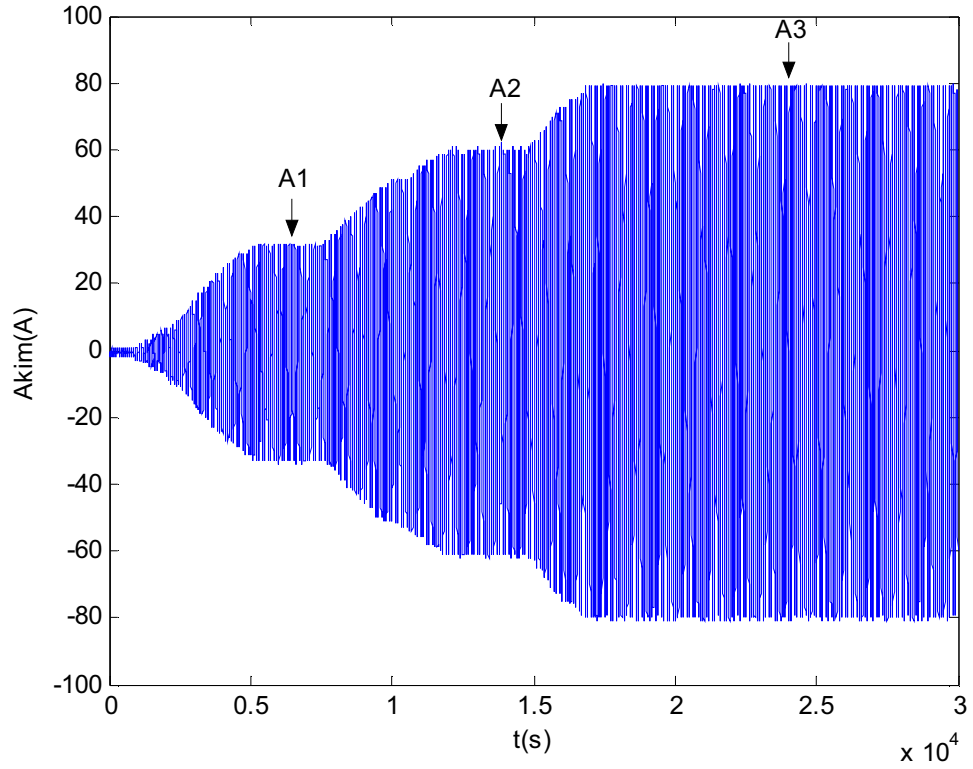
- 50 Hz, 65A (eff), 380/220 V (kırmızı)
- 50 Hz, 250 Hz % 10 V_g - 250 Hz ; % 90 V_g – 50 Hz (mavi)
- 50 Hz, 350 Hz % 10 V_g - 350 Hz ; % 90 V_g – 50 Hz (yeşil)

Bu gerilimleri uygulayabilmek için California Instruments'a ait LX4500 sinyal üreticinden faydalanılmıştır. Bu cihaz sayesinde harmonik gerilim değerleri oluşturulmuş ve oluşturulan harmonik gerilimler bir akım kaynağı sayesinde reaktöre tatbik edilebilmiştir. Reaktöre uygulanan akım ile reaktör üzerinde oluşturduğu gerilim düşümü veya endüklenen gerilim değerleri kayıt edilmiştir. Reaktörü test etmek için oluşturulan deney düzeneği aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

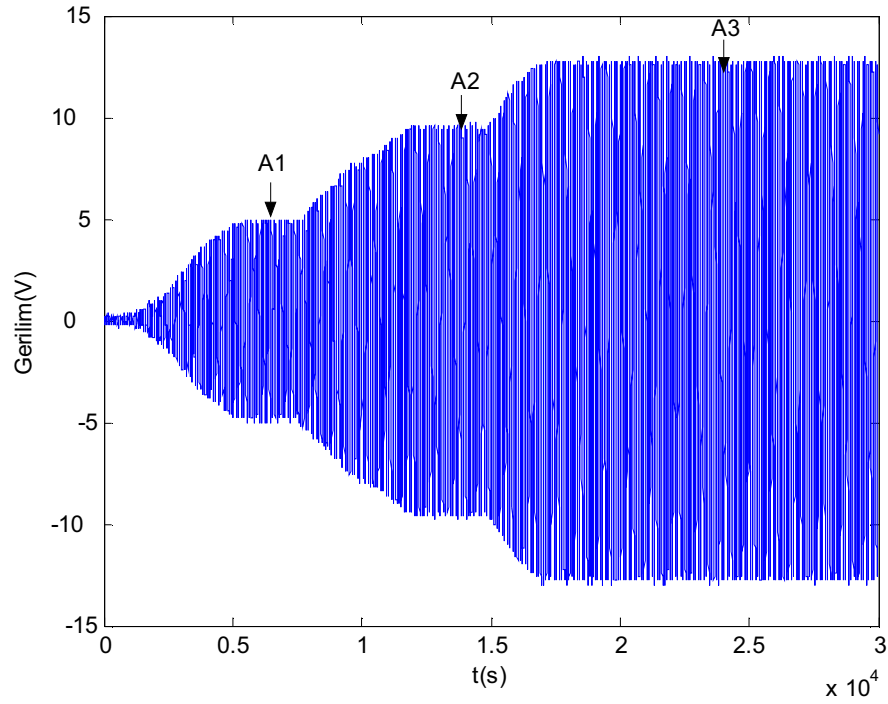


Şekil 5.7: Deney düzeneği

Ölçülen akım ve gerilim değerlerinden her durum için B-H eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan B-H eğrileri, kayıp ile ilgili değerlendirme yapmamızı sağlayacaktır. Bunun için ölçülen akım ve gerilim değerleri aşağıda gösterilmiştir.

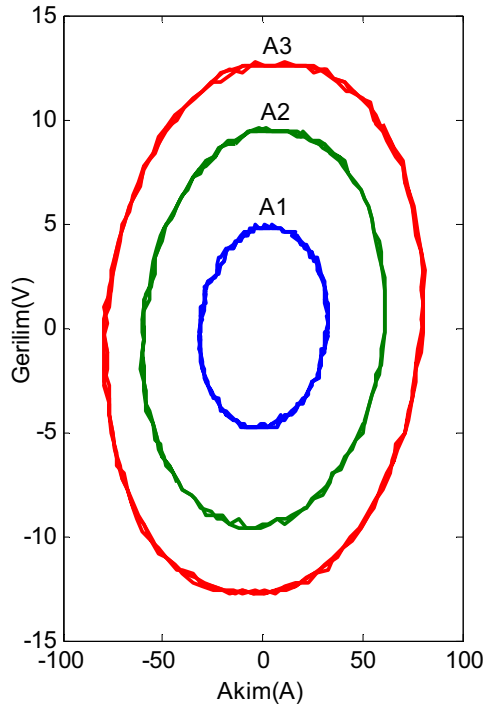


Şekil 5.8: Hat akımı (saf sinüs durumu)



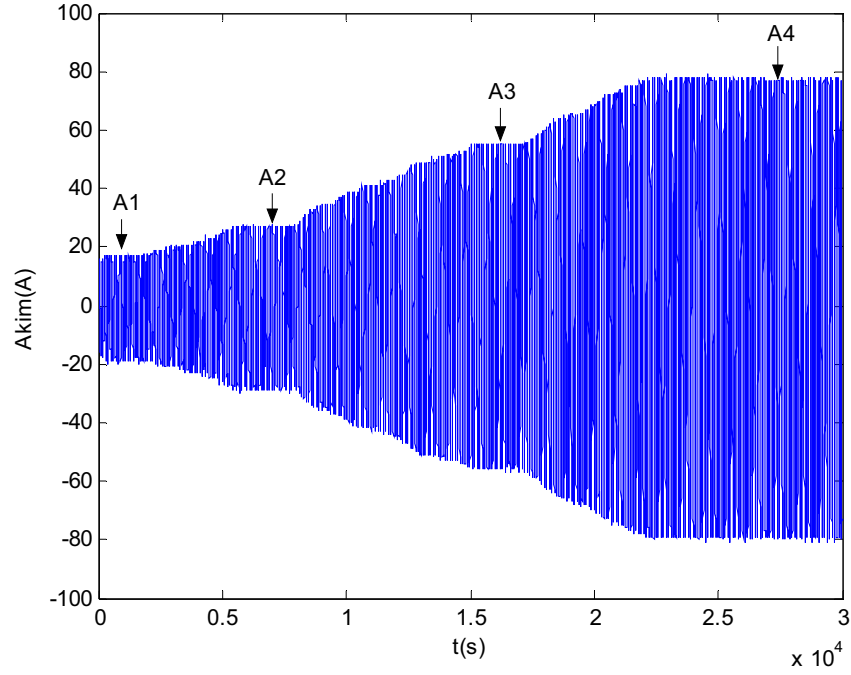
Şekil 5.9: Reaktör uçlarında oluşan gerilim (saf sinüs durumu)

Saf sinüs gerilim uygulanması durumunda reaktör üzerinde oluşan B-H eğrisinin şekli aşağıdaki gibi olacaktır. Burada reaktörün doyma bölgesinde çalıştırılmaması nedeni, deney düzeneği ile 65 amperin üzerinde bir akım değerine çıkılamamasından kaynaklanmaktadır. Ancak yine de diğer yüklenme durumları incelendiğinde bize fikir vermektedir.

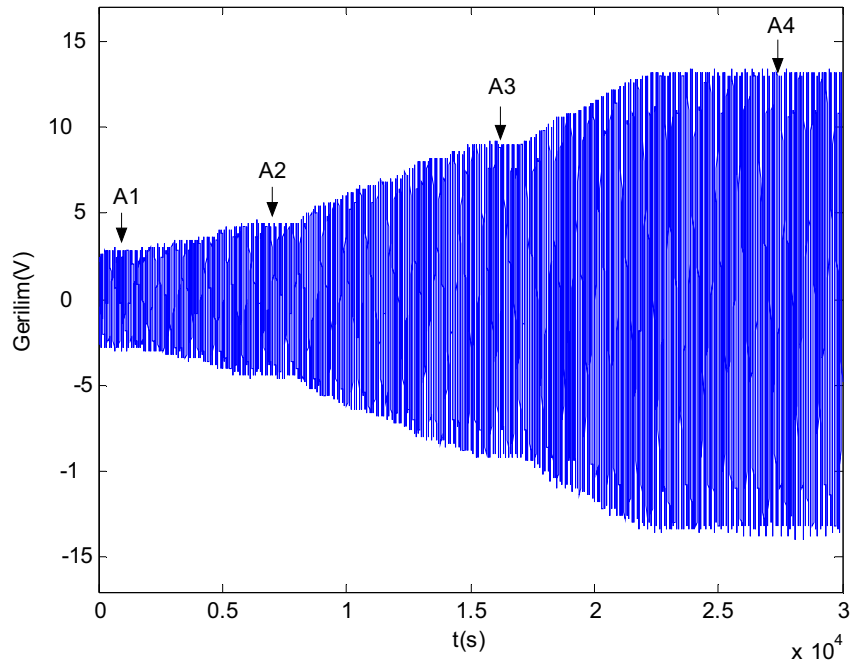


Şekil 5.10: 50 Hz B-H eğrisi

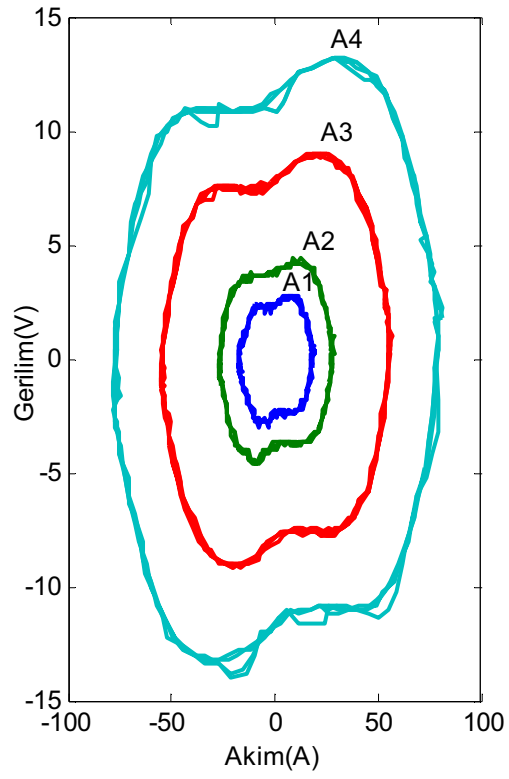
Saf sinüs ile beraber 250 Hz sisteme uygulandığında B-H eğrisi aşağıdaki şekli (Şekil 5.13) almaktadır. Bu durumda B-H eğrisinin zarfı normal durumdakinden daha büyük olmaktadır. Bu da bize reaktör dizaynlarından harmonik akımlarının nüve de ek ısınmalar yarattığını ispatlamaktadır.



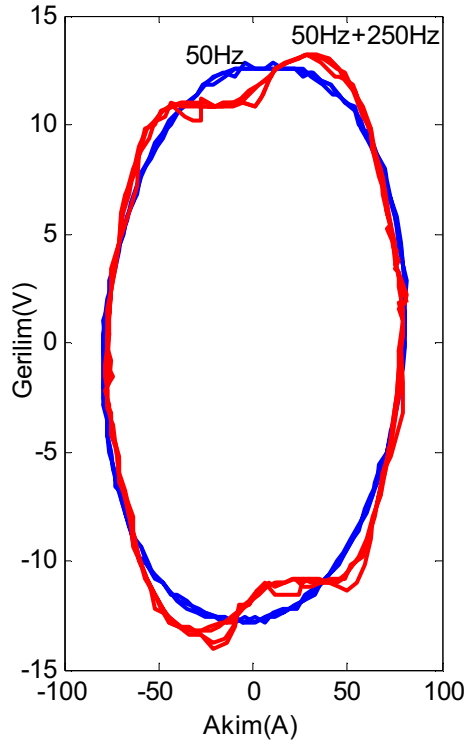
Şekil 5.11: Hat akımı (harmonikli durumu)



Şekil 5.12: Reaktör uçlarında oluşan gerilim (harmonikli durumu)



Şekil 5.13: 50 Hz + 250 Hz B-H eğrisi



Şekil 5.14: 50 Hz ve 50 Hz + 250 Hz B-H eğrisinin kıyaslaması

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, modeli oluşturulan $U_n = 400V$, $I_n = 72,17A$ ve $L_n = 0,77$ mH teknik değerlerine sahip reaktörün tasarım parametreleri oluşturulmuş, modeli Maxwell 3D simülasyon programında incelenerek magnetostatik analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre, tasarımda belirlenen nüve kesiti, sarım sayısı ve hava aralığına göre hesaplanan endüktans değeri $0,77$ mH olarak bulunarak tasarımın doğruluğu sağlanmaktadır.

Ayrıca deneysel yapılan test sonuçlarına göre uygulanan $72,17$ A değerine karşılık gelen endüktans değeri ile hesaplanan endüktans değeri arasında % 1'lik sapma meydana gelmiştir. Bu %1'lik sapma, bırakılan hava aralığı değerinin gerçek uygulamalarda tam verilen değerde yapılamamasından kaynaklanmaktadır.

Maxwell 3D simülasyon programından, nüve üzerinde istenen magnetik endüksiyon değerinin hesabımızda da kabul ettiğimiz 1 Tesla civarında olduğu görülmektedir.

Maxwell 3D simülasyon programının geçici rejim analiz kısmı kullanılarak modeli oluşturulan seri reaktörün analizi yapılmıştır. Reaktörün 3 farklı harmonik yükleme (50 Hz; 50 Hz - 250 Hz; 50 Hz - 350 Hz) durumundaki giriş gerilimi, endüklenen gerilim, hat akımı ve nüve kaybı simülasyon yardımı ile incelenmiştir. Saf sinüs gerilimi uygulandığında reaktörün nüve kaybı $8W$ civarında bulunmuş olup, hesaplanan $8,6W$ değerine çok yakın bir değerdir. Bunun yanı sıra harmonik yüklenme değerinin artması durumunda nüve kayıp değerinin de artacağı simülasyon yardımı ile ispatlanmaktadır.

Son olarak Maxwell 3D simülasyon programında bulunan değerleri doğrulamak ve oluşturulan modelin gerçekliğini ispatlamak için oluşturulan prototip, Kocaeli Üniversitesi test laboratuvarında cihaz kapasitesinden dolayı $65A$ 'de test edilmiştir. Yine simülasyonda olduğu gibi reaktörün 3 farklı harmonik yükleme (50 Hz; 50 Hz

- 250 Hz; 50 Hz - 350 Hz) durumundaki, reaktöre uygulanan akım ile reaktör üzerinde oluşturduğu gerilim düşümü veya endüklenen gerilim değerleri ölçülmüştür. Bu akım ve gerilim değerlerinden B-H eğrileri oluşturulmuştur. Ortaya çıkan B-H eğrilerinden, harmonik akımların nüvede ek ısınmalar yaratarak nüve kayıp değerlerini artırdığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Onur A., 2007, “Enerji Kalitesi”, Teknik Yayın, <http://www.alperonur.com>, (Ziyaret tarihi: 16 Kasım 2009).
- [2] A. Ersak “Notes on Power Electronics”, *ODTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi*, (1992).
- [3] T. J. E. Miller, Reactive Power Control in Electric Systems, *A wiley-Interscience Publication*, (1982).
- [4] D. E. Steeper, R. P. Stratford “Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems Using Thyristor Converters”, *IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.IA-12, No.3* May/June 1976, pp.232-254.
- [5] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, *IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society*, IEEE Std. 519-1992.
- [6] “Bozucu Etki Yaratan Müşterilerin Uymak Zorunda olduğu Kurallar” *TEK*, (1992).
- [7] Tacer E. “Elektromekanik Enerji Dönüşümü”, Ders Notları, *İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi*, (2004-2005).
- [8] Thaler G.J., Wilcox M.L., “Electric Machines: Dynamics and SteadyState”, *John Willey and Sons, Inc., New York, London, Sydney*, (1966).
- [9] Fitzgerald A.E., Kingsley JR C, Kusko A., “Electric Machinery, The Processes, Devices and Systems of Electromechanical Energy Conversion”, Third Edition, *McGraw-Hill Book Company, New York, Toronto*, (1971).
- [10] Del Toro V., “Electromechanical Devices for Energy Conversion and Control Systems”, *Prentice Hall Inc., New York, Toronto*, (1968).
- [11] Slemon G.R., “Magnetolectric Devices”, *John Wiley and Sons, Inc., New York, Toronto*, (1966).
- [12] Ong C-M., “Dynamic Simulation of Electric Machinery”, *Prentice Hall Inc., New York, Toronto*, (1997).
- [13] Akhunlar A., “Elektrik Alanlarına Giriş II Magnetik Alan”, *İTÜ Elektrik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi*, İstanbul, (1977).

- [14] Sarıoğlu M.K., “Elektrik makinelerinin Temelleri (Enerji Dönüşümü, Makine Modelleri)”, **Özarkadaş Matbaası**, İstanbul, İTÜ, (1970).
- [15] Colonel Wm. T. McLyman “Transformer and Inductor Design Handbook”, **Marcel DEKKER, INC.**, (1978).
- [16] Önal H., “Elektrik Mühendisliğinin Temelleri”, **İTÜ Elektrik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi**, İstanbul, (1977).
- [17] Onur A., Kasım E. “Motor Sürücü Giriş ve Çıkış Reaktörleri”, Teknik Yayın, <http://www.elektra.com.tr>, Elektra Elektronik Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti, (**Ziyaret tarihi: 16 Kasım 2009**).
- [18] J. Arillaga, D.A. Bradley, P. S. Bodge, “Power Systems Harmonics” **John Wiley & Sons**, (1988).
- [19] D. A. Gonzales, J. C. McCall, “ Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems “, **IEEE Trnsaction on Industry Applications, Vol.IA-23, No.3**, May/June 1987, pp.504-511.
- [20] “Harmonik Filtre Reaktörleri”, Teknik Yayın, <http://www.hilkar.com>, Hilkar Elektroteknik Ltd. Şti, (**Ziyaret tarihi: 16 Kasım 2009**).
- [21] Elham B. Markam, E. V. Subramaniam, Adly A. Girgis, Ray Catoe “Harmonic Filter Design Using Actual Recored Data”, **IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.29, No.6**, November/December 1976, pp.116-1182.
- [22] Eliş G., “Design of Reactive Power Compensator and Its Fitler Reactor”, Yüksek Lisans Tezi, **ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 16-24, (1997).
- [23] Sarıoğlu M. K. – Turan H. “Küçük Güçlü Seri Reaktörler” Eğitim Notları, **ENPAY A.Ş.**, (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Hakan TURAN, 1976'da Sivas'ta doğdu. İlk öğrenimini Kocaeli Derince ilçesinde Pirireis İlköğretim Okulu'nda, orta ve lise öğrenimini Kocaeli Derince Lisesi'nde tamamladı. 1993 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 1998 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. 1999 yılı Nisan ayında işe başlamış olduğu ENPAY A.Ş.'de üretim müdürü olarak görev yapmaktadırlar, evli ve bir çocuk babasıdır.