

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ ELEKTRONİĞİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNDE
ENDÜKTANS TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

AREN SEMERCİYAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. A. FARUK BAKAN**

İSTANBUL, 2011

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ ELEKTRONİĞİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNDE
ENDÜKTANS TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

AREN SEMERCİYAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. A. FARUK BAKAN**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ ELEKTRONİĞİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNDE
ENDÜKTANS TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

Aren SEMERCİYAN tarafından hazırlanan tez çalışması tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. A. Faruk BAKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

ÖNSÖZ

Güç elektroniğı dönüştürücülerinde verimliliğın arttırılmasına katkıda bulunmayı amaçladığım bu tez çalışmasında endüktans ve transformatör tasarımı konusundaki teorik bilgileri inceleyerek tasarım ve optimizasyon yöntemlerini açık ve anlaşılır bir şekilde ifade etmeye çalıştım.

Yüksek lisans tezimin konusunun belirlenmesinde, kaynakların bulunmasında, hazırlanmasında ve tamamlanmasında, kısacası tüm aşamalarda her türlü konuda bana hep destek olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. A. Faruk BAKAN'a teşekkürlerimi sunarım

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca hep yanımda olan, benim bu günlere başarıyla gelmemi sağlayan hem ilkokul öğretmenim hem de annem olan Seta Semerciyan'a ve sevgili babam Harityun Semerciyan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos, 2011

Aren SEMERCİYAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2.....	3
MANYETİZMA	3
2.1 Manyetik Alan	3
2.2 Manyetik Alan Yasaları.....	4
2.2.1 Biot-Sawart Yasası.....	4
2.2.2 Amper Yasası.....	5
2.2.3 Manyetik Akı ve Manyetizmada Gauss Yasası	6
2.2.4 Faraday Yasası.....	7
2.2.5 Lenz Yasası	8
2.2.6 Maxwell Denklemleri	9
2.3 Madde İçinde Manyetizma	10
2.3.1 Manyetik Dipol Momenti.....	10
2.3.2 Atomların Manyetik Dipol Momentleri	11
2.3.3 Mıknatıslanma vektörü	13
2.3.4 Bağlı Akımlar	13

2.3.5	Madde içinde Manyetik Alan ve Manyetik Alan Şiddeti (H)	16
2.3.6	Manyetik Maddelerin Sınıflandırılması	17
2.3.6.1	Paramanyetizma ve Diyamanyetizma	17
2.3.6.2	Manyetik Alınganlık ve Geçirgenlik	20
2.3.6.3	Ferromanyetizma	21
BÖLÜM 3		28
ENDÜKTANS VE MANYETİK DEVRELER		28
3.1	Endüktans	28
3.1.1	İçi Hava Dolu, N Sarımlı Bir Selenoidin Endüktansı	29
3.1.2	Ferromanyetik Bir Nüveye Sarılmış Bobinin Endüktansı	30
3.2	Manyetik Devreler	32
3.2.1	Hava Aralıklı Manyetik Devreler	33
3.2.2	Hava Aralığının Etkisi	34
3.3	Transformatör Modeli	36
3.3.1	İdeal Transformatör	36
3.3.2	Karşıt Endüktans, Mıknatıslama Endüktansı ve Mıknatıslama Akımı	37
3.3.3	Kaçak Endüktans	39
3.4	Manyetik Devrelerde Enerji	41
3.5	Manyetik Devrelerde Kayıplar	41
3.5.1	Nüve Kayıpları	42
3.5.1.1	Histerezis Kaybı	42
3.5.1.2	Girdap Akımı Kaybı	43
3.5.2	Bakır Kayıpları	44
3.5.2.1	Düşük Frekanslarda Bakır Kaybı	44
3.5.2.2	Yüksek Frekanslarda Bakır Kaybı, Deri Etkisi ve Yakınlık Etkisi	44
BÖLÜM 4		49
ENDÜKTANS TASARIMI VE OPTİMİZASYONU		49
4.1	Filtre Endüktans Tasarımı	49
4.1.1	Filtre Endüktans Tasarımı Kriterleri	49
4.1.1.1	Kriter I, Maksimum Manyetik Alan (B_{max})	50
4.1.1.2	Kriter II, Endüktans (L)	50
4.1.1.3	Kriter III, Sargı Alanı ($K_u W_A$)	50
4.1.1.4	Kriter IV, Sargı Direnci	51
4.1.2	Kriterlerin Değerlendirilmesi ve Nüve Geometrik Sabiti (K_g)	52
4.1.3	Tasarımda İzlenecek Yol	53
4.1.3.1	Nüve Boyutunun Belirlenmesi	54
4.1.3.2	Hava Aralığının Belirlenmesi	54
4.1.3.3	Sarım Sayısının Belirlenmesi	55
4.1.3.4	İletken Kesitinin Belirlenmesi	55
4.2	K_g Yöntemi Kullanılarak Çok Sargılı Manyetik Devre Tasarımı	55
4.2.1	Sargıların Nüvenin Pencere Alanına Dağılımı	56
4.2.1.1	Sargılardaki Bakır Kayıpları	57
4.2.1.2	Toplam Bakır Kaybının Hesaplanması ve Minimize Edilmesi	57

4.2.2	Çok Sargılı Manyetik Devre Tasarımı Kriterleri	60
4.2.2.1	Kriter I, Maksimum Manyetik Alan (B_{max})	60
4.2.2.2	Kriter II, Mıknatıslama Endüktansı (L_M).....	61
4.2.2.3	1Kriter III, Minimum Toplam Bakır Kaybı ($P_{Cu,tot,min}$)	61
4.2.3	Kriterlerin Değerlendirilmesi ve Nüve Geometrik Sabiti (K_g)	62
4.2.4	Tasarımda İzlenecek Yol.....	62
4.2.4.1	Nüve Boyutunun Belirlenmesi	63
4.2.4.2	Hava Aralığının Belirlenmesi	63
4.2.4.3	Sarım Sayılarının Belirlenmesi.....	64
4.2.4.4	Dağılım Sabitlerinin Belirlenmesi ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$).....	64
4.2.4.5	İletken Kesitlerinin Belirlenmesi	65
4.3	Transformatör Tasarımı	65
4.3.1	Transformatör Tasarımı Kriterleri	65
4.3.1.1	Kriter I, Nüve Kaybı (P_{fe})	66
4.3.1.2	Kriter II, Manyetik Alan Değişimi (ΔB)	66
4.3.1.3	Kriter III, Minimum Bakır Kaybı ($P_{cu,tot,min}$)	67
4.3.1.4	Kriter IV, Toplam Güç Kaybı (P_{tot}).....	68
4.3.1.5	Kriter V, Optimum Manyetik Alan Değişimi (ΔB_{opt})	68
4.3.2	Kriterlerin Değerlendirilmesi ve Nüve Geometrik Sabiti (K_{gfe})	69
4.3.3	Tasarımda İzlenecek Yol.....	71
4.3.3.1	Nüve Boyutunun Belirlenmesi	71
4.3.3.2	Optimum Manyetik Alan Değişiminin Hesaplanması ve Değerlendirilmesi.....	72
4.3.3.3	Sarım Sayılarının Belirlenmesi.....	72
4.3.3.4	Dağılım Sabitlerinin Belirlenmesi ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$).....	72
4.3.3.5	İletken Kesitlerinin Belirlenmesi	73
BÖLÜM 5		74
SAYISAL ÖRNEKLER		74
5.1	İki Çıkışlı İleri Yönlü Dönüştürücü İçin Kuplajlı Endüktans Tasarımı	74
5.1.1	Kuplajlı Endüktans Modeli ve Nominal Tam Yük Çalışma Koşulları	75
5.1.2	Nüve Seçimi	76
5.1.3	Diğer Bilinmeyenlerin Belirlenmesi	77
5.2	Kesintisiz Modda Çalışan Geri Dönüştürücü Dönüştürücü için Transformatör Tasarımı.....	78
5.2.1	Nominal Tam Yük Çalışma Koşulları.....	79
5.2.2	Nüve Seçimi	81
5.2.3	Diğer Bilinmeyenlerin Belirlenmesi	81
5.3	Tek Çıkışlı İzoleli Cuk Dönüştürücü için Transformatör Tasarımı.....	82
5.3.1	Nominal Tam Yük Çalışma Koşulları.....	83
5.3.2	Nüve Seçimi	84
5.3.3	Diğer Bilinmeyenlerin Belirlenmesi	84
5.4	Çok Çıkışlı Tam Köprü Düşürücü Dönüştürücü için Transformatör Tasarımı	86
5.4.1	Nominal Yükte Çalışma Koşulları	87
5.4.2	Nüve Seçimi	88

5.4.3 Diğer Bilinmeyenlerin Belirlenmesi	89
BÖLÜM 6.....	93
TASARIMLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	93
6.1 K_g Yönteminde Nüve Kayıplarının İhmal Edilmesi	93
6.2 Sayısal Örneklerin Tüm Nüve Tipleri için Çözümü ve Değerlendirilmesi	95
BÖLÜM 7.....	100
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	100
KAYNAKLAR.....	101
EK-A.....	102
FERİT NÜVE VERİLERİ	102
EK-B.....	104
AMERİKAN TEL KALINLIĞI VERİLERİ	104
EK-C.....	106
ALGORİTMALAR VE EXCEL ÇÖZÜMLERİ	106
C-1 K_g Yöntemi ile Tek Sargılı Endüktans Tasarımı Algoritması	106
C-2 K_g Yöntemi ile Çok Sargılı Endüktans Tasarımı Algoritması	107
C-3 K_{gfe} Yöntemi ile Transformatör Tasarımı Algoritması	108
C-4 Excel Çözümleri.....	109
C-5 Excel Makro Kodları	111
ÖZGEÇMİŞ.....	116

SİMGE LİSTESİ

A	Kesit alanı
$\vec{A}$	Yüzeye dik alan vektörü
A_w	Çıplak iletkenin kesiti
$\vec{B}$	Manyetik alan vektörü
ΔB	Manyetik alan değişimi
C	Curie sabiti
$\vec{E}$	Elektrik alan vektörü
e	Bir elektronun yükü
$\vec{F}$	Lorentz Kuvveti vektörü
$\mathcal{F}$	Manyetomotor kuvvet
f	Frekans
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti vektörü
h	Planck sabiti ($h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
$\hbar$	$h/2\pi$
I, i	Elektrik akımı
I_{tot}	Primere indirgenmiş sargı akımlarının toplamı
i_M	Mıknatıslama akımı
$\vec{J}$	Hacim akımı yoğunluğu vektörü
$\vec{K}_b$	Yüzey akımı yoğunluğu vektörü
K_E	Girdap akımı kaybı katsayısı
K_H	Histerezis kaybı katsayısı
K_{fe}	Nüve kaybı katsayısı
K_g	Nüve geometrik sabiti
K_u	Doluluk faktörü
k	Transformatörün kuplaj sabiti
L	Endüktans
$\vec{L}$	Açısal momentum vektörü
L_M	Mıknatıslama endüktansı
$\vec{l}$	Konum vektörü
l_b	İletkenin uzunluğu
l_g	Hava aralığı uzunluğu
l_m	Manyetik yol uzunluğu
$\vec{M}$	Mıknatıslanma vektörü
m	Yörüngesel manyetik moment

$\vec{m}$	Manyetik dipol momenti vektörü
m_e	Bir elektronun kütlesi
m_s	Spin manyetik moment
(MLT)	Sarım başına iletken uzunluğu
N	Sarım sayısı
$\hat{n}$	Yüzeye dik ve yüzeyden dışarı doğru çizilen birim vektör
n_e	Transformatörün etkin sargı oranı
P_{Cu}	Bakır kaybı
$P_{Cu,tot}$	Toplam bakır kaybı
$P_{Cu,tot,min}$	Minimum toplam bakır kaybı
P_E	Nüvedeki girdap akımları kaybı
P_{fe}	Nüve kaybı
P_H	Histerezis kaybı
P_{tot}	Toplam güç kaybı
Q, q	Elektrik yükü
R	Direnç
$\mathcal{R}$	Relüktans
r	Atomun yörünge çapı
$\hat{r}$	Konum birim vektörü
S	Spin açısal momentum
T	Periyot veya sıcaklık
T_C	Curie sıcaklığı
t	Süre
U	Bobinde depo edilen enerji
V, v	Gerilim
$\vec{v}$	Çizgisel hız vektörü
W_A	Nüvenin pencere alanı
α	Histerezis kaybı üssel katsayısı
α_j	j. dağılım sabiti
β	Nüve kaybı üssel katsayısı
δ	Deri kalınlığı
ε	İndüklenen elektromotor kuvvet
ε_T	İndüklenen toplam elektromotor kuvvet
ϵ_0	Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği ($\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/N \cdot \text{m}^2$)
θ	$\hat{r}$ ile $d\vec{l}$ arasındaki açı
λ_1	Primer sargıya uygulanan volt-saniye
μ, μ_m	Bir malzemenin manyetik geçirgenliği
μ_o	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği ($\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$)
μ_r	Bir malzemenin göreceli geçirgenliği
ξ	Lagrange çarpanı
ρ	Özdirenç
$\vec{r}$	Moment vektörü
Φ, Φ_B	Manyetik akı
Φ_E	Elektriksel akı
χ_m	Manyetik alınganlık
∇	Nabla operatörü

KISALTMA LİSTESİ

EMK	Elektromotor Kuvvet
MMK	Manyeto Motor Kuvvet
RMS	Root Mean Square (Efektif veya etkin değ�er)
SI	Syst�eme d'Internationale (Uluslararası Birim sistemi)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Mıknatıs [1]	3
Şekil 2.2	dl uzunluk elemanından geçen I akımının P noktasında oluşturduğu dB manyetik alanı [1]	4
Şekil 2.3	Sabit bir I akımını çevreleyen kapalı bir yol [1]	5
Şekil 2.4	B , dA ve θ 'nın bir yüzeydeki gösterilimi [1]	6
Şekil 2.5	Bir çubuk mıknatısın oluşturduğu kapalı manyetik alan çizgileri [1]	7
Şekil 2.6	Bir iletken halka içindeki mıknatısın hareketi ile oluşan akım [1]	7
Şekil 2.7	Faraday'ın deney düzeneği [1]	8
Şekil 2.8	A vektörünün yönünün sağ el kuralı ile belirlenmesi [1]	11
Şekil 2.9	Bir çekirdek etrafında, r yarıçaplı bir yörüngede dolanan elektron [1]	12
Şekil 2.10	Düzgün olarak mıknatıslanmış bir malzeme dilimi [2]	13
Şekil 2.11	Düzgün olarak mıknatıslanmış bir cisimdeki eşdeğer yüzey akımı [2]	14
Şekil 2.12	Düzgün olarak mıknatıslanmış tek bir akım halkası [2]	14
Şekil 2.13	z -doğrultusunda düzgün mıknatıslanmamış malzemenin iki küçük parçası [2]	15
Şekil 2.14	y -doğrultusunda düzgün mıknatıslanmamış malzemenin iki küçük parçası [2]	16
Şekil	2.15 Yörüngeye dik bir B manyetik alanı etkisinde tek elektronlu bir atom [2]	19
Şekil 2.16	a) Mıknatıslanmamış bir ferromanyetik malzemenin bölgeleri b) B_0 dış manyetik alan içindeki bir ferromanyetik malzemenin bölgeleri c) Daha güçlü bir dış manyetik alan içindeki bir ferromanyetik malzemenin bölgeleri [1]	22
Şekil 2.17	Görelî Geçirgenlik μ_r 'nin manyetik alan şiddeti H 'ye göre değişimi [4]	23
Şekil 2.18	Demir çekirdekli bir toroid [1]	24
Şekil 2.19	Ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanma veya histerezis eğrisi [1]	25
Şekil 2.20	Toplam manyetik alan B 'nin B_0 'a göre değişimi [2]	26
Şekil 2.21	Ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanmasının sıcaklıkla değişimi [1]	27
Şekil 3.1	İçi hava dolu, N sarımlı, kararlı bir akım taşıyan bir selenoidin manyetik alan çizgileri [1]	29
Şekil 3.2	İdeal bir selenoidin kesitsel görünümü [1]	30
Şekil 3.3	Bir nüveye sarılmış, N sarımlı bobin [6]	30
Şekil 3.4	Ferromanyetik bir nüvede $N\Phi$ 'nin i 'ye göre değişimi [4]	31
Şekil 3.5	Manyetik histerezis ihmal edilmiş lineer mıknatıslanma eğrisi [6]	31
Şekil 3.6	Tek gözlü manyetik bir devrenin eşdeğeri [6]	33

Şekil 3.7	Hava aralığı içeren manyetik devre [6]	35
Şekil 3.8	Hava aralığı içeren manyetik devrenin eşdeğeri [6]	35
Şekil 3.9	Hava aralığının mıknatıslanma eğrisine etkisi [6]	35
Şekil 3.10	Ferromanyetik nüveye sarılmış çift sargılı bir transformatör [6].....	36
Şekil 3.11	Transformatörün manyetik eşdeğer devresi [6].....	36
Şekil 3.12	Mıknatıslama endüktansı ve akımı primere indirgenmiş transformatör modeli [6]	39
Şekil 3.13	Transformatörde nüvenin dışında dolaşan kaçak akıların modeli [6]	40
Şekil 3.14	Kaçak endüktans ilaveli transformatör modeli [6]	40
Şekil 3.15	Nüvede oluşan girdap akımları [6]	44
Şekil 3.16	a) İletkenden geçen AC akımın iletken çevresinde olduğu manyetik alan kuvveti b) Oluşan manyetik alan kuvveti nedeniyle iletkenin içinde indüklenen girdap akımları c) Girdap akımları nedeniyle hacim akımı yoğunluğunun iletken içinde merkezden yüzeye doğru değişimi [7]	45
Şekil 3.17	Bakır iletkenin deri kalınlığının frekansa göre değişimi [6].....	46
Şekil 3.18	Her bir katmanı net $i(t)$ akımı taşıyan çok katmanlı folyo sargı [6].....	46
Şekil 3.19	Sekiz ince yalıtılmış bakır telden oluşmuş Litz teli [8]	48
Şekil 4.1	DC-DC düşürücü dönüştürücü [6]	49
Şekil 4.2	Nüvenin kesitsel görünümü [6].....	51
Şekil 4.3	k sargılı manyetik devre [6].....	56
Şekil 4.4	Sargıların pencere alanına dağılımı [6]	56
Şekil 4.5	α_1 'e göre sargıların bakır kayıplarının değişimi [6]	58
Şekil 4.6	k sargılı kuplajlı endüktans [6]	60
Şekil 4.7	k sargılı bir kuplajlı endüktansın manyetik eşdeğer devresi [6].....	60
Şekil 4.8	Bdc değeri üzerinde dalgalanan bir manyetik alan	66
Şekil 4.9	Simetrik bir AC manyetik alanın dalga şekli	66
Şekil 4.10	Birinci sargıya uygulanan gerilim [6]	67
Şekil 4.11	Nüve, bakır ve toplam kaybın $\Delta B'$ 'ye göre değişimi [6]	68
Şekil 5.1	İki çıkışlı ileri yönlü dönüştürücü [6]	74
Şekil 5.2	Kuplajlı endüktans modeli [6]	75
Şekil 5.3	Mıknatıslama akımı ve gerilimi dalga şekilleri [6].....	75
Şekil 5.4	Transformatör modeli içeren geri dönüşlü dönüştürücü devresi [6]	78
Şekil 5.5	Mıknatıslama akımı ve gerilimi ile sargı akımları dalga şekilleri [6].....	80
Şekil 5.6	Tek çıkışlı, izoleli cuk dönüştürücü devresi [6].....	82
Şekil 5.7	Primer sargıya uygulanan gerilim ile sargı akımlarının dalga şekilleri [6]....	83
Şekil 5.8	Çok çıkışlı, tam köprü düşürücü dönüştürücü devresi [6]	86
Şekil 5.9	Primer sargıya uygulanan gerilim ile sargı akımlarının dalga şekilleri [6]....	88
Şekil 6.1	Kesintisiz modda çalışan geri dönüşlü dönüştürücüde B-H karakteristiği [6]	93
Şekil 6.2	Giriş geriliminin ve manyetik alanın zaman göre değişimleri [6].....	94
Şekil 6.3	Çeşitli frekanslar için güç kaybı yoğunluğunun $\Delta B'$ 'ye göre değişimi [6]	95

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Bazı malzemelerin manyetik alınganlıkları [2]	21
Çizelge 2.2 Sentezlenen ferit malzemelerin Curie sıcaklıkları [5]	27
Çizelge 6.1 Birinci sayısal örneğin tasarım sonuçları (25 °C).....	96
Çizelge 6.2 Birinci sayısal örneğin tasarım sonuçları (100 °C)	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Çizelge 6.3 İkinci sayısal örneğin tasarım sonuçları (25 °C)	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Çizelge 6.4 İkinci sayısal örneğin tasarım sonuçları (100 °C)	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Çizelge 6.5 Üçüncü sayısal örneğin tasarım sonuçları (25 °C)	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Çizelge 6.6 Üçüncü sayısal örneğin tasarım sonuçları (100 °C)	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Çizelge 6.7 Dördüncü sayısal örneğin tasarım sonuçları (25 °C).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Çizelge 6.8 Dördüncü sayısal örneğin tasarım sonuçları (100 °C).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

GÜÇ ELEKTRONİĞİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNDE ENDÜKTANS TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Aren SEMERCİYAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. A. Faruk BAKAN

Güç elektroniği dönüştürücülerinde kullanılan endüktansların tasarım ve optimizasyonu, dönüştürücü verimi, güç yoğunluğu ve ekonomik kriterler açısından oldukça önemlidir. Biot-Sawart, Amper, Gauss, Tesla, Faraday, Lenz, Lorentz ve Maxwell gibi bilim adamları elektromanyetik alan teorisinin temelini oluşturmuşlardır. Ancak çağımızın gereksinimlerine cevap verebilecek tasarımlar için teorik altyapının anlaşılması ile birlikte verimliliğin ve ekonomik kriterlerin de dikkate alınması gerekir.

Bu tez çalışmasında manyetizma, endüktans, transformatör ve nüve konularındaki kaynaklar incelenmiş, teorik bilgiler derlenerek matematiksel ifadeler verilmiştir. Kayıpları azaltacak çözümler ve verimi artıracak yöntemler incelenmiştir. Optimizasyon çalışmalarına ışık tutacak yöntemler tartışılmıştır. Literatürde mevcut olan bilgiler sentezlenerek tasarım detayları verilmiştir. Teorik çalışmaların sonuçları dikkate alınarak, güç elektroniği dönüştürücülerinde kullanılan endüktans ve transformatörlerin tasarımları için bir temel oluşturulmaya çalışılmıştır. Özellikle bakır ve nüve kayıplarını önemli ölçüde etkileyecek, sarım sayısı, sargıların dağılımı, hava aralığı, nüve boyutu, nüve malzemesi, iletken kesiti ve iletken cinsi gibi parametrelerin nasıl belirleneceği modellenmiştir. Üç farklı tasarım örneği için algoritmalar verilerek, bilgisayar yardımıyla çözümler bulunmuş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Manyetizma, endüktans, transformatör, tasarım ve optimizasyon

**INDUCTOR DESIGN AND OPTIMIZATION IN POWER ELECTRONICS
CONVERTERS**

Aren SEMERCİYAN

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Asst. Prof. Dr. A. Faruk BAKAN

Design and optimization of the inductances used in power electronics converters are very important in terms of converter efficiency, power density and economical aspects. Biot-Sawart, Ampere, Gauss, Tesla, Faraday, Lenz, Lorentz and Maxwell have formed the basis of electromagnetic theory. In order to meet today's needs, it is required to consider productivity and economic criteria in addition to understand the theoretical knowledge.

In this thesis, the literature on magnetism, inductors, transformers, and the cores are studied and mathematical equations are derived. Solutions to reduce losses and methods to increase efficiency are examined. The methods which are shed light on the optimization studies are discussed. The information available in the literature is synthesized and design details are given. Taking into account the results of theoretical studies, a basis for design of inductors and transformers used in power electronic converters is created. The parameters which affect copper and core losses significantly like the number of turns, air gap, core size, core material, the conductor cross sectional area and conductor type are modeled. Algorithms are given for three different design examples, solutions are performed with computer, and results are evaluated.

Key words: Magnetism, inductor, transformer, design and optimization

1.1 Literatür Özeti

Biot-Sawart, Amper, Gauss, Tesla, Faraday, Lenz, Lorentz ve Maxwell gibi bilim adamları günümüz teknolojisinin temelini oluşturmuşlardır. Bu temel bilgiler çeşitli kaynaklardan detaylı bir şekilde incelenmiş olup tasarım için gerekli teorik alt yapı verilmiştir [1], [2], [3], [4], [5]. Verimli ve ekonomik tasarımlar için çalışma prensiplerinin anlaşılması ile birlikte optimizasyon yöntemlerinin de kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle güç elektroniği devrelerinin çalışma prensipleri irdelenmiş olup anahtarlama dönüştürücülerde kullanılan endüktans ve transformatörlerdeki kayıpları minimize etmek amacıyla, literatürdeki çalışmalar incelenerek optimum tasarım yöntemleri oluşturulmuştur [6], [7], [8], [9], [10].

1.2 Tezin Amacı

Yarı iletken güç elemanlarındaki ve kontrol yöntemlerindeki gelişmelere paralel olarak güç dönüştürücülerinin anahtarlama frekansı giderek artmaktadır. Bu dönüştürücülerde kullanılan bobin ve transformatörlerin tasarımında nüve ve girdap akımı kayıplarının özellikle yüksek frekanslarda dikkate alınması gerekir. Bu nedenle tasarımlar, çalışma frekansı ve sargı geometrisi dikkate alınarak kayıpları azaltacak şekilde yapılmalıdır. Bu çalışmada, güç elektroniği dönüştürücülerinde kullanılan endüktans ve transformatörlerin toplam kayıplarının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Tek sargılı bir endüktanstan çok sargılı endüktans ve transformatörlere kadar, kayıpları azaltmak için kullanılan yöntemler incelenmiş olup tasarım kriterleri geliştirilmiştir.

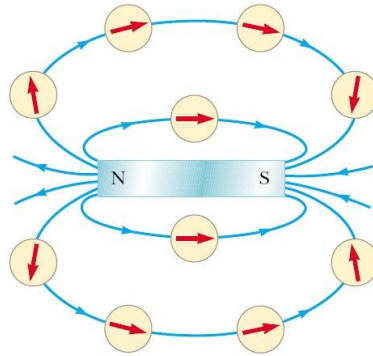
1.3 Hipotez

Güç elektroniğı dönüştürücülerinde endüktans ve transformatör tasarımı için kullanılan yöntemler verilmiştir. Bakır ve nüve kayıplarını azaltmak için kullanılan çözümler açıklanmıştır. K_g yöntemi kullanılarak tek ve çok sargılı endüktans tasarımı ve K_{gfe} yöntemi kullanılarak transformatör tasarımı için algoritmalar gösterilmiştir. Bu algoritmalar endüktans ve transformatör için nüve boyutu, hava aralığı, manyetik alan değişimi, sarım sayısı, sargı dağılımı ve iletken kesiti parametrelerinin optimum değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır.

2.1 Manyetik Alan

Manyetik alan denince akla ilk olarak bir mıknatıs gelir. Manyetizma “Doğal Manyetizma” ve “Yapay manyetizma” olarak ikiye ayrılır. Doğal manyetizmaya örnek olarak mıknatıs, yapay manyetizmaya örnek olarak ise elektromıknatıs ve elektrik akımı ile oluşan manyetik alanlar örnek verilebilir.

Bir mıknatısın N (kuzey) ve S (güney) olmak üzere iki kutbu vardır. Manyetik alan çizgilerinin Şekil 2.1’de gösterildiği gibi yönü N kutbundan S kutbuna doğrudur.



Şekil 2.1 Mıknatıs [1]

Manyetik alan vektörel bir büyüklük olup $\vec{B}$ ile gösterilir. Birimi SI (System International) birim sisteminde Tesla veya Weber/m²’dir.

Manyetik kutuplar elektrik yüklerinde olduğu gibi birbirlerine bir kuvvet etki ettirir. Aynı kutuplar birbirlerini iterken zıt kutuplar birbirlerini çeker. Elektrik yüklerinden farkı

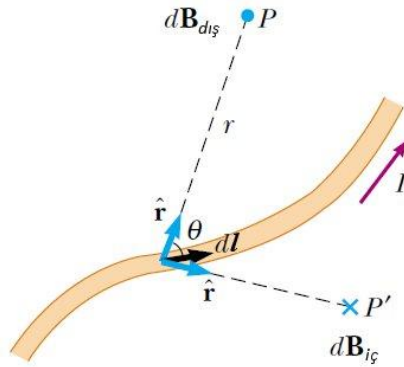
tek kutup olarak bulunmamalarıdır. Bir mıknatıs ne kadar ufalanırsa ufalansın yine mutlaka N ve S kutuplarından oluşur. Yani manyetizmada tek kutup yoktur.

Bir manyetik alanın yönü aynı zamanda o alan içine konulmuş bir pusulanın gösterdiği yöndür. Çünkü pusula da bir çubuk mıknatıs olup N ve S kutuplarından oluşmaktadır. Pusulanın N kutbu konulduğu alan içerisindeki S kutbu tarafından çekileceğinden pusulanın gösterdiği yön $\vec{B}$ manyetik alanının yönüdür.

2.2 Manyetik Alan Yasaları

2.2.1 Biot-Sawart Yasası

Sabit bir I akımı taşıyan Şekil 2.2'deki gibi bir iletkenin çok küçük bir $d\vec{l}$ parçası düşünüldüğünde bu parçanın P noktasında oluşturduğu manyetik alan $d\vec{B}$ olur. Bu $d\vec{B}$ manyetik alanı (sayfa düzleminden dışa doğru) aşağıdaki deneysel gözlemlere dayanır.



Şekil 2.2 $d\vec{l}$ uzunluk elemanından geçen I akımının P noktasında oluşturduğu $d\vec{B}$ manyetik alanı [1]

- $d\vec{B}$ vektörü, hem $d\vec{l}$ (akım yönünde) vektörüne hem de $\hat{r}$ birim vektörüne diktir.
- $d\vec{B}$ vektörünün büyüklüğü r^2 ile ters, $d\vec{l}$ vektörü, I akımı ve $\sin\theta$ ile doğru orantılıdır (r , $d\vec{l}$ ile P noktası arasındaki uzunluk, θ , $\hat{r}$ ile $d\vec{l}$ arasındaki açıdır).

Bu gözlemlerden elde edilen bağıntı aşağıdaki gibidir.

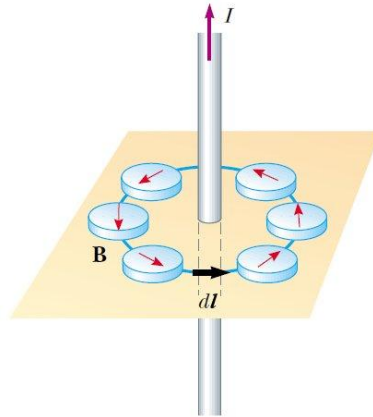
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.1)$$

Burada μ_o serbest uzayın manyetik geçirgenliği olup $\mu_o = 4\pi 10^{-7}$ (Tm/A) olarak tanımlanır. Tüm iletkenin P noktasında oluşturduğu manyetik alanı hesaplamak için bu ifadenin her iki tarafının integralini almak gerekir.

$$\vec{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.2)$$

2.2.2 Amper Yasası

Şekil 2.3'te sabit bir I akımını çevreleyen kapalı bir yol gösterilmiştir. Telden sabit bir I akımı geçirildiğinde, teli çevreleyen bir kapalı yol boyunca dizilmiş pusulaların iğneleri şekilde gösterildiği gibi akımın oluşturduğu manyetik alanın yönünde sapar. Bu kapalı yol boyunca $\vec{B}$ ve $d\vec{l}$ vektörleri birbirine paralel ve aynı yönlüdür. Bu nedenle $\vec{B} \cdot d\vec{l} = Bdl$ olur ($\cos 0^\circ = 1$).



Şekil 2.3 Sabit bir I akımını çevreleyen kapalı bir yol [1]

Bu çember üzerindeki noktalarda B'nin büyüklüğü sabit olup Biot-Sawart yasasına göre $\frac{\mu_o I}{2\pi r}$ dir. Bu yol boyunca Bdl çarpımlarının toplamı $\vec{B} \cdot d\vec{l}$ 'nin çizgisel integraline eşittir.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \oint dl = \frac{\mu_o I}{2\pi r} (2\pi r) \Rightarrow \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_o I \quad (2.3)$$

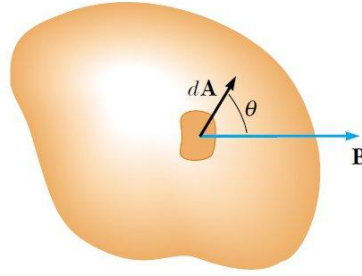
Burada r çemberin yarıçapı olup $\oint dl = 2\pi r$ çemberin çevresidir.

Amper Yasası'na göre sabit bir I akımını çevreleyen keyfi biçimli bir kapalı yol çevresinde $\vec{B} \cdot d\vec{l}$ 'nin çizgisel integrali $\mu_0 I$ 'ya eşittir. I akımı kapalı yolun sınırı içinde kalan yüzeyden geçen toplam akıdır. Seçilen keyfi biçimli kapalı yol Amper halkası olarak da bilinir.

2.2.3 Manyetik Akı ve Manyetizmada Gauss Yasası

Şekil 2.4'deki gibi keyfi biçimli bir yüzey üzerinde sonsuz küçük alanlı bir dA yüzey elemanı tanımlanırsa, bu dA yüzey elemanından geçen manyetik akı $\vec{B} \cdot d\vec{A} = B dA \cos \theta$ ile bulunur. Burada $d\vec{A}$ yüzeye dik vektördür. Tüm yüzeyden geçen, Φ , toplam manyetik akı (2.4) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.4)$$

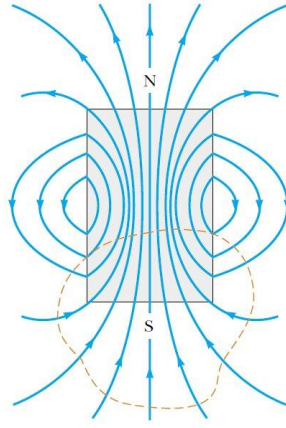


Şekil 2.4 $\vec{B}$, dA ve θ 'nın bir yüzeydeki gösterilimi [1]

Manyetik alan çizgileri sürekli olup kapalı ilmekler oluşturur. Keyfi seçilmiş ve sınırları Şekil 2.5'deki kesikli kırmızı çizgi ile belirtilen kapalı yüzeye giren alan çizgilerinin sayısı, bu yüzeyden çıkan alan çizgilerinin sayısına eşittir. Bu yüzden kapalı yüzeyden geçen net manyetik akı sıfırdır. Manyetizmadaki Gauss yasası herhangi bir kapalı yüzeyden geçen net manyetik akının her zaman sıfır olduğunu belirtir.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.5) manyetizmada bir mıknatısta, tek kutupların bulunmadığını göstermektedir.

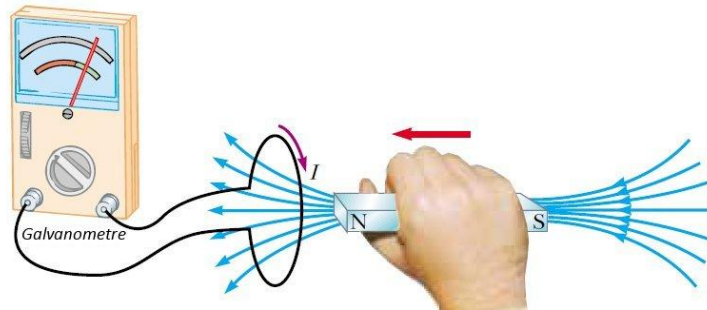


Şekil 2.5 Bir çubuk mıknatısın oluşturduğu kapalı manyetik alan çizgileri [1]

2.2.4 Faraday Yasası

Michael Faraday ve Joseph Henry tarafından birbirlerinden bağımsız olarak yürütülen deneyler sonucunda, manyetik alan yönü veya yeri değiştirilerek bir devrede elektromotor kuvvet (emk) indüklenebileceği gösterilmiştir.

Şekil 2.6'daki gibi bir düzenek kurulduğunda, mıknatısın konumu sabit kaldığında galvanometrede bir değişim olmadığı, mıknatıs hareket ettirildikçe galvanometrenin saptığı gözlenir.

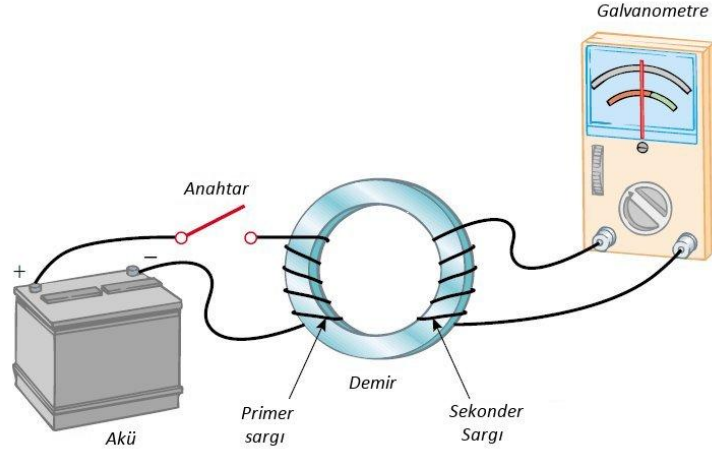


Şekil 2.6 Bir iletken halka içindeki mıknatısın hareketi ile oluşan akım [1]

Şekil 2.7'de Faraday'ın bir deney düzeneği gösterilmiştir. Bir demir halka etrafına sarılan primer sargıya bir batarya ve bir bobin bağlanmıştır. Sekonder sargıya ise sadece bir galvanometre bağlanmıştır. Anahtar açık konumdan kapalı konuma getirildiğinde galvanometrenin bir yöne saptığı ve sonra sıfıra geri geldiği, kapalı konumdan açık konuma getirildiğinde ise galvanometrenin diğer yöne saptığı ve tekrar sıfır konumuna geri döndüğü gözlenir. Primer sargıdan bir akım geçmediğinde manyetik alan oluşmaz ve sekonder sargıdan bir akım geçmez. Ancak anahtar açık konumdan kapalı konuma geldiği anda primer sargıdan bir akım geçerek demir halkada

bir manyetik alan meydana gelir. Bu alan sıfırdan belli bir değere belli bir zamanda ulaşır. Bu değişim sekonder sargıda bir gerilim indüklenmesine ve akım geçmesine neden olur. Faraday yasasına göre indüklenen emk manyetik akının zamana göre türeviyle doğru orantılıdır.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.6)$$



Şekil 2.7 Faraday'ın deney düzeneği [1]

Devre aynı alana sahip N tane sarımdan oluşuyorsa, devreden geçen Φ akısı her sarımda bir emk oluşturur. Bu sarımlar birbirine seri bağlı olduğu için toplam emk N tane sarımda oluşan emk'ların toplamına eşittir.

$$\varepsilon_T = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.7)$$

2.2.5 Lenz Yasası

Lenz yasası, Faraday yasasının belirttiği (2.6) ve (2.7) eşitliklerindeki negatif işaretin nedenini açıklar. Değişken bir manyetik akının etkisiyle bir ilmekte indüklenen akım, kendisini oluşturan manyetik akının değişimine karşı koyacak şekilde bir manyetik akı oluşturur. Dolayısıyla indüklenen akımın yönü, bu değişime karşı koyan manyetik akıyı oluşturacak yöndedir. Yani indüksiyon akımı, kendisini oluşturan manyetik akının değişimini engelleme eğilimindedir. Bu yasa, enerjinin korunumu yasasının bir sonucudur [1].

2.2.6 Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri olarak bilinen denklem takımı, Lorentz kuvvet yasasıyla birlikte tüm elektromanyetik olayları açıklamaya yeterlidir. Aslında bu denklemler, Lorentz kuvvet yasası dışında, Gauss, Faraday ve Amper yasalarını açıklamaktadır. Bu yasaları matematiksel denklemlere dönüştüren kişi Maxwell'dir. Herhangi bir dielektrik ve manyetik malzemenin olmadığı serbest uzayda Maxwell denklemleri (2.8)-(2.11)'de verilmiştir.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \text{ (Gauss Yasası)} \quad (2.8)$$

Burada ϵ_0 serbest uzayın elektriksel geçirgenliği olup $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ ($C^2/N \cdot m^2$) olarak tanımlanır.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \text{ (Manyetizmada Gauss Yasası)} \quad (2.9)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \text{ (Faraday Yasası)} \quad (2.10)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \text{ (Amper-Maxwell Yasası)} \quad (2.11)$$

(2.8)'deki Q seçilen Gauss yüzeyi içinde kalan toplam elektrik yükünü, (2.10)'daki Φ_B manyetik akıyı, (2.11)'deki Φ_E ise elektrik akısını göstermektedir. Ayrıca (2.11) Amper yasasının Maxwell tarafından düzeltilmiş hali olup Amper-Maxwell yasası olarak da bilinir.

Lorentz kuvvet yasası ise uzayda belli bir elektrik ve manyetik alan etkisi altında bulunan bir yüke etkiyen toplam kuvveti açıklar. (2.12)'de toplama işaretinin solundaki terim elektriksel kuvveti, sağındaki terim ise manyetik kuvveti göstermektedir. Bir yüke manyetik kuvvetin etkiyebilmesi için o yükün manyetik alan içinde hareketli olması gereklidir.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \text{ (Lorentz kuvvet yasası)} \quad (2.12)$$

Maxwell denklemleri diferansiyel olarak elektrik ve manyetik alanların diverjansı ve rotasyoneli şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_o} \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.14)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_o \vec{J} + \mu_o \epsilon_o \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.16)$$

(2.13)'deki ρ yük yoğunluğunu (C/m^3), (2.16)'daki $\vec{J}$ ise akışa dik, birim yüzey başına düşen hacim akımını (hacim akımı yoğunluğu, A/m^2) göstermektedir. Maxwell, Amper yasasının eksikliğini (2.11)'de görülen $\mu_o \epsilon_o \frac{d\Phi_E}{dt}$ terimini ekleyerek gidermiş ve $\epsilon_o \frac{d\Phi_E}{dt}$ 'yi yer değiştirme (displacement) akımı olarak tanımlamıştır.

2.3 Madde İçinde Manyetizma

Madde içinde manyetizmanın anlaşılabilmesi için manyetik dipol momenti, mıknatıslanma vektörü, bağlı akımlar, manyetik alan şiddeti, paramanyetizma, diyamanyetizma ve ferromanyetizma kavramlarının bilinmesi gereklidir.

2.3.1 Manyetik Dipol Momenti

Düzgün bir manyetik alan içine bir akım ilmeği yerleştirildiğinde, bu akım ilmeğine bir moment etki eder.

$$\vec{\tau} = I \vec{A} \times \vec{B} \quad (2.17)$$

Burada $\vec{A}$ ilmek düzlemine dik bir alan vektörü olup büyüklüğü ilmeğin alanına eşittir. Vektörün yönü Şekil 2.8'de gösterildiği gibi sağ el kuralıyla belirlenir. Sağ elin dört parmağı ilmekten geçen akım yönünde kıvrıldığı zaman başparmağın gösterdiği yön $\vec{A}$ vektörünün yönünü gösterir. (2.17)'deki $I \vec{A}$ terimi ilmeğin manyetik dipol momenti olarak tanımlanır.

$$\vec{m} = I \vec{A} \quad (2.18)$$



Şekil 2.8 $\vec{A}$ vektörünün yönünün sağ el kuralı ile belirlenmesi[1]

Manyetik dipol momentinin yönü, $\vec{A}$ vektörünün yönündedir. Birimi SI'da (Am^2)'dir. (2.18) eşitliği (2.17)'de yerine yazıldığında düzgün bir manyetik alan içindeki bir akım ilmeğine etkiyen moment aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (2.19)$$

2.3.2 Atomların Manyetik Dipol Momentleri

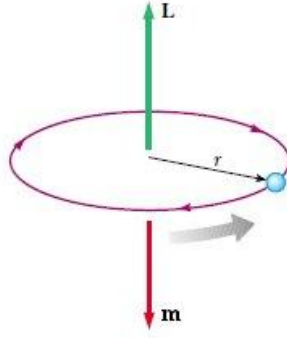
Elektronların ağır bir çekirdeğin etrafında, çembersel yörüngelerde dolandığını varsayan klasik atom modeli göz önüne alındığında, yörüngede dolanan bir elektronun küçük bir akım ilmeği oluşturduğu düşünülür [1]. Bu akım ilmeğinden dolayı elektronun bir manyetik momenti mevcuttur.

Şekil 2.9'daki gibi çekirdek etrafında, r yarıçaplı bir yörüngede, sabit v hızıyla, gri okla belirtilen yönde dolanan bir elektronu düşünelim. Elektron $2\pi r$ 'lik mesafeyi T sürede alıyorsa, yörüngedeki çizgisel hızı $v = 2\pi r/T$ olur. Dolanan bu elektronu temsil eden I akımı, elektron negatif bir yük olduğu için, elektronun dolanma yönüne ters olup büyüklüğü elektron yükünün, bir dolanım için geçen süreye bölümüne eşittir.

$$I = \frac{e}{T} = e \frac{v}{2\pi r} \quad (2.20)$$

Bu akım ilmeğinin oluşturduğu manyetik moment (2.18)'e göre hesaplanır. Burada akım ilmeğinin alanı πr^2 'dir. Buna göre yörüngesel manyetik momentin büyüklüğü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$m = \left(\frac{ev}{2\pi r} \right) \pi r^2 = \frac{1}{2} evr \quad (2.21)$$



Şekil 2.9 Bir çekirdek etrafında, r yarıçaplı bir yörüngede dolanan elektron [1]

Elektronun yörüngesel açısal momentumunun büyüklüğü $L = m_e v r$ olduğundan yörüngesel manyetik moment L 'ye bağlı olarak yazılabilir.

$$m = \left(\frac{e}{2m_e} \right) L \quad (2.22)$$

Şekil 2.9'da görüldüğü gibi $\vec{m}$ ve $\vec{L}$ vektörlerinin yönü birbirlerinin tersidir. Bunun nedeni elektronun negatif yüklü oluşudur. (2.22)'ye göre elektronun yörüngesel manyetik momenti, yörüngesel açısal momentumuyla orantılıdır.

Ele alınan bu klasik atom modeli tam anlamıyla gerçeği yansıtmamasına rağmen, kuantum mekaniğinin önerdiği teori ile uyumludur. Kuantum mekaniğine göre yörüngesel açısal momentum kesikli olup her zaman $\hbar$ 'ın tam katıdır. $\hbar = h/2\pi$, $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ Planck sabitidir. Elektronun yörüngesel hareketinden kaynaklanan manyetik momentinin sıfır olmayan en küçük değeri $m = \sqrt{2} \left(\frac{e}{2m_e} \right) \hbar$ 'dır.

Maddelerin çoğunda atomdaki bir elektronun yörüngesel manyetik momenti, yine aynı atomun ters yönde dolanan diğer bir elektronun yörüngesel manyetik momenti tarafından dengelenir. Genellikle elektron yörüngeleri geliş güzel yönlenir ve yörüngesel manyetik momentler birbirini yok eder. Birçok maddenin elektronlarının yörüngesel hareketlerinden dolayı oluşan manyetik etkilerin toplamı sıfır veya ihmal edilecek kadar küçüktür [1].

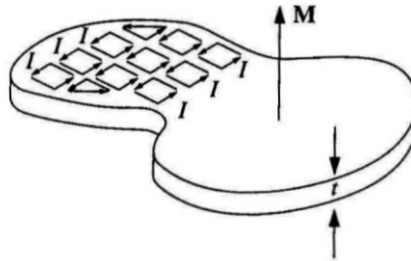
Atom içinde bir elektronun yörüngesel hareketinden başka spin denen bir hareketi daha vardır. Elektronlar çekirdeğin etrafında yörüngesel hareketlerini yaparlarken aynı zamanda kendi eksenleri etrafında da dönerler. Elektronun spin hareketinden dolayı oluşan açısal momentum S ile gösterilir. Kuantum mekaniğinin öngördüğü spin açısal

momentumun büyüklüğü $S = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$ 'dir. Buna bağlı bir elektron spininin oluşturduğu manyetik moment ise $m_s = \frac{e\hbar}{2m_e}$ 'dir.

Çift sayıda elektronu olan atomlarda elektronlar, spinler zıt yönlenecek şekilde çiftler oluştururlar. Bu nedenle spin manyetik momentleri birbirlerini yok eder. Tek sayıda elektronu olan atomların en azından bir tane çiftlenmemiş elektronu ve buna bağlı olarak bir spin manyetik momentini bulunur. Bir atomun toplam manyetik momentini yörüngesel ve spin manyetik momentlerinin vektörel toplamına eşittir.

2.3.3 Mıknatıslanma vektörü

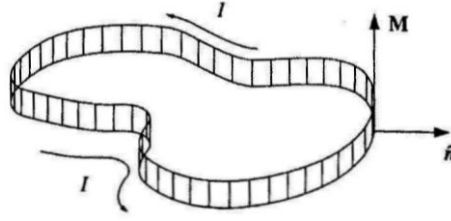
Maddeler bir B manyetik alanı içinde iken, manyetik momentleri (2.19)'da verilen manyetik moment etkisiyle uygulanan alan yönünde yönelmeye çalışır (diyamanyetik malzemeler hariç). Bu duruma mıknatıslanma denir ve $\vec{M}$ mıknatıslanma vektörüyle gösterilir. Bu vektörün büyüklüğü M , maddenin birim hacimdeki net manyetik momentine eşittir.



Şekil 2.10 Düzgün olarak mıknatıslanmış bir malzeme dilimi [2]

2.3.4 Bağlı Akımlar

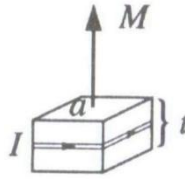
Bir manyetik alan içerisinde, Şekil 2.10'daki gibi düzgün olarak mıknatıslanmış ince bir malzeme dilimindeki manyetik dipollar küçük akım halkalarıyla temsil edilmiştir. Her akım halkasının her yönden hemen yanında komşu akım halkaları vardır. Bu komşu akımlar birbirlerine ters yönde olduklarından birbirlerini yok ederler. Bu nedenle iç taraftaki akımlar göz önünde bulundurulduğunda bu akımların birbirlerini dengeleyerek yok ettiği görülür. Ancak malzeme diliminin kenarlarında bu yok etme işlemini gerçekleştirecek başka komşu akımlar yoktur.



Şekil 2.11 Düzgün olarak mıknatıslanmış bir cisimdeki eşdeğer yüzey akımı [2]

Bu nedenle dengelenmemiş kenar akımları, Şekil 2.11'deki gibi dilimin etrafını saran bir eşdeğer I şerit akımıyla gösterilebilir. Bu I akımının, $\vec{M}$ mıknatıslanma vektörü cinsinden nasıl yazılabileceğini görebilmek için ilk önce Şekil 2.12'de gösterilen tek bir akım halkasını ele alalım. Bu akım halkası parçasının alanı a , kalınlığı da t olsun. Bu parçacığın manyetik dipol momentinin değeri, M mıknatıslanması cinsinden tanım gereği $m = Mat$ şeklinde yazılır. Ancak aynı manyetik dipol momentinin değeri, I akımı cinsinden (2.18)'e göre $m = Ia$ şeklinde de yazılabilir. Bu nedenle I akımı, M cinsinden şu şekilde yazılabilir.

$$I = Mt \quad (2.23)$$

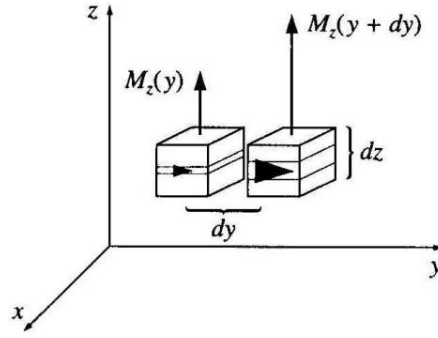


Şekil 2.12 Düzgün olarak mıknatıslanmış tek bir akım halkası [2]

O halde yüzey akımı yoğunluğunun değeri, $K_b = I/t = M$ elde edilir (K , akıma dik birim genişlik başına düşen yüzey akımı yoğunluğudur). Yüzeye dik ve yüzeyden dışarı doğru çizilen $\hat{n}$ birim vektörü kullanılarak $\vec{K}_b$ 'nin yönü aşağıdaki vektörel çarpımla belirlenir.

$$\vec{K}_b = \vec{M} \times \hat{n} \quad (2.24)$$

Düzgün olarak mıknatıslanmış bir cismin yüzeyi boyunca akan bu mikroskobik akım, her bir yükün yalnızca bir tek atom içinde, çok küçük bir ilmek etrafında hareket etmesiyle oluşan akımdır. Her bir yükün belirli bir atoma bağlı olması nedeniyle, mıknatıslanmadan kaynaklanan bu tür akımlara bağlı akımlar denir.



Şekil 2.13 z-doğrultusunda düzgün mıknatıslanmamış malzemenin iki küçük parçası [2]

Mıknatıslanmanın düzgün olmadığı durumda iç akımlar birbirlerini yok etmez. Şekil 2.13’de düzgün olarak mıknatıslanmamış bir malzemenin, sonsuz küçük hacimli iki parçası görülmektedir. Sağdaki parçanın üzerindeki daha büyük olan ok, o noktada mıknatıslanmanın daha büyük olduğunu göstermektedir. z eksenini doğrultusunda düzgün olmayan mıknatıslanmanın etkisiyle, bu iki parçanın birbirine bakan yüzeyinden geçen, +x yönündeki net akımın değeri (2.23)’e göre aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I_{x+} = M_z(y + dy)dz - M_z(y)dz = \frac{\partial M_z}{\partial y} dydz \quad (2.25)$$

Benzer şekilde Şekil 2.14’de görülen, y eksenini doğrultusunda düzgün olarak mıknatıslanmamış iki parçanın, birbirine bakan yüzeyinden geçen, ancak -x yönünde olan, net bir akım daha vardır. Bu akımın değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

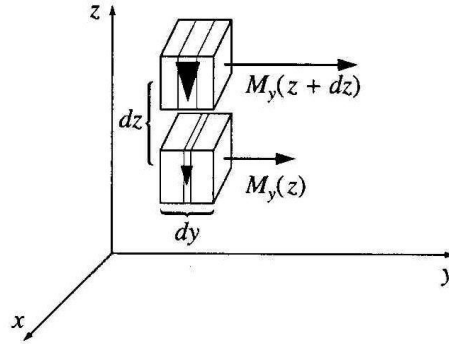
$$I_{x-} = -[M_y(z + dz)dy - M_y(z)dy] = -\frac{\partial M_y}{\partial z} dzdy \quad (2.26)$$

Bu akımlara karşılık gelen hacim akımı yoğunlukları (akıma dik, birim $dydz$ yüzeyi başına düşen akım), $(J_b)_{x+} = \frac{\partial M_z}{\partial y}$ ve $(J_b)_{x-} = -\frac{\partial M_y}{\partial z}$ olur. O halde x yönündeki toplam hacim akımı yoğunluğu aşağıdaki gibidir.

$$(J_b)_x = \frac{\partial M_z}{\partial y} - \frac{\partial M_y}{\partial z} \quad (2.27)$$

Buraya kadar sadece x yönündeki akım incelendi. Diğer yönlerdeki (y ve z yönleri) akımlar incelendiğinde benzer şekilde $(J_b)_y = \frac{\partial M_x}{\partial z} - \frac{\partial M_z}{\partial x}$ ve $(J_b)_z = \frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y}$ olduğu görülür. Bu sonuçlardan $\vec{J}_b$ hacim akımı yoğunluğunun, $\vec{M}$ mıknatıslanma vektörünün rotasyoneli olduğu görülmektedir.

$$\vec{J}_b = \nabla \times \vec{M} \quad (2.28)$$



Şekil 2.14 y-doğrultusunda düzgün mıknatıslanmamış malzemenin iki küçük parçası [2]

2.3.5 Madde içinde Manyetik Alan ve Manyetik Alan Şiddeti (H)

Mıknatıslanmış bir maddedeki toplam manyetik alan, uygulanan dış manyetik alan $\vec{B}_o$ ve mıknatıslanma nedeniyle maddenin kendisinin oluşturduğu manyetik alan $\vec{B}_m$ 'nin vektörel toplamıdır. İç manyetik alan $\vec{B}_m = \mu_o \vec{M}$ 'dir.

$$\vec{B} = \vec{B}_o + \vec{B}_m = \vec{B}_o + \mu_o \vec{M} \quad (2.29)$$

$\vec{B}_o$ dış alanı madde üzerine sarılmış iletkenlerden geçen akımdan veya madde iletkeni kendi üzerinden geçen akımdan dolayı oluşan alandır. Bu akıma serbest akım denir ve serbest akım yoğunluğu $\vec{J}_f$ olarak tanımlanmıştır. $\vec{B}_m$ ise mıknatıslanmanın etkisiyle malzemenin içinde oluşan $\vec{J}_b$ (malzeme düzgün mıknatıslanmamışsa) ve yüzeyinde oluşan $\vec{K}_b$ (malzeme düzgün mıknatıslanmışsa) bağlı akımları nedeniyle madde içinde oluşan alandır. Madde içindeki toplam hacimsel akım yoğunluğu serbest ve bağlı akım yoğunluklarının vektörel toplamıdır.

$$\vec{J} = \vec{J}_b + \vec{J}_f \quad (2.30)$$

(2.3)'de verilen integral formdaki Amper yasası, diferansiyel formda yazılıp (2.30)'a uygulanırsa (2.28) yardımıyla aşağıdaki sonuç elde edilir ($\nabla \times \vec{B} = \mu_o \vec{J}$).

$$\frac{1}{\mu_o} (\nabla \times \vec{B}) = \vec{J} = \vec{J}_b + \vec{J}_f = (\nabla \times \vec{M}) + \vec{J}_f \quad (2.31)$$

İki rotasyonel bir araya toplanıp (2.31) yeniden yazılabilir.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \right) = \vec{J}_f \quad (2.32)$$

Parantez içindeki nicelik madde içindeki manyetik alan şiddeti olarak tanımlanır. Manyetik alan şiddeti $\vec{H}$ ile gösterilir.

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \quad (2.33)$$

Buna göre (2.32), aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_f \quad (2.34)$$

(2.34) eşitliği, madde içindeki Amper yasasını göstermektedir. Amper yasası integral formda (2.35)'teki gibi yazılır.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_f \quad (2.35)$$

Burada I_f Amper halkası içinden geçen toplam serbest akımdır. (2.35)'e göre madde içindeki manyetik alan şiddeti $\vec{H}$, sadece dışarıdan uygulanan serbest akıma bağlıdır.

2.3.6 Manyetik Maddelerin Sınıflandırılması

Manyetik özelliklerine bağlı olarak maddeler başlıca üç sınıfa ayrılırlar. Bunlar paramanyetik, diyamanyetik ve ferromanyetik malzemelerdir. Bu malzemelerin her birinin manyetik alan içersindeki davranışları farklıdır. Bu farklılık atomik yapılarından kaynaklanan manyetik dipol momentlerine bağlıdır.

2.3.6.1 Paramanyetizma ve Diyamanyetizma

Paramanyetik maddelerin manyetik momentleri, içinde bulundukları manyetik alanı arttıracak şekilde yönlenirken, diyamanyetik maddelerin manyetik momentleri ise, içinde bulundukları alanı zayıflatacak şekilde yönlenir. Bunun nedeninin anlaşılabilmesi için maddelerin spin ve yörüngesel momentlerinin manyetik alan içersindeki davranışları ayrı ayrı incelenmelidir.

Bir manyetik alan içinde bulunan maddelerin spin manyetik momentleri, manyetik momentin etkisiyle alanla aynı yönde yönelmeye çalışır. Bu durum maddenin

kendisinin içinde oluşturduğu alanın, dışarıdan uygulanan manyetik alanın yönüyle aynı olmasını sağlar ve toplam alan artmış olur. Paramanyetizmaya neden olan şey bu manyetik momenttir. Ancak Paramanyetizma tüm maddelerde gözlenmez çünkü çift sayıda elektronu bulunan atomlarda elektronlar, spinleri zıt yönde yönlenecek şekilde dizilmiştir. Bu durum spin manyetik momentlerinin birbirlerini yok etmesine neden olduğu gibi elektron çiftine etki eden toplam manyetik momenti de nötrleştirir. Bu nedenle paramanyetizma sadece, çiftlenmemiş elektronun manyetik moment etkisinde kaldığı, tek sayıda elektrona sahip atomlarda gözlenir. Bu tür atomlarda bile manyetik momentlerin, tam olarak uygulanan alan yönünde hizalanması mümkün değildir. Çünkü gelişigüzel ısısal çarpışmalar düzeni bozma eğilimindedir [1].

Manyetik moment, yörüngesel manyetik momente de etki eder ancak bütün yörüngeyi eğmek, spini eğmekten çok daha zordur. Bu nedenle paramanyetizmaya yörüngesel katkı çok küçüktür. Yörüngesel hareketin üzerinde manyetik momentten daha önemli bir etki vardır. Bu etkinin anlaşılması için elektronun yörüngedeki dairesel hareketin incelenmesi gerekir. Herhangi bir manyetik alanın olmadığı durumda elektrona etkiyen kuvvet sadece elektriksel kuvvettir. Bu nedenle merkezci ivme sadece elektriksel kuvvete bağlıdır.

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r} \quad (2.36)$$

Burada $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ Coulomb sabiti, e elektronun yükü, m_e elektronun kütlesi, v elektronun çizgisel hızı, r ise yörüngenin yarıçapıdır. Manyetik alanın varlığında elektriksel kuvvete ilave bir de manyetik kuvvet elektrona etki etmeye başlar. Uygulanan manyetik alanın Şekil 2.15'deki gibi, yörünge düzlemine dik olduğu varsayılırsa merkezci ivmeyi oluşturan net kuvvet aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} + e\bar{v}B = m_e \frac{\bar{v}^2}{r} \quad (2.37)$$

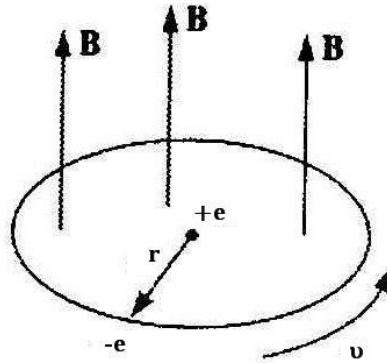
Burada $\bar{v}$, manyetik kuvvetin etkisiyle hızlanan elektronun yeni çizgisel hızıdır. Elektriksel kuvvetin (2.36)'daki değeri (2.37)'de yerine yazılarak aşağıdaki adımlar uygulandığında hız farkı elde edilir.

- $m_e \frac{v^2}{r} + e\bar{v}B = m_e \frac{\bar{v}^2}{r}$
- $e\bar{v}B = \frac{m_e}{r}(\bar{v}^2 - v^2) = \frac{m_e}{r}(\bar{v} + v)(\bar{v} - v)$
- $\Delta v = \bar{v} - v, \bar{v} + v = \Delta v + 2v$
- $e\bar{v}B = \frac{m_e}{r}(\Delta v + 2v)\Delta v = \frac{m_e}{r}(\Delta v^2 + 2v\Delta v)$
- $\Delta v \ll 1 \Rightarrow \Delta v^2 \rightarrow 0, \bar{v}/v \cong 1$

$$\Delta v = \frac{erB}{2m_e} \quad (2.38)$$

Elektronun çizgisel hızında meydana gelen bu değişim, (2.21)'de yerine yazılarak yörüngesel manyetik momentteki değişim hesaplanabilir.

$$\Delta m = \frac{1}{2}e \left(\frac{erB}{2m_e} \right) r = \frac{e^2 r^2}{4m_e} B \quad (2.39)$$



Şekil 2.15 Yörüngeye dik bir B manyetik alanı etkisinde tek elektronlu bir atom [2]

Şekil 2,9'daki elektronun yörüngesel manyetik momentin yönünün aşağı doğrudur. Elektronun çizgisel hızı arttığında (2.21)'e göre yörüngesel manyetik moment de artar. Diğer yönde dolanan bir elektron düşünüldüğünde yörüngesel manyetik moment yukarı doğru olur. Ancak bu durumda manyetik kuvvet, elektriksel kuvvete zıt yönde oluşur. Bu nedenle merkezci ivme ve çizgisel hızda bir azalma meydana gelir. Elektronun çizgisel hızı azaldığında (2.21)'e göre yörüngesel manyetik moment de azalır. Manyetik alanın olmadığı durumda aşağıya ve yukarıya doğru yönlenmiş, eşit büyüklükteki manyetik momentler birbirini dengeler. Ancak manyetik alanın etkisinde yukarıya doğru yönlenmiş manyetik momentlerin büyüklüğü azalırken, aşağı doğru yönlenmiş manyetik momentlerin büyüklüğü artar. Bu durumda yörüngesel manyetik

momentler birbirini dengelemez ve aşağı doğru net bir yörüngesel manyetik moment meydana gelir. Bu net manyetik momentin yönü, dışarıdan uygulanan manyetik alanın yönünün tersidir. Bu olay diyamanyetizmayı açıklar [2]. Diyamanyetizma tüm maddeler için geçerlidir ancak etkisi paramanyetizmaya göre çok daha küçük olduğundan, paramanyetizmanın bulunmadığı çift sayıda elektronu bulunan atomlarda gözlenir.

2.3.6.2 Manyetik Alınganlık ve Geçirgenlik

Paramanyetik ve diyamanyetik maddelerde mıknatıslanma, uygulanan alan tarafından sürdürülür. Uygulanan alan kaldırıldığında mıknatıslanma da kaybolur. Bu maddelerde mıknatıslanma vektörü $\vec{M}$, manyetik alan şiddeti $\vec{H}$ ile doğru orantılıdır. Bunlara doğrusal ortam denir.

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (2.40)$$

Burada χ_m manyetik alınganlıktır. Manyetik alınganlık bir maddeden diğerine değişen boyutsuz bir büyüklüktür. Paramanyetik malzemelerde manyetik alınganlık pozitif değerlidir. Bu yüzden bu maddelerde $\vec{M}$ ile $\vec{H}$ aynı yöndedir. Diyamanyetik malzemelerde ise manyetik alınganlık negatif değerlidir. Bu nedenle $\vec{M}$ ile $\vec{H}$ zıt yönlüdür. (2.40) eşitliği (2.33)'te yerine yazıldığında aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\vec{B} = \mu_o(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_o(1 + \chi_m)\vec{H} \quad (2.41)$$

(2.41) eşitliğine göre toplam manyetik alan $\vec{B}$, manyetik alan şiddeti $\vec{H}$ ile doğru orantılıdır. Bu orantı sabiti manyetik geçirgenlik olarak tanımlanmış olup μ_m ile gösterilir.

$$\mu_m = \mu_o(1 + \chi_m) \quad (2.42)$$

Burada $(1 + \chi_m)$ ifadesi görel geçirgenlik olarak tanımlanmış olup μ_r ile gösterilir. μ_r boyutsuz bir büyüklüktür.

$$\mu_r = (1 + \chi_m) \quad (2.43)$$

(2.42) eşitliği (2.41)'de ve (2.43) eşitliği (2.42)'de yerine yazıldığında manyetik alan aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\vec{B} = \mu_m \vec{H} = \mu_r \mu_o \vec{H} \quad (2.44)$$

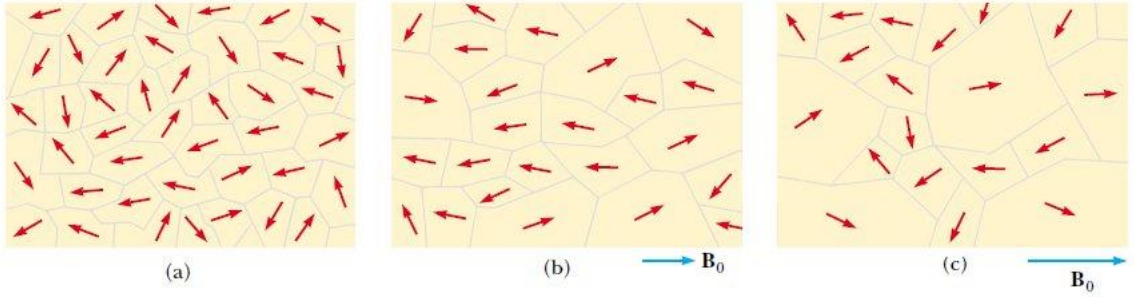
Paramanyetik malzemelerde $\mu_m > \mu_o$ ve diyamanyetik malzemelerde $\mu_m < \mu_o$ 'dır. Bu tür malzemelerin manyetik alınganlıklarının değeri 10^{-5} mertebelerindedir [2]. Bu nedenle bu maddeler için μ_m hemen hemen μ_o 'a eşittir. Bazı maddelerin manyetik alınganlıkları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı malzemelerin manyetik alınganlıkları [2]

Diyamanyetik Malzemeler	Manyetik Alınganlık	Paramanyetik Malzemeler	Manyetik Alınganlık
Bizmut	-1.6×10^{-4}	Oksijen	1.9×10^{-6}
Altın	-3.4×10^{-5}	Sodyum	8.5×10^{-6}
Gümüş	-2.4×10^{-5}	Alüminyum	2.1×10^{-5}
Bakır	-9.7×10^{-6}	Tungsten	7.8×10^{-5}
Su	-9.0×10^{-6}	Platinyum	2.8×10^{-4}
Karbondioksit	-1.2×10^{-8}	Sıvı Oksijen (-200°C)	3.9×10^{-3}
Hidrojen	-2.2×10^{-9}	Gadolinyum	4.8×10^{-1}

2.3.6.3 Ferromanyetizma

Atomları sürekli manyetik momente sahip az sayıda kristal yapıları maddeler vardır. Bu maddelerde ferromanyetizma denen kuvvetli manyetik olaylar gözlenir. Ferromanyetik maddeler zayıf bir dış manyetik alanın içinde bile birbirlerine paralel olarak yönelmeye çalışan atomik manyetik momentler içerir. Manyetik momentler bir kere paralel hale geldikten sonra dış alan ortadan kaldırılrsa bile madde mıknatıslanmış olarak kalır. Bu sürekli yönelim, komşu olan manyetik momentler arasındaki kuvvetli etkileşimlerden kaynaklanır. Bu durum ancak kuantum mekaniksel ifadelerle açıklanabilir. Paramanyetik ve diyamanyetik malzemelerde gözlenmeyen bu olay ferromanyetik malzemelerin en büyük özelliğidir. Tüm ferromanyetik maddeler domain denilen mikroskobik bölgelerden oluşurlar. Herhangi bir bölgenin manyetik momentleri aynı yönde yönlendirilmişlerdir. Bu bölgelerin hacimleri yaklaşık 10^{-12} ila $10^{-8} m^3$ arasında olup, 10^{17} ila 10^{21} civarında atom içermektedirler [1].



Şekil 2.16 a)Mıknatıslanmamış bir ferromanyetik malzemenin bölgeleri b) $\vec{B}_0$ dış manyetik alan içindeki bir ferromanyetik malzemenin bölgeleri c)Daha güçlü bir dış manyetik alan içindeki bir ferromanyetik malzemenin bölgeleri [1]

Farklı yönelimlere sahip olan bölgeler arasındaki sınırlara bölge duvarları denir. Mıknatıslanmamış bir ferromanyetik malzemede bölgelerin manyetik momentleri, Şekil 2.16a'da görüldüğü gibi net manyetik moment sıfır olacak şekilde rastgele yönlendirilmişlerdir. Malzeme bir dış manyetik alan içine konduğu zaman, bölgelerin manyetik momentleri, manyetik momentin etkisiyle, uygulanan alan yönünde yönlenmeye çalışırlar. Ancak her bölgenin manyetik momenti, kendine komşu olan bölgelerin manyetik momentlerine paralel kalma eğilimi gösterdiğinden, manyetik momentlerin çoğu bu momente karşı direnir. Bunların yanı sıra iki bölgenin sınırında birbiriyle yarışan komşular da vardır. Manyetik momentin, dış manyetik alan uygulanmadan önce uygulanan alana en yakın yönlerde yönlendirilmiş olan manyetik momentlere etkisi daha büyüktür. Dolayısıyla alanla aynı yönlü bölgelerin sınırları büyürken diğer bölgelerin sınırları küçülür (Şekil 2.16b). Bu durumda malzemenin genelinde, uygulanan alanla aynı yönde yönlendirilmiş net bir manyetik moment oluşur. Yani uygulanan alanın asıl etkisi bölgelerin sınırlarını değiştirmektir. Malzeme biraz daha güçlü bir alanın içine konulursa, manyetik momentleri alan yönünde yönlendirilmiş bölgelerin sınırları daha da küçülür(Şekil 2.16c). Eğer alan yeterince büyükse, alan yönünde yönlendirilmiş bölgelerin sınırları diğer bölgeler yok oluncaya kadar genişler ve artık daha da büyümesi mümkün olmaz. Bu durumda malzemenin doymuş olduğu söylenir. Uygulanan dış manyetik alan kaldırıldığında, bir miktar gelişmiş güzel yönlendirilmiş bölgeler tekrar oluşacaktır. Ancak bu bölgeler, mıknatıslanmamış durumdakine göre çok daha azdır. Dolayısıyla alan ortadan kaldırıldığında bile malzeme mıknatıslanmış olarak kalır. Çünkü ferromanyetik malzemelerde, normal sıcaklıklarda,

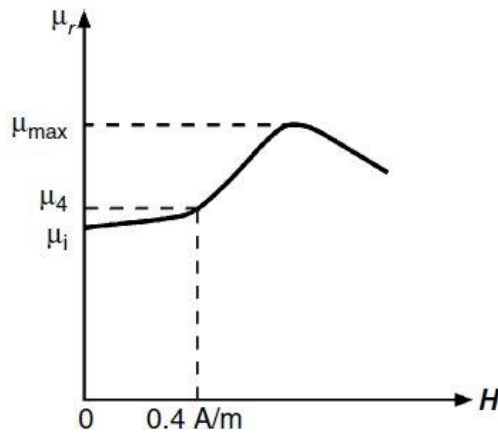
rastgele ısısal çarpışmalar manyetik momentlerin bu tercihli yönelimlerini bozacak kadar etkili değildir [1].

Ferromanyetik malzemeler doğrusal ortamlar olmadığından mıknatıslanma vektörleri manyetik alan şiddeti ile doğru orantılı değildir. Bu tür malzemelerde manyetik alanın, manyetik alan şiddetine göre değişimi Şekil 2.19'deki mıknatıslanma eğrisi gibidir. Paramanyetik malzemelerde manyetik alınganlık χ_m , buna bağlı olarak manyetik geçirgenlik μ_m ve görel geçirgenlik μ_r sabit olduğundan bu malzemelerin mıknatıslanma eğrileri doğrusaldır. Ferromanyetik malzemelerde μ_m ve μ_r manyetik alan şiddeti H 'nin bir fonksiyonudur [3].

$$\mu_m(H) = \frac{B(H)}{H} \quad (2.45)$$

$$\mu_r(H) = \frac{B(H)}{\mu_0 H} \quad (2.46)$$

Şekil 2.17'de ferromanyetik bir malzemede μ_r 'nin H 'ye göre değişimi gösterilmiştir.

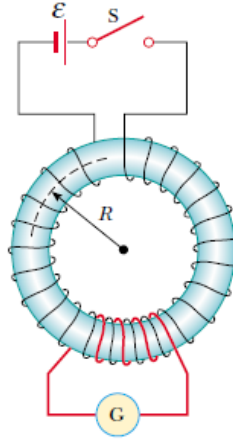


Şekil 2.17 Görel geçirgenlik μ_r 'nin manyetik alan şiddeti H 'ye göre değişimi [4]

Burada μ_i görel geçirgenliğin başlangıç değeri olup çok küçük bir manyetik alan şiddeti H uygulandığında geçerlidir [4]. μ_4 görel geçirgenliğin $H = 0,4 \text{ A/m}$ için değeri, μ_{max} ise görel geçirgenliğin maksimum değeridir. μ_i ve μ_{max} aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (\Delta H \rightarrow 0) \quad (2.47)$$

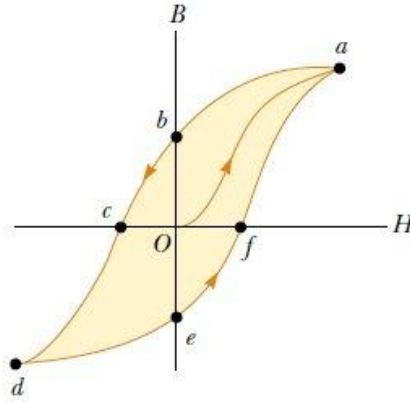
$$\mu_{max} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{max}}{H_{max}} \quad (2.48)$$



Şekil 2.18 Demir çekirdekli bir toroid [1]

Şekil 2.18'deki gibi çekirdeği mıknatıslanmamış demirden oluşan bir toroidin sargılarındaki akım sıfırdan bir I değerine arttırıldığında, (2.35)'e göre manyetik alan şiddeti I akımıyla lineer olarak artar. Manyetik alan şiddeti artarken mıknatıslanma eğrisi üzerinde O noktasından a noktasına kadar manyetik alan da artar (Şekil 2.19). O noktasında demirin bölgelerinin manyetik momentleri rastgele dizilmişlerdir ve net manyetik moment sıfırdır. Bu da $B_m = 0$ 'a karşılık gelir. Sargıdan geçen akım manyetik alan şiddetini dolayısıyla da dış alan B_o 'ı arttırdıkça ($\vec{B}_o = \mu_0 \vec{H}$) net manyetik moment alanla aynı yönde yönelmeye başlar ve sonunda a noktasında doyuma ulaşır. Bu noktada demirdeki toplam manyetik alan maksimum değerindedir ($B = B_{SAT}$). Bundan sonra akım I değerinden sıfıra doğru düşürüldüğünde manyetik alan, mıknatıslanma eğrisindeki ab yolunu izler. b noktasında akım sıfırdır, dolayısıyla dış alan B_o ortamdaki kaldırılmış ve manyetik alan şiddeti sıfır olmuştur. Bu noktada dış manyetik alan olmamasına rağmen demir çekirdeğinin manyetik alanı sıfır değildir. Bunun nedeni çekirdeğin mıknatıslanmış olarak kalmasıdır ($B = B_m$). Sargıdaki akım diğer yöne doğru arttırılmaya başlandığında manyetik alan bc yolunu izlemeye başlar. Akımın ters yönde arttırılması manyetik alan şiddetinin ve dış manyetik alanın ters yönde oluşması anlamına gelir ($B_o < 0$). Bu durumda demirdeki bölgelerin manyetik momentleri yön değiştirmeye başlar ve mıknatıslanma azalır. c noktasında toplam manyetik alan sıfırdır, dış manyetik alan negatiftir, mıknatıslanma ise dış manyetik alanın değeri kadar ve çok çok küçüktür, ancak pozitifdir ($B = B_o + B_m$). Bu noktada her ne kadar mıknatıslanma çok küçük bir değerde de olsa bu değer sıfır kabul edilebilecek kadar küçüktür. I akımı ters yönde daha da arttırıldığında demir ters yönde mıknatıslanmaya

başlar ($B_m < 0$). Bu esnada manyetik alan cd yolunu izler ve d noktasına geldiğinde demir ters yönde doyuma ulaşır ($B = -B_{SAT}$). Bundan sonra akım daha da arttırılabilir miknatıslanma değişmez. Bu noktadan sonra akım sıfıra düşürülüp tekrar başlangıçtaki (pozitif) yönde arttırılrsa benzer şekilde manyetik alan def yolunu izler. Akım yeterince arttırıldığında ise demir yine a noktasında pozitif yönde doyuma ulaşır. Manyetik alanın, manyetik alan şiddetine göre bu değişimine manyetik histerezis denir. Manyetik histerezis, ferromanyetik bir maddenin miknatıslanmasının, uygulanan dış alan şiddetine olduğu kadar maddenin geçmişteki miknatıslanma durumuna da bağlı olduğunu gösterir. Bu nedenle Şekil 2.19'deki miknatıslanma eğrisine histerezis eğrisi de denir.

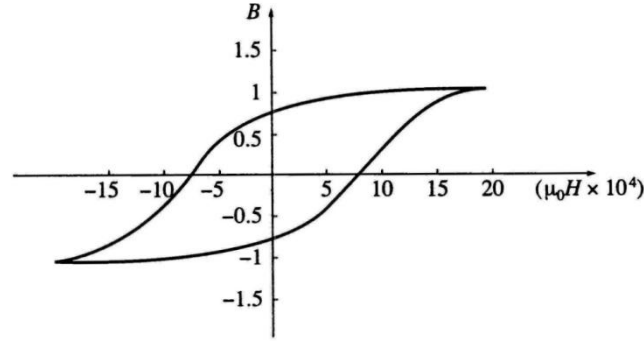


Şekil 2.19 Ferromanyetik bir maddenin miknatıslanma veya histerezis eğrisi [1]

Miknatıslanma eğrisinde gösterilen $\vec{B}$ demir çekirdeğinde oluşan toplam manyetik alandır ve bu alan (2.29)'a göre dış manyetik alan B_o ile madde içinde oluşan manyetik alan B_m 'nin vektörel toplamıdır. Bu alanlar kıyaslandığında $\vec{B}_o$ 'ın $\vec{B}_m$ 'ye göre çok daha (yaklaşık 10^4 kez) küçük olduğu görülür.[2] Bu nedenle oluşan toplam manyetik alanda esas etkili olan bileşen maddenin içinde meydana gelen $\vec{B}_m$ alanıdır. $\vec{B}_m$ ise direkt olarak maddenin miknatıslanmasına bağlıdır. Bu yüzden ferromanyetik maddeler doyuma ulaştığında miknatıslanma daha fazla artamayacağı için sargılardan geçirilen akım daha da arttırıldığında, teorik olarak $\vec{B}_o$ artmasına rağmen maddenin toplam manyetik alanı $\vec{B}$ 'nin daha fazla artmadığı kabul edilir. Dış manyetik alan $\vec{B}_o$, (2.29) ve (2.33)'e göre aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$\vec{B}_o = \mu_o \vec{H} \quad (2.49)$$

Buna göre örnek bir ferromanyetik malzeme için oluşan toplam manyetik alanın dış manyetik alan $\vec{B}_o$ 'a göre değişimi Şekil 2.20'de gösterilmiştir.



Şekil 2.20 Toplam manyetik alan B 'nin B_o 'a göre değişimi [2]

Bu eğri, yatay eksen de gösterilen B_o ($\mu_o H$), 10^4 kez büyütölerek çizilmiştir [2]. Bu da onun B 'ye göre ne kadar küçük olduğunu gösterir.

Mıknatıslanma sürecinde maddenin kazandığı enerji, dış manyetik alanın kaynağından doğar. Mıknatıslanma döngüsü tekrarlandığı zaman, bölgelerin yeniden sırlanışlarından ötürü maddede oluşan kayıplar, manyetik enerjinin iç ısısal enerjiye dönüşmesine neden olarak maddenin sıcaklığını arttırır. Bu nedenle değişken alanların etkisindeki aygıtlarda (transformatörler gibi) yumuşak ferromanyetik maddelerden yapılan çekirdekler kullanılmalıdır. Bunların histerezis ilmekleri daha dar olup döngü başına enerji kayıpları daha küçüktür [1].

Ferromanyetik maddelerde normal sıcaklıklarda, rastgele ısısal çarpışmaların manyetik momentlerin yönelimlerini bozmadığı, ancak belli bir sıcaklığın üstünde ısısal çarpışmaların etkisinin arttığı ve kalıcı mıknatıslık özelliğinin kaybolduğı gözlenmiştir. Paramanyetik malzemelerin mıknatıslanmasıyla ilgili araştırmalar yapan Pierre Curie adındaki bilim adamı, paramanyetik bir maddenin mıknatıslanmasının uygulanan dış manyetik alanla doğru, sıcaklıkla ise ters orantılı olduğunu keşfetmiştir [1].

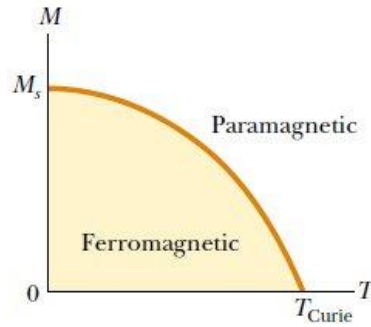
$$M = C \frac{B_o}{T} \quad (2.50)$$

Burada C Curie sabitidir. Bu bağıntı mıknatıslanmanın artan alanla ve azalan sıcaklıkla arttığını göstermektedir. Çok yüksek manyetik alanlarda veya çok düşük sıcaklıklarda paramanyetik malzemeler doyuma ulaşır ve mıknatıslanma maksimum seviyeye gelir. Bu andan sonra artık (2.50) geçerli değildir. Ferromanyetik maddeler ise Curie sıcaklığı

denen bir kritik sıcaklığa ulaştıklarında, kalıcı mıknatıslık etkileri ortadan kalkar ve paramanyetik hale geçer (Şekil 2.21). Curie sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, manyetik momentler paralel olarak dizilebildikleri için madde ferromanyetiktir. Curie sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda, ısısal enerji, manyetik momentlerin gelişigüzel yönlenmelerine neden olacak kadar yüksektir. Bu yüzden madde paramanyetik olur [1]. Çeşitli ferit malzemelerin Curie sıcaklıkları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Sentezlenen ferit malzemelerin Curie sıcaklıkları [5]

No	Ferit	$T_c (^{\circ}C)$	No	Ferit	$T_c (^{\circ}C)$
1	$BaFe_{12}O_{19}$	453			
2	$Ba(Co,Zr)_{0.4}Fe_{11.6}O_{19}$	426	7	$Ba(Ni,Zr)_{0.4}Fe_{11.6}O_{19}$	434
3	$Ba(Co,Zr)_{0.8}Fe_{11.2}O_{19}$	391	8	$Ba(Ni,Zr)_{0.8}Fe_{11.2}O_{19}$	400
4	$Ba(Co,Zr)_{1.2}Fe_{10.8}O_{19}$	330	9	$Ba(Ni,Zr)_{1.2}Fe_{10.8}O_{19}$	374
5	$Ba(Co,Zr)_{1.6}Fe_{10.4}O_{19}$	305	10	$Ba(Ni,Zr)_{1.6}Fe_{10.4}O_{19}$	343
6	$Ba(Co,Zr)_{2.0}Fe_{10.0}O_{19}$	295	11	$Ba(Ni,Zr)_{2.0}Fe_{10.0}O_{19}$	315



Şekil 2.21 Ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanmasının sıcaklıkla değişimi [1]

ENDÜKTANS VE MANYETİK DEVRELER**3.1 Endüktans**

Faraday yasasına göre zamanla değişen bir manyetik akı, iletken üzerinde bir emk indükler. Bir bobin içeren (solenoid veya toroit) herhangi bir devre göz önüne alındığında devreden geçirilen akımın arttırılması veya azaltılması, bobinde oluşan manyetik alanı, dolayısıyla da manyetik akıyı arttırır veya azaltır. Akıdaki bu değişim bobinin uçları arasında bir emk indükler. İndüklenen bu emk, Lenz kanununa göre bobin üzerinden, kendini oluşturan manyetik alanın değişimine karşı koyacak şekilde bir akım geçirir. Yani devrenin akımı artıyorsa onu azaltmaya, azalıyorsa arttırmaya çalışır. Bu nedenle bobin daima devreden geçen akımın değişimine karşı bir direnç gösterir.

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (3.1)$$

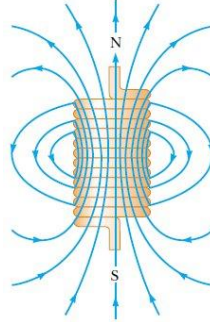
Burada L , bobinin geometrik özelliklerine bağlı olan bir sabit olup bobinin endüktansı olarak tanımlanır. Endüktans akıdaki değişime karşı koymanın bir ölçüsüdür. N sarımlı bir bobin için endüktans, (2.7) ve (3.1)'e göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$L = N \frac{d\Phi}{dI} \quad (3.2)$$

Endüktansın birimi SI birim sisteminde Henry (H) veya $V \cdot s/A$ 'dir.

3.1.1 İçi Hava Dolu, N Sarımlı Bir Selenoidin Endüktansı

Şekil 3.1'deki gibi içi hava dolu, N sarımlı ve kararlı bir I akımı taşıyan selenoidin endüktansının hesaplanabilmesi için (3.2)'ye göre sargıyı kesen manyetik akı bilinmelidir.



Şekil 3.1 İçi hava dolu, N sarımlı, kararlı bir akım taşıyan bir selenoidin manyetik alan çizgileri [1]

Manyetik alan amper yasasından yararlanılarak hesaplanabilir. Bunun için Şekil 3.2'deki gibi dikdörtgen bir amper halkası seçilir. Buna göre amper yasası aşağıdaki gibi uygulanır.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_1 \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_2 \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_3 \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_4 \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 NI \quad (3.3)$$

Burada N , seçili Amper halkasının içinde kalan toplam sarım sayısıdır. Amper halkasının çevrelediği yüzeyden geçen toplam akım NI 'dir. 2 ve 4 numaralı yollarda manyetik alan yola dik olduğu için $\vec{B} \cdot d\vec{l}$ skaler çarpımı sıfırdır. 3 numaralı yol ise selenoidin dışındadır. Selenoidin dışında manyetik alan çok çok az olduğu için sıfır kabul edilir[1]. Dolayısıyla 3 numaralı yol boyunca da $\vec{B} \cdot d\vec{l}$ çarpımı sıfırdır. 1 numaralı yolda ise manyetik alan yola paralel olduğu için $\vec{B} \cdot d\vec{l}$ skaler çarpımı Bdl 'ye eşittir. Ayrıca selenoidin içinde manyetik alan düzgündür[1]. Buna göre (3.3) eşitliği aşağıdaki gibi çözüldüğünde selenoidin içindeki manyetik alan elde edilir.

$$\bullet \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_1 \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \int_1 dl = Bl = \mu_0 NI$$

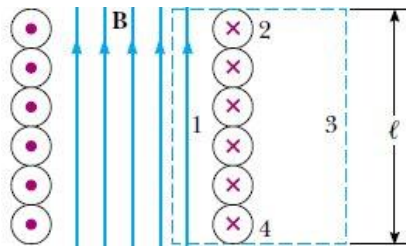
$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I \quad (3.4)$$

Burada l selenoidin uzunluğudur. Sargıdan geçen manyetik akı (2.4) ve (3.4)'e göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Phi = \mu_o \frac{NA}{l} I \quad (3.5)$$

Burada A , selenoidin kesit alanıdır. (3.2) ve (3.5) yardımıyla N sarımlı bir selenoidin endüktansı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$L = \frac{\mu_o N^2 A}{l} \quad (3.6)$$

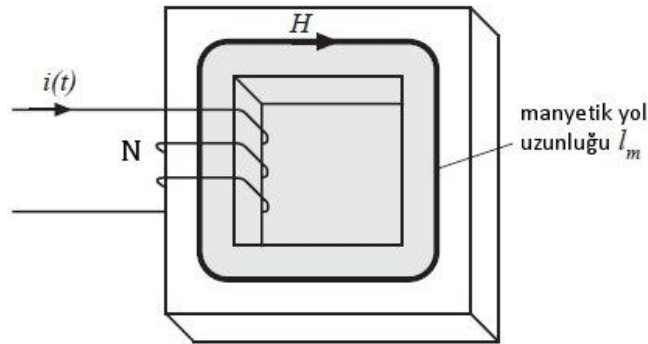


Şekil 3.2 İdeal bir selenoidin kesitsel görünümü [1]

3.1.2 Ferromanyetik Bir Nüveye Sarılmış Bobinin Endüktansı

Şekil 3.3'deki gibi bir nüveye sarılmış, N sarımlı bir bobinin endüktansının hesaplanabilmesi için (3.2)'ye göre nüvede dolaşan manyetik akının belirlenmesi gerekir. Bu amaçla (2.35)'te belirtilen madde içindeki Amper yasası uygulanır.

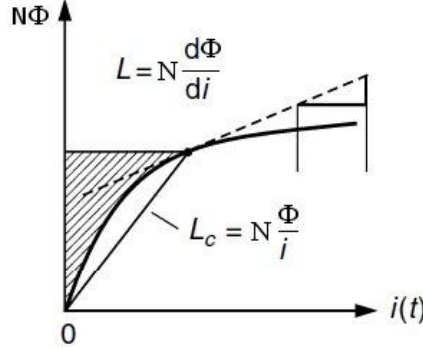
$$\oint \vec{H} d\vec{l} = H l_m = N i(t) \quad (3.7)$$



Şekil 3.3 Bir nüveye sarılmış, N sarımlı bobin [6]

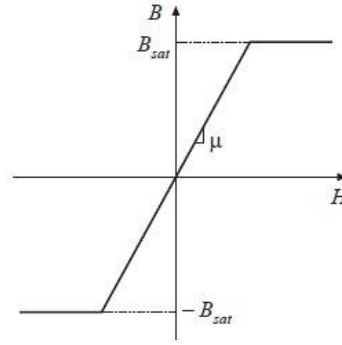
Burada N sarım sayısını, l_m ise manyetik yolun uzunluğunu (Amper halkasının uzunluğu) göstermektedir.

Nüvede dolaşan manyetik akı ile manyetik alan arasında (2.4)'te belirtilen ilişki vardır. Manyetik alan B H 'nin, H de i 'nin bir fonksiyonudur. Buna bağlı olarak $N\Phi$ 'nin i 'ye göre değişimi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 Ferromanyetik bir nüvede $N\Phi$ 'nin i 'ye göre değişimi [4]

Ferromanyetik malzemeden yapılmış bir nüvenin manyetik geçirgenliği μ , sabit olmayıp H 'nin bir fonksiyonudur. Bu nedenle akı ile akım arasındaki matematiksel ilişki kolay elde edilemeyebilir. Manyetik histerezis ihmal edilip mıknatıslanma eğrisinin nüvenin doyuma girmediği aralıkta μ sabit kabul edilirse, bu bölgede manyetik alan ve manyetik alan şiddeti arasında lineer bir ilişki olduğu varsayılır. Ferromanyetik bir malzeme için lineer mıknatıslanma eğrisi Şekil 3.5'deki gibi modellenir.



Şekil 3.5 Manyetik histerezis ihmal edilmiş lineer mıknatıslanma eğrisi [6]

Şekil 3.5'teki lineer mıknatıslanma eğrisine göre nüvedeki manyetik alanın, manyetik alan şiddetine göre değişimi aşağıdaki parçalı fonksiyonla ifade edilir.

$$B = \begin{cases} B_{SAT}, & H \geq B_{SAT}/\mu \\ \mu H, & |H| < B_{SAT}/\mu \\ -B_{SAT}, & H \leq -B_{SAT}/\mu \end{cases} \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.7) ve (3.8)'den manyetik alan aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$B = \frac{\mu N i(t)}{l_m} \quad (3.9)$$

Nüvede dolaşan manyetik akı (2.4) ve (3.9)'a göre aşağıdaki gibidir.

$$\Phi = \frac{\mu N A_c i(t)}{l_m} \quad (3.10)$$

Burada A_c nüvenin kesit alanıdır. Nüvenin manyetik geçirgenliği sabit kabul edildiğinden (3.2) ve (3.10)'a göre bobinin endüktansı aşağıdaki ifadeyle hesaplanır.

$$L = \frac{\mu N^2 A_c}{l_m} \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.11)'deki ifade Şekil 3.4'te gösterilen L_c ile aynıdır. Manyetik geçirgenlik sabit kabul edildiğinde, doyuma girmemiş bir nüve için $N\Phi$ 'nin i 'ye göre değişimi lineerdir.

3.2 Manyetik Devreler

Manyetik devreler, içlerinden manyetik akı geçen, bir veya daha fazla kapalı yoldan oluşan devrelerdir. Manyetik akı nüvenin sınırladığı yolda dolaşır. Manyetik devrelerde sargılardan geçen toplam akım ($Ni(t)$), manyetomotor kuvvet (mmk) olarak tanımlanmış olup $\mathcal{F}$ ile gösterilir. Şekil 3.3'teki gibi manyetik bir devrede mmk, Amper yasasına göre nüvedeki manyetik alan şiddetiyle, manyetik yolun uzunluğunun çarpımına eşittir.

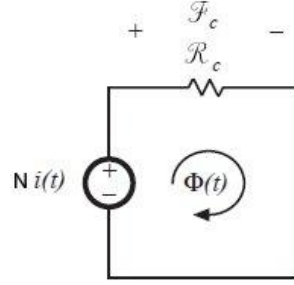
$$\mathcal{F} = Ni(t) = H l_m \quad (3.12)$$

Mmk, (2.4) ve (2.44) eşitliklerinden yararlanılarak, manyetik akı cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$\mathcal{F} = Ni(t) = \frac{l_m}{\mu A_c} \Phi = \mathcal{R} \Phi \quad (3.13)$$

Burada $\frac{l_m}{\mu A_c}$ ifadesi devrenin relüktansı olarak tanımlanır. Relüktans $\mathcal{R}$ ile gösterilir. Manyetik devreler elektrik devrelerine benzerler. Relüktans elektriksel dirence, manyetik akı elektrik akımına, mmk da gerilime karşılık gelir. Bu nedenle (3.13) eşitliği

Ohm kanununa benzetilebilir. Şekil 3.3'teki manyetik devrenin eşdeğeri Şekil 3.6'teki gibidir.



Şekil 3.6 Tek gözlü manyetik bir devrenin eşdeğeri [6]

Bu devrenin endüktansı (3.11) ve (3.13) yardımıyla relüktans cinsinden ifade edilebilir.

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_c} \quad (3.14)$$

3.2.1 Hava Aralıklı Manyetik Devreler

Manyetik devreler Şekil 3.7'daki gibi hava aralığı içerebilir. Bu durumda manyetik akının dolaştığı toplam manyetik yolun uzunluğu l_m , nüvenin içinde kalan yolun uzunluğu l_c ve hava aralığının uzunluğu l_g 'nin toplamına eşittir. Hava aralığının relüktansı nüveninkinden farklıdır. Eşdeğer devre oluşturulurken, tıpkı bir elektrik devresindeki direnç gibi, hava aralığının relüktansı, nüvenin relüktansına seri olarak çizilir[6]. Bu durum, sargılardan geçen akımı değiştirmemesine rağmen manyetik devrede dolaşan akıyı azaltacağından, manyetik devrenin endüktansı azalır. Hava aralıklı bir manyetik devrenin eşdeğeri Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

$$Ni(t) = (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g)\Phi \quad (3.15)$$

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g} \quad (3.16)$$

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (3.17)$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_c} \quad (3.18)$$

Burada $\mathcal{R}_c$ nüvenin relüktansını, l_c manyetik akının nüvenin içinde dolaştığı mesafeyi, $\mathcal{R}_g$ hava aralığının relüktansını, l_g ise hava aralığının mesafesini göstermektedir. Hava

aralığının kesiti nüvenin kesitiyle ve havanın manyetik geçirgenliği serbest uzayın manyetik geçirgenliğiyle aynı kabul edilmiştir[6].

3.2.2 Hava Aralığının Etkisi

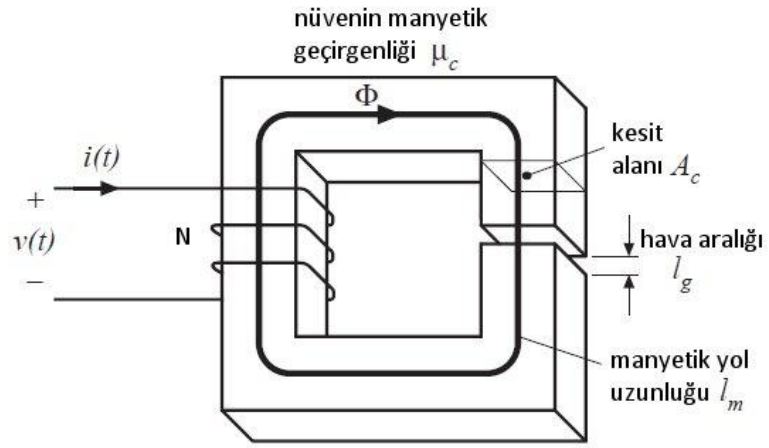
Hava aralığının etkisi sadece endüktansı azaltmak değildir. Aynı zamanda nüvenin doyuma girmesini de geciktirir. Yani aynı sargılardan nüve doyuma girmeden daha fazla akım geçirilebilir.

$$I_{SAT1} = \frac{\Phi_{SAT}}{N} \mathcal{R}_c \quad (3.19)$$

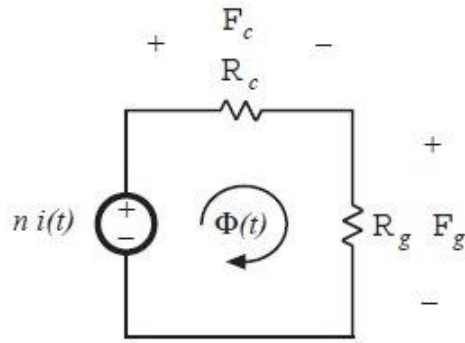
$$I_{SAT2} = \frac{\Phi_{SAT}}{N} (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g) \quad (3.20)$$

(3.13)'e göre hava aralığı mevcut değilken doyma akımı (3.19) eşitliği ile hesaplanır. Hava aralıklı manyetik bir devrede ise doyma akımı (3.20) eşitliği ile belirlenir. Nüvenin doyuma girmesi yapısal bir özellik olduğu için nüvedeki doyma akısı her zaman aynıdır. Ancak hava aralığı varken devrenin toplam relüktansı arttığı için nüveyi doyuma sokacak akımın değeri de artar. Hava aralığının manyetik devrenin karakteristiğini nasıl değiştirdiği Şekil 3.9'de gösterilmiştir. Burada $B-H$ eğrisi yerine, (3.19) ve (3.20) eşitliklerine göre çizilen $\Phi-Ni(t)$ eğrisi görülmektedir. Bu iki eğrinin karakteristikleri aynıdır çünkü akı ile manyetik alan arasında (2.4)'te belirtilen ilişki vardır. Hava aralığı mevcutken Ni ile nüvedeki manyetik alan şiddeti arasında (3.12)'de belirtilen ilişki geçerli değildir. Hava aralıklı bir manyetik devreye Amper yasası uygulandığında (3.21)'de belirtilen ilişki elde edilir. Ancak nüvedeki manyetik alan şiddeti H_c , mmk ile orantılıdır [6].

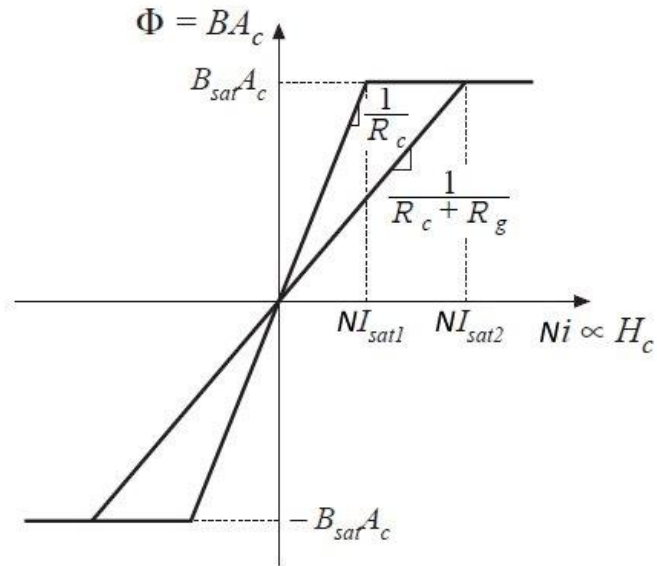
$$NI = H_c l_c + H_g l_g \quad (3.21)$$



Şekil 3.7 Hava aralığı içeren manyetik devre [6]



Şekil 3.8 Hava aralığı içeren manyetik devrenin eşdeğeri [6]



Şekil 3.9 Hava aralığının mıknatıslanma eğrisine etkisi [6]

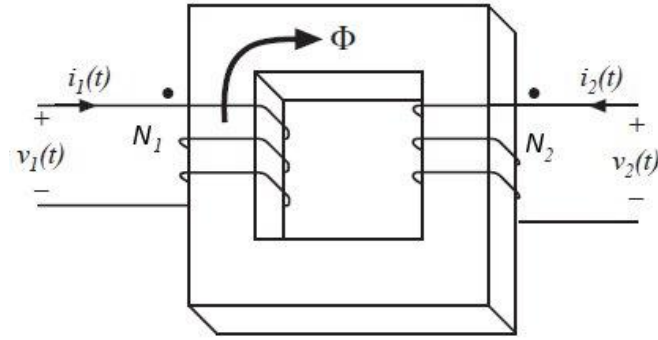
3.3 Transformatör Modeli

Şekil 3.10'daki gibi hava aralıksız, iki sargılı bir transformatörün eşdeğer devresi Şekil 3.11'deki gibidir. Buna göre manyetik devrenin denklemleri (3.13)'e göre aşağıdaki gibidir.

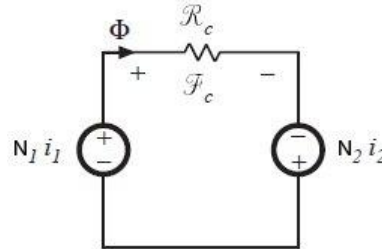
$$\mathcal{F}_c = N_1 i_1 + N_2 i_2 \quad (3.22)$$

$$\Phi \mathcal{R} = N_1 i_1 + N_2 i_2 \quad (3.23)$$

Burada $\mathcal{R}$ nüvenin relüktansı, $\mathcal{F}_c$ nüvedeki toplam manyetomotor kuvvet, Φ ise nüvede dolaşan toplam akıdır.



Şekil 3.10 Ferromanyetik nüveye sarılmış çift sargılı bir transformatör [6]



Şekil 3.11 Transformatörün manyetik eşdeğer devresi [6]

3.3.1 İdeal Transformatör

İdeal transformatörde nüvenin mıknatıslanması için bir enerji harcanmadığı kabul edilir. Bu nedenle nüvenin relüktansı sıfırdır. (3.23) eşitliğindeki relüktans yerine sıfır yazıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0 \quad (3.24)$$

(2.7)'de verilen Faraday yasasına göre transformatörün gerilim denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$v_1 - N_1 \frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (3.25)$$

$$v_2 - N_2 \frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (3.26)$$

$$\frac{v_1}{N_1} = \frac{v_2}{N_2} \quad (3.27)$$

3.3.2 Karşıt Endüktans, Mıknatıslama Endüktansı ve Mıknatıslama Akımı

İki sargıdan oluşan bir transformatörde primer sargıdan geçen akım nüvede Φ_{12} akısını oluşturur. Oluşan bu Φ_{12} akısı sekonderde bir elektromotor kuvvet indükler. İndüklenen bu emk nedeniyle sekonderden bir akım geçer ve bu akım nüvede Φ_{21} akısını meydana getirir. Φ_{21} akısı ise primerde bir emk indükler. Nüvede dolaşan toplam akı Φ , Φ_{12} ve Φ_{21} akılarının toplamına eşittir. Φ_{12} ve Φ_{21} akıları (3.23) yardımıyla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Phi = \frac{N_1}{\mathcal{R}} i_1 + \frac{N_2}{\mathcal{R}} i_2 = \Phi_{12} + \Phi_{21} \quad (3.28)$$

$$\Phi_{12} = \frac{N_1}{\mathcal{R}} i_1 \quad (3.29)$$

$$\Phi_{21} = \frac{N_2}{\mathcal{R}} i_2 \quad (3.30)$$

Primer ve sekonder sargıların birbirlerine olan bu etkinin temsil edilebilmesi için karşıt endüktans kavramı ortaya konmuştur. Sekonder sargının primer sargıya olan etkisi için L_{12} , primer sargının sekonder sargıya olan etkisi için ise L_{21} karşıt endüktansları, (3.2) eşitliğine benzer şekilde, aşağıdaki gibi tanımlanır[1].

$$L_{12} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{i_1} \quad (3.31)$$

$$L_{21} = \frac{N_1 \Phi_{21}}{i_2} \quad (3.32)$$

(3.29) ve (3.30) eşitliklerindeki Φ_{12} ve Φ_{21} , (3.31) ve (3.32)'de yerine yazıldıklarında her iki sargının da karşıt endüktanslarının birbirine eşit oldukları görülür.

- $L_{12} = \frac{N_2}{i_1} \left(\frac{N_1}{\mathcal{R}} i_1 \right) = \frac{N_2 N_1}{\mathcal{R}}$
- $L_{21} = \frac{N_1}{i_2} \left(\frac{N_2}{\mathcal{R}} i_2 \right) = \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}}$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}} \quad (3.33)$$

Gerçekte transformatörler ideal olmadıklarından nüvenin relüktansı sıfır değildir ve bu nedenle nüvenin mıknatıslanmasına bir enerji harcanır. Bu harcanan enerjinin temsil edilebilmesi için ideal transformatör modeline bir mıknatıslama endüktansı ve mıknatıslama akımı ilave edilir. Nüvenin relüktansının sıfır olmaması durumunda transformatörün gerilim denklemleri (3.23), (3.25) ve (3.26)'ya göre aşağıdaki gibi olur.

$$v_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}} \frac{di_1}{dt} + \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}} \frac{di_2}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (3.34)$$

$$v_2 = \frac{N_2 N_1}{\mathcal{R}} \frac{di_1}{dt} + \frac{N_2^2}{\mathcal{R}} \frac{di_2}{dt} = L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (3.35)$$

Sargılardan geçen değişken akımlar nedeniyle oluşan değişken manyetik akılar, hem kendi sargılarında hem de karşı sargılarda bir emk indükler. L_1 ve L_2 , primer ve sekonder sargıların özendüktansları olup kendi sargılarında oluşan emk'leri temsil eder. $L_{12} = L_{21}$ ise karşıt endüktanslar olup karşı sargılarda oluşan emk'leri temsil eder.

(3.34) ve (3.35)'te verilen gerilim denklemleri, türev operatörü başa alınarak aşağıdaki formda yazılabilir.

$$v_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}} \frac{d}{dt} \left[i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \right] = L_{mp} \frac{di_{mp}}{dt} \quad (3.36)$$

$$v_2 = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}} \frac{d}{dt} \left[\frac{N_1}{N_2} i_1 + i_2 \right] = L_{ms} \frac{di_{ms}}{dt} \quad (3.37)$$

Buna göre mıknatıslama endüktansı ve mıknatıslama akımı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

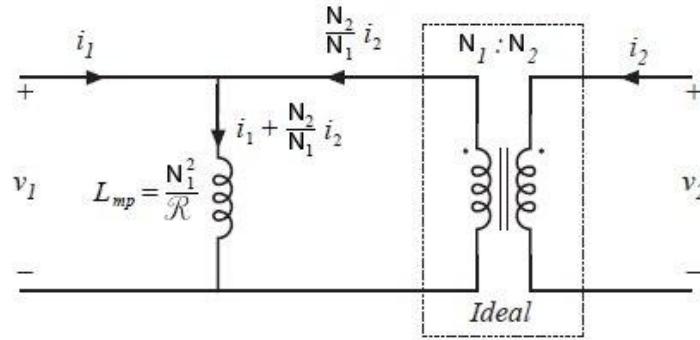
$$L_{mp} = L_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}} = \frac{N_1}{N_2} L_{12} \quad (3.38)$$

$$i_{mp} = i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (3.39)$$

$$L_{ms} = L_2 = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}} = \frac{N_2}{N_1} L_{21} \quad (3.40)$$

$$i_{ms} = \frac{N_1}{N_2} i_1 + i_2 \quad (3.41)$$

L_{mp} ve i_{mp} primere indirgenmiş mıknatıslama endüktansı ve akımı, L_{ms} ve i_{ms} ise sekondere indirgenmiş mıknatıslama endüktansı ve akımıdır. Sekonder sargı açık devre iken primer sargıdan geçen akım mıknatıslama akımıdır. Bu durumda primer sargı bir bobin gibi davranır. Bu nedenle mıknatıslama endüktansı gerçekte var olan fiziksel bir endüktanstır. Benzer şekilde primer sargı açık devre iken sekonder sargı da bir bobin olarak çalışır. Mıknatıslama endüktansı ve akımı primere indirgenmiş transformatör modeli Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3.12 Mıknatıslama endüktansı ve akımı primere indirgenmiş transformatör modeli [6]

3.3.3 Kaçak Endüktans

Manyetik devrelerde manyetik akının tamamının nüvenin içinde dolaştığı varsayılır. Aslında gerçekte bir miktar akı Şekil 3.13'teki gibi nüvenin dışından çevrimini tamamlar. Dolaşan bu akılar, kaçak akı olarak tanımlanır. Kaçak akıların temsili için transformatör modeline kaçak endüktans adı verilen endüktanslar eklenir. Kaçak endüktanslar eklenerek çizilen transformatör modeli Şekil 3.14'de görülmektedir. Buna göre transformatörün gerilim denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$v_1 = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (3.42)$$

$$v_2 = L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (3.43)$$

Burada L_{11} , primer sargının özendüktansı (L_1) ve primer tarafı temsil eden kaçak endüktansın (L_{l1}) toplamıdır. Benzer şekilde L_{22} de sekonder sargının toplam endüktansıdır. Buna göre L_{11} ve L_{22} aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$L_{11} = L_{l1} + L_1 \quad (3.44)$$

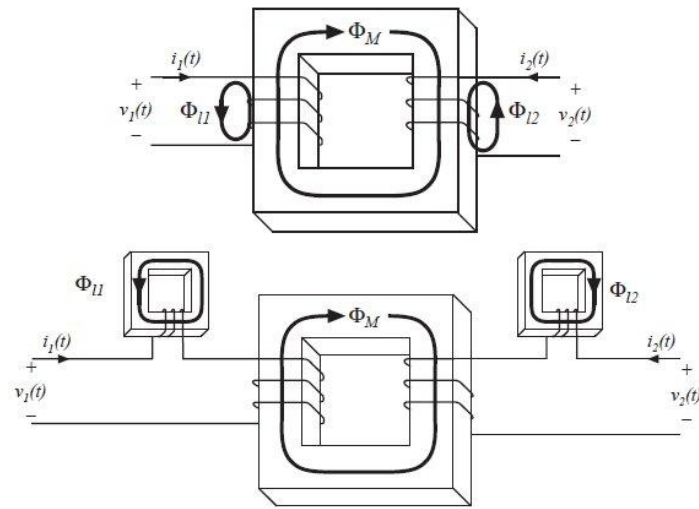
$$L_{22} = L_{l2} + L_2 \quad (3.45)$$

Buna göre transformatörün efektif sargı oranı ve kuplaj sabiti aşağıdaki gibi tanımlanır.

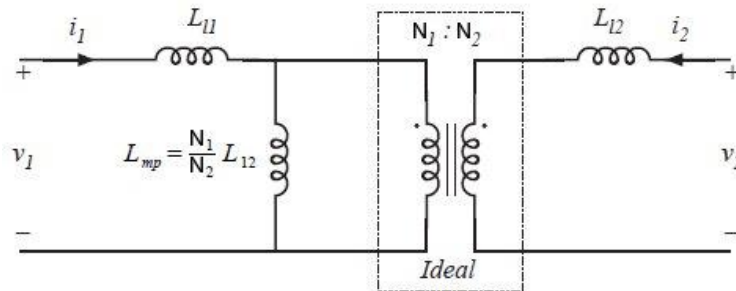
$$n_e = \sqrt{\frac{L_{22}}{L_{11}}} \quad (3.46)$$

$$k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} \quad (3.47)$$

Kuplaj sabiti transformatörün primer sargıyla sekonder sargı arasındaki manyetik bağın bir göstergesidir.



Şekil 3.13 Transformatörde nüvenin dışında dolaşan kaçak akıların modeli [6]



Şekil 3.14 Kaçak endüktans ilaveli transformatör modeli [6]

3.4 Manyetik Devrelerde Enerji

Şekil 3.3'deki gibi bir manyetik devre genellikle bir filtre bobini olarak adlandırılır. Bu devrede sargının bir endüktansı olduğu gibi sargıyı oluşturan iletkenin bir direnci de mevcuttur. Buna göre gerilim denklemi aşağıdaki gibidir.

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3.48)$$

Burada v sargıya dışarıdan uygulanan bir kaynak gerilimi, i sargıdan geçen akım, R sargının direnci, L ise sargının endüktansını belirtmektedir. (3.48)'in her iki tarafı i ile çarpılırsa devrenin güç dağılımı elde edilir.

$$vi = Ri^2 + Li \frac{di}{dt} \quad (3.49)$$

Bu eşitlikte vi kaynaktan çekilen gücü, Ri^2 dirençte harcanan gücü, $Li \frac{di}{dt}$ ise bobinde depo edilen gücü göstermektedir. Eğer bobinde depo edilen enerji U olarak tanımlanırsa aşağıdaki adımlar uygulanarak U elde edilir.

- $\frac{dU}{dt} = Li \frac{di}{dt} \Rightarrow dU = Lidi$
- $U = L \int_0^i idi$

$$U = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3.50)$$

3.5 Manyetik Devrelerde Kayıplar

Manyetik devrelerde kayıplar bakır ve nüve kayıpları olmak üzere ikiye ayrılır. Bakır kayıpları düşük frekanslarda sadece bakırın direncinden dolayı sargıların ısınmasıdır. Yüksek frekanslarda deri etkisi ve sargılarda meydana gelen girdap akımları nedeniyle yakınlık etkisi (proximity effect) ortaya çıkar. Nüve kayıpları ise histerezis kaybı ve girdap akımı kayıplarıdır.

3.5.1 Nüve Kayıpları

3.5.1.1 Histerezis Kaybı

Manyetik bir devrenin sargılarından geçen akımın değişken olması durumunda nüvenin mıknatıslanmasına harcanan enerji sabit bir akımın geçmesi durumuna göre daha fazladır. Bunun nedeni manyetik histerezis olayıdır. Buna göre sargılardan sabit bir akım geçtiğinde sadece nüvenin mıknatıslanması için enerji harcanırken, değişken bir akım geçtiğinde hem nüvenin mıknatıslanması için hem de akım değiştikçe nüvenin bir önceki mıknatıslanmış durumuna karşı konulması için enerji harcanır. Bu fazladan harcanan enerji histerezis kayıpları olarak tanımlanır.

Şekil 3.3'teki gibi manyetik bir devrede sargının R direnci ihmal edildiğinde gerilim denklemi (2.4) ve (2.7) yardımıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$v(t) = NA_c \frac{dB(t)}{dt} \quad (3.51)$$

Sargıdan geçen $i(t)$ değişken akımı da (3.7)'ye göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$i(t) = l_m \frac{H(t)}{N} \quad (3.52)$$

Manyetik devrede bir periyotta (T) harcanan enerji aşağıdaki gibidir.

$$W = \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (3.53)$$

(3.51) ve (3.52) eşitlikleri (3.53)'da yerine yazıldığında bir periyotta harcanan enerji aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$W = (A_c l_m) \int_{B_{min}}^{B_{max}} H dB \quad (3.54)$$

Bu durumda toplam histerezis kaybı bir periyotta harcanan enerjinin frekansla (f) çarpılmasıyla elde edilir. Histerezis kaybı uygulanan frekansla orantılıdır.

$$P_H = (f)(A_c l_m) \int_{B_{min}}^{B_{max}} H dB \quad (3.55)$$

Toplam histerezis kaybı, uygulanan gerilimin frekansına, nüvenin hacmine ve maksimum manyetik alana ($B - H$ eğrisinde ne kadar alanın kullanıldığına) bağlıdır. Histerezis kaybı deneysel olarak aşağıdaki gibi modellenir [6].

$$P_H = K_H f B_{max}^\alpha (A_c l_m) \quad (3.56)$$

Bu eşitlik Steinmetz eşitliği olarak bilinir. Eşitlikteki K_H ve α sabitleri deneysel olarak belirlenen sabitlerdir.

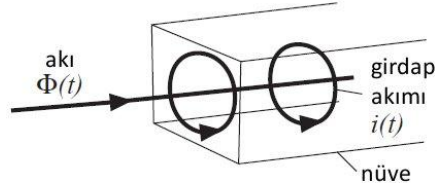
3.5.1.2 Girdap Akımı Kaybı

Manyetik devreleri oluşturan nüveler, bakır kadar olmasa da, iletken malzemelerdir. Bu nedenle sargılardan geçen AC bir akımın oluşturduğu değişken manyetik akı Faraday yasasına göre nüvenin içinde bir gerilim indükler. Bu gerilim nüvenin içinde Şekil 3.15'teki gibi girdap akımlarının dolaşmasına neden olur. Nüvede dolaşan girdap akımları nüvenin içinde bir manyetik akı oluşturur. Ancak bu akı Lenz kanununa göre nüvede dolaşan esas akıyı zayıflatma eğilimindedir.

Nüvede indüklenen gerilimin büyüklüğü doğrudan sargılara uygulanan AC gerilimin frekansıyla (f) orantılıdır. Nüvenin elektriksel direnci R ise nüve içinde oluşan girdap akımının büyüklüğü nüvedeki gerilimin büyüklüğüne bağlıdır ($i(t) = v(t)/R$). Bu yüzden girdap akımlarının büyüklüğü sargılara uygulanan AC gerilimin frekansıyla orantılıdır. Bu durumda girdap akımı nedeniyle oluşan güç kaybı $i^2(t)R$, sargılara uygulanan AC gerilimin frekansının karesiyle orantılıdır. Steinmetz eşitliğine göre girdap akımı güç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır[6].

$$P_E = K_E f^2 B_{max}^2 (\text{nüvenin hacmi}) \quad (3.57)$$

Burada K_E katsayısı deneysel olarak belirlenmiş bir sabittir. Ferit nüvelerinin empedansı kapasitif olduğundan bu nüvelerde girdap akımı kaybı frekansın dördüncü kuvveti (f^4) ile orantılıdır. Bu nedenle frekansın, ferit nüvelerde oluşan girdap akımları kaybına etkisi daha büyüktür [6].



Şekil 3.15 Nüvede oluşan girdap akımları [6]

3.5.2 Bakır Kayıpları

3.5.2.1 Düşük Frekanslarda Bakır Kaybı

Düşük frekanslarda ve DC gerilimde bakır iletkenlerde oluşan kayıp bakırın DC direncinden (R) dolayı meydana gelen kayıptır.

$$R = \rho \frac{l_b}{A_w} \quad (3.58)$$

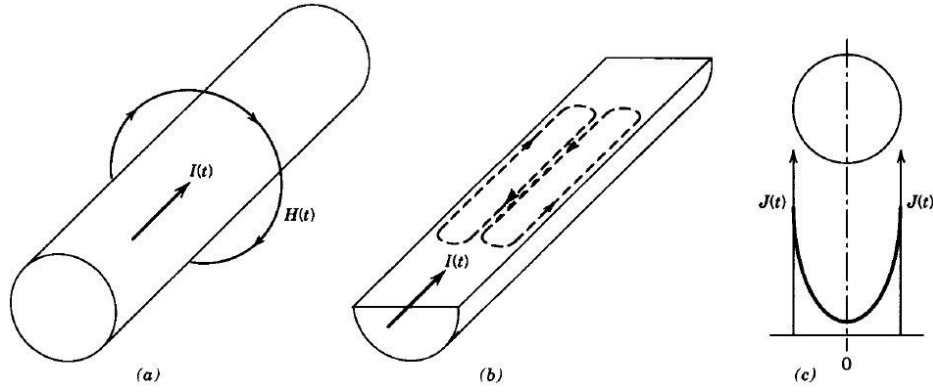
Burada A_w çıplak iletkenin kesiti, l_b iletkenin uzunluğu, ρ ise iletkenin özdirencidir. İletkenin özdirenci sıcaklığa bağlı bir büyüklüktür. ρ sıcaklık arttıkça artar. Oda sıcaklığında ($25^\circ C$) ρ $17,24 \times 10^{-9} \Omega m$ iken, $100^\circ C$ 'de $23 \times 10^{-9} \Omega m$ 'dir. İletkenin direncinde meydana gelen kayıp, iletkenin akım akarken açığa çıkan ısı nedeniyle oluşan kayıptır.

$$P_{Cu} = I_{rms}^2 R \quad (3.59)$$

Burada I_{rms} akımın efektif değeridir.

3.5.2.2 Yüksek Frekanslarda Bakır Kaybı, Deri Etkisi ve Yakınlık Etkisi

Zamanla değişen bir AC akım, iletken üzerinde deri etkisi adı verilen bir olaya neden olur. İletkenden geçen bir AC $i(t)$ akımı iletkenin etrafında Şekil 3.16(a)'daki gibi bir manyetik alan kuvveti oluşturur. Bu manyetik alan kuvveti nedeniyle iletkenin Şekil 3.16(b)'deki gibi girdap akımları indüklenir. Girdap akımları iletkenin merkezinde ana akımla zıt, iletkenin yüzeyinde ise ana akımla aynı yönlüdür. Bu nedenle iletkenin hacim akımı yoğunluğu Şekil 3.16(c)'deki gibi homojen değildir. Hacim akımı yoğunluğu iletkenin merkezinde minimum, iletkenin yüzeyinde ise maksimum değerdedir.



Şekil 3.16 a) İletkenden geçen AC akımın iletken çevresinde oluşturduğu manyetik alan kuvveti b) Oluşan manyetik alan kuvveti nedeniyle iletkenin içinde indüklenen girdap akımları c) Girdap akımları nedeniyle hacim akımı yoğunluğunun iletken içinde merkezden yüzeye doğru değişimi [7]

İletkenin yüzeyinde maksimum olan hacim akımı yoğunluğu merkeze doğru deri kalınlığı adı verilen mesafeyle üssel olarak azalır. Deri kalınlığı sinüzoidal akımlar için aşağıdaki gibi tanımlanır [6].

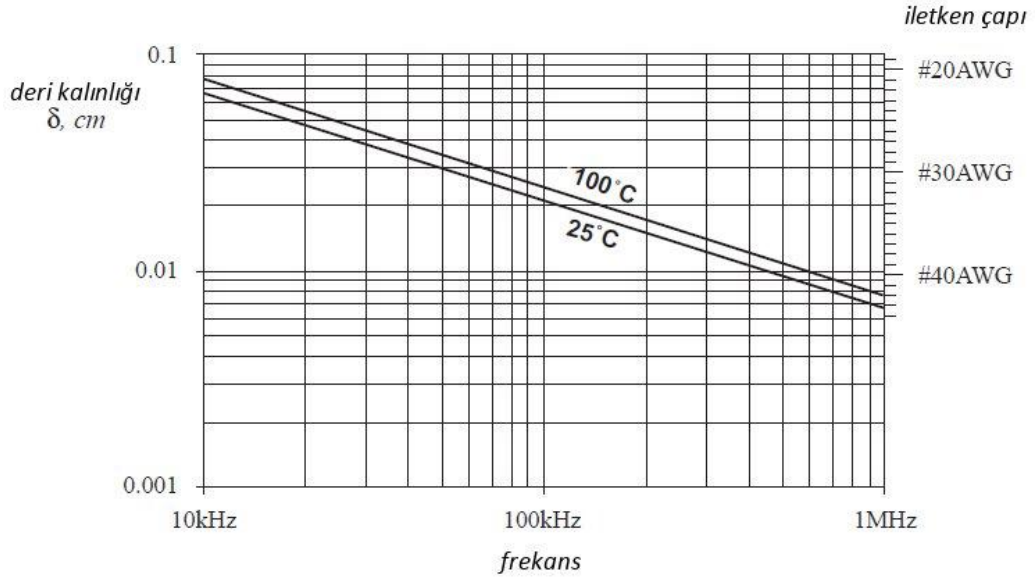
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} \quad (3.60)$$

Burada ρ iletkenin özdirenci, μ iletkenin manyetik geçirgenliği, f ise iletkenden geçen AC akımın frekansıdır. Oda sıcaklığında (25 °C) ve 100 °C'ta bakır iletken için deri kalınlığı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\delta = \frac{6,608}{\sqrt{f}} \text{ (cm)} \quad (25 \text{ °C'ta}) \quad (3.61)$$

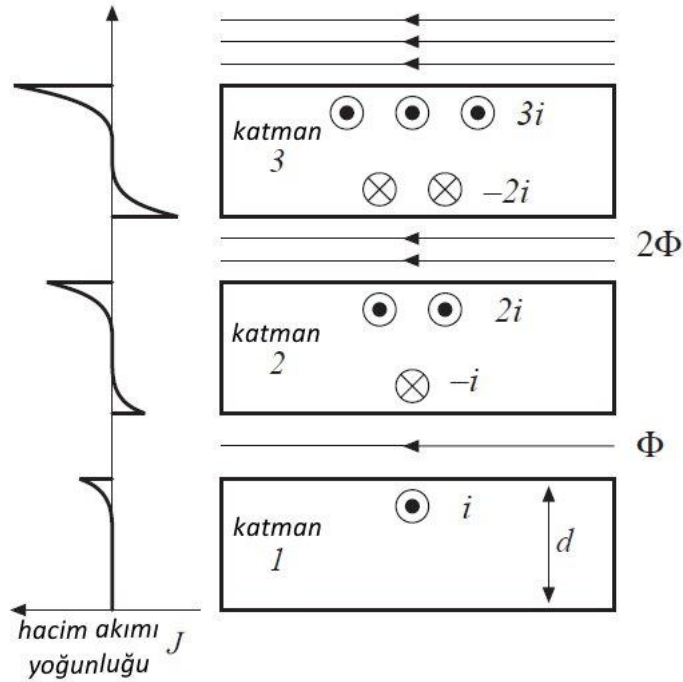
$$\delta = \frac{7,633}{\sqrt{f}} \text{ (cm)} \quad (100 \text{ °C'ta}) \quad (3.62)$$

(3.60)'a göre frekans arttıkça deri kalınlığı azalır. Sargıda kullanılan iletken kesitinin kalınlığı, deri kalınlığından çok büyükse iletken tarafından taşınan AC akımın büyük bir kısmı, yaklaşık olarak bir deri kalınlığında, iletkenin yüzeyinden akar [7]. Bu nedenle akımın aktığı etkin kesit alanı iletkenin geometrik kesit alanına göre çok daha küçük olup iletkenin etkin direnci, DC direncinden çok daha büyüktür. Bakır bir iletkenin deri kalınlığının frekansa göre değişimi Şekil 3.17'deki gibidir.



Şekil 3.17 Bakır iletkenin deri kalınlığının frekansa göre değişimi [6]

Yüksek frekanslarda sargılardan geçen AC akım, komşu sargılarda girdap akımları indükler. Bu durum yakınlık etkisi olarak bilinir. Yakınlık etkisi yüksek frekanslı transformatörlerin ve AC bobinlerin sargılarında ciddi güç kayıplarına neden olur [6]. Şekil 3.18'deki gibi çok katmanlı bir folyo sargıdaki iletken kalınlığı $d \gg \delta$ olup her bir katman net $i(t)$ akımı taşımaktadır.



Şekil 3.18 Her bir katmanı net $i(t)$ akımı taşıyan çok katmanlı folyo sargı [6]

Katmanlardaki güç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_1 = I_{rms}^2 \left(R_{dc} \frac{d}{\delta} \right) \quad (3.63)$$

$$P_2 = I_{rms}^2 \left(R_{dc} \frac{d}{\delta} \right) + (2I_{rms})^2 \left(R_{dc} \frac{d}{\delta} \right) = 5P_1 \quad (3.64)$$

$$P_3 = (2I_{rms})^2 \left(R_{dc} \frac{d}{\delta} \right) + (3I_{rms})^2 \left(R_{dc} \frac{d}{\delta} \right) = 13P_1 \quad (3.65)$$

Buna göre m. katmanın güç kaybı aşağıdaki gibidir.

$$P_m = [(m-1)^2 + m^2]P_1 \quad (3.66)$$

Buna göre yüksek frekanslarda M katmanlı bir folyo sargıda yakınlık etkisi nedeniyle her katmana eklenen ilave güç kaybı toplamı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{w,d \gg \delta} = \sum_{j=1}^M P_j = \frac{M}{3} (2M^2 + 1)P_1 \quad (3.67)$$

İletken kalınlığı $d = \delta$ olduğu durumda her bir katmanın DC bakır kaybı P_1 kadardır [6].

$$P_{w,dc,d=\delta} = MP_1 \quad (3.68)$$

İletken kalınlığı $d \neq \delta$ olduğu durumda DC direnç ve güç kaybı d/δ çarpanıyla değişir [6]. Toplam DC bakır kaybı aşağıdaki gibidir.

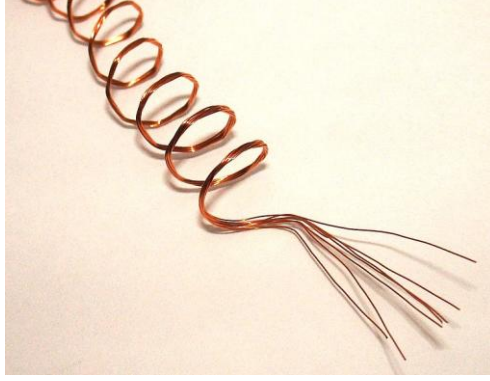
$$P_{w,dc} = MP_1 \frac{\delta}{d} \quad (3.69)$$

Sonuç olarak yüksek frekanslarda yakınlık etkisinin toplam bakır kaybını artırma faktörü aşağıdaki gibi tanımlanır [6].

$$F_{R,d \gg \delta} = \frac{P_{w,d \gg \delta}}{P_{w,dc}} = \frac{1}{3} \frac{d}{\delta} (2M^2 + 1) \quad (3.70)$$

Yuvarlak bir iletkenin çapı veya dikdörtgen bir iletkenin kalınlığı, deri kalınlığına eşit veya yakın değerlerde ise ($d \leq 2\delta$) deri etkisi ve sonuçları ihmal edilebilir [7]. Deri kalınlığı frekans arttıkça azaldığından yüksek frekanslı uygulamalarda kalın tek damarlı bir iletken yerine Litz teli veya kalınlığı ince olan folyo sargı kullanılır. Litz teli deri etkisini ve yakınlık etkisini azaltmak amacıyla çok sayıda, birbirinden yalıtılmış, ince

iletkenlerin birbirine örölmesiyle oluşturulmuş özel bir iletkendir [8]. Her bir iletken birebirinden yalıtılmış ve kalınlığı ince olduğundan deri kalınlığı ile arasındaki fark normal bir tele göre daha azdır. Bu nedenle deri etkisini azaltıcı rol oynar. Sekiz ince yalıtılmış bakır telin birbirine örölmesiyle oluşturulmuş bir Litz teli Şekil 3.19'daki gibidir.

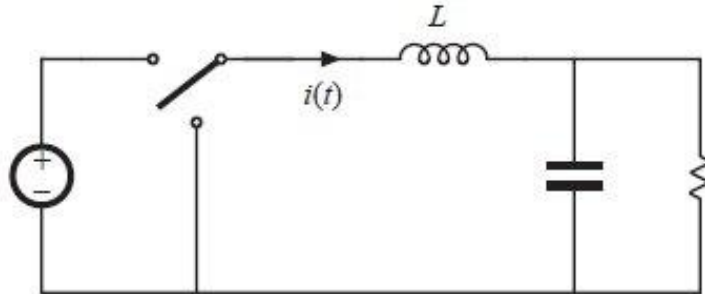


Şekil 3.19 Sekiz ince yalıtılmış bakır telden oluşmuş Litz teli [8]

ENDÜKTANS TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

4.1 Filtre Endüktans Tasarımı

Filtre endüktansı Şekil 4.1'deki gibi kesintisiz modda çalışan bir DC-DC düşürücü dönüştürücüde kullanılabilir. Böyle bir devrede kullanılacak olan endüktansın değeri L , nüve doyuma girmeden devreden geçecek olan maksimum akım I_{max} , izin verilen maksimum bakır kaybı P_{Cu} bilinen değerlerdir.



Şekil 4.1 DC-DC düşürücü dönüştürücü [6]

4.1.1 Filtre Endüktans Tasarımı Kriterleri

Şekil 4.1'deki devrede kullanılan filtre endüktansı Şekil 3.7'daki gibidir. Bu endüktansın manyetik denklemi (3.15)'te verilmiştir. Genellikle $\mathcal{R}_c \ll \mathcal{R}_g$ olduğundan nüvenin relüktansı $\mathcal{R}_c$ ihmal edilir.

$$Ni(t) = \Phi \mathcal{R}_g \quad (4.1)$$

Ayrıca kesintisiz modda çalışan DC-DC düşürücü dönüştürücüde akım dalgalanması çok fazla olmadığı için histerezis ve girdap akımları kayıpları ihmal edilebilir.

4.1.1.1 Kriter I, Maksimum Manyetik Alan (B_{max})

Verilen bir maksimum akım I_{max} değerine göre nüvede oluşan maksimum manyetik alan B_{max} 'ın değeri (2.4), (3.18) ve (4.1)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$B_{max} = NI_{max} \frac{\mu_o}{l_g} \quad (4.2)$$

Bu eşitlik birinci kriteri belirler. Burada sarım sayısı N ve hava aralığı uzunluğu l_g bilinmeyenlerdir.

4.1.1.2 Kriter II, Endüktans (L)

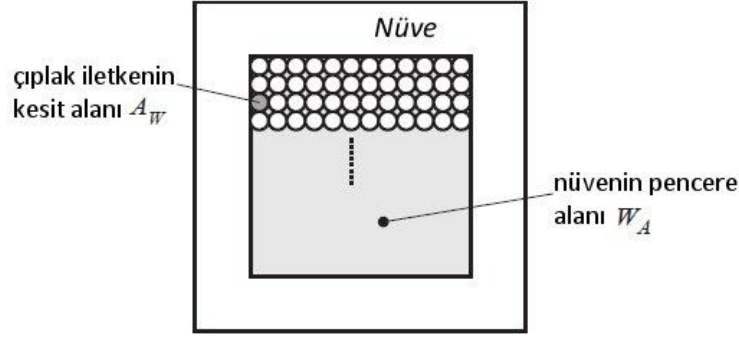
Hava aralıklı bir manyetik devrenin endüktansı (3.16) eşitliği ile hesaplanır. Ancak nüvenin relüktansı ihmal edildiğinden bu tasarımda endüktans (3.18) yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L = \frac{\mu_o A_c N^2}{l_g} \quad (4.3)$$

Bu eşitlik ikinci kriteri oluşturur. Burada sarım sayısı N , nüvenin kesit alanı A_c ve hava aralığı uzunluğu l_g bilinmeyenlerdir.

4.1.1.3 Kriter III, Sargı Alanı ($K_u W_A$)

Sargının sarıldığı alan, nüvenin pencere alanıdır. Bu alan seçilen nüvenin büyüklüğüne bağlıdır. Bu nedenle sarılacak sargı nüvenin pencere alanına sığdırılmalıdır. Nüvenin kesitsel görünümü Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Nüvenin kesitsel görünümü [6]

Sargının nüve içinde kapladığı alan, bir iletkenin kesit alanıyla sarım sayısının çarpımıdır (NA_W). Nüvede sargı için müsait olan alan, doluluk faktörüyle nüvenin pencere alanının çarpımıdır ($K_u W_A$). Doluluk faktörü K_u , nüvenin pencere alanının ne kadarının efektif olarak kullanıldığını gösteren bir katsayıdır. Değeri sıfır ile bir arasındadır. Doluluk faktörü yuvarlak kesitli iletkenlerin aralarında kalan boşluklar, iletkenin yalıtılması, sargı alanı için bobin kullanılması gibi etmenlerden dolayı azalır. Basit, düşük gerilimli bir devrede filtre endüktansı için $K_u = 0,5$ 'dir [6].

$$K_u W_A \geq NA_W \quad (4.4)$$

Bu eşitlik üçüncü kriterdir. Burada sarım sayısı N , iletkenin kesit alanı A_W ve nüvenin pencere alanı W_A bilinmeyenlerdir.

4.1.1.4 Kriter IV, Sargı Direnci

Manyetik bir devrede sargının DC bakır direnci (3.58) eşitliğiyle hesaplanır. Sargıdaki bakır iletkenin uzunluğu, sarım sayısı cinsinden hesaplanabilir. Bunun için nüveye bir sarım sarıldığında iletkenin uzunluğu, sarım başına iletken uzunluğu (MLT) (mean-length-per-turn) olarak tanımlanır. (MLT) seçilen nüvenin büyüklüğüne ve geometrik şekline göre değişkenlik gösterir. Sargıdaki bakır iletkenin uzunluğu (MLT) cinsinden aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$l_b = N(MLT) \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.5), (3.58)'de yerine yazıldığında dördüncü kriter elde edilir.

$$R = \rho \frac{N(MLT)}{A_w} \quad (4.6)$$

Burada sarım sayısı N , sarım başına iletken uzunluğu (MLT) ve iletkenin kesit alanı A_w bilinmeyenlerdir.

4.1.2 Kriterlerin Değerlendirilmesi ve Nüve Geometrik Sabiti (K_g)

Elde edilen dört kriterdeki büyüklüklere bakıldığında bir kısmının bilinen büyüklükler olduğu, bir kısmının seçilecek nüvenin geometrisine bağlı olduğu, bir kısmının da belirlenmesi gereken bilinmeyenler olduğu görülmektedir. Buna göre I_{max} , B_{max} , L ve R değerleri istenilen devrenin özelliklerine göre verilen değerler, μ_o ve ρ bilinen fiziksel değerler ve K_u da tasarlanacak endüktansa ve kullanılacak iletkenin cinsine göre belli bir değerdir. Seçilecek nüvenin geometrik özelliklerine göre değişkenlik gösteren büyüklükler A_c , W_A ve (MLT)'dir. Belirlenmesi gereken bilinmeyenler ise N , l_g ve A_w 'dir.

Nüve seçimi için dört kriterdeki bu üç bilinmeyen büyüklüklerin elenip, diğer büyüklükleri içeren tek bir denklem elde edilmelidir. Bu nedenle (4.2), (4.3), (4.4) ve (4.6)'daki kriterler aşağıdaki adımlarla düzenlenmiştir.

- $K_u W_A \geq N A_w$, $A_w = \rho \frac{N(MLT)}{R} \Rightarrow K_u W_A \geq \frac{N^2 \rho (MLT)}{R}$
- $N I_{max} = B_{max} \frac{l_g}{\mu_o} \Rightarrow l_g = \frac{N I_{max} \mu_o}{B_{max}}$
- $L = \frac{\mu_o A_c N^2}{l_g} \Rightarrow L = \frac{\mu_o A_c N^2 B_{max}}{N I_{max} \mu_o}$
- $N = \frac{L I_{max}}{B_{max} A_c} \Rightarrow N^2 = \frac{L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 A_c^2}$
- $K_u W_A \geq \frac{L^2 I_{max}^2 \rho (MLT)}{B_{max}^2 A_c^2 R}$

Elde edilen son denklemde, seçilecek nüvenin geometrik özelliklerine bağlı büyüklükler eşitsizliğin sol tarafına, diğer bilinen büyüklükler ise eşitsizliğin sağ tarafına toplanıp bilinen büyüklüklerle uygun nüve seçimi yapılır.

$$\frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_u} \quad (4.7)$$

(4.7) eşitsizliğinin sağ tarafındaki, seçilecek nüvenin geometrik özelliklerine bağlı büyüklükler, nüve geometrik sabiti (K_g) olarak tanımlanmıştır.

$$K_g = \frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} \quad (4.8)$$

Nüve geometrik sabiti, izin verilen bakır kaybı ve maksimum manyetik alan bilindiğinde, nüvenin efektif elektriksel boyutunu tanımlayan bir büyüklüktür. Nüve boyutu büyüdükçe A_c artacağından daha fazla nüve malzemesi harcanır veya W_A büyüdüğünden daha fazla bakır harcanır. Nüve boyutunu küçültmenin iki yolu vardır. Bunlardan birincisi B_{max} 'ı arttırmaktır. Bunun için daha büyük manyetik alanda doyuma giren, yani B_{sat} 'ı yüksek bir nüve seçilmelidir. İkinci yol ise R direncini arttırmaktır. R direncini arttırabilmek için daha yüksek bakır kaybına müsaade edilmelidir. Bilinen ferit nüveler için K_g değerleri Ek-A'da verilmiştir.

4.1.3 Tasarımda İzlenecek Yol

Tasarımda kullanılacak bilinen büyüklükler ve birimleri aşağıda belirtilmiştir.

- İletkenin öz direnci ρ (Ωcm)
- Maksimum sargı akımı I_{max} (A)
- Endüktans L (H)
- Sargı direnci R (Ω)
- Doluluk faktörü K_u
- Maksimum manyetik alan B_{max} (T)

Nüve boyutları cm cinsinden aşağıdaki gibi verilmiştir.

- Nüvenin kesit alanı A_c (cm^2)
- Nüvenin pencere alanı W_A (cm^2)
- Sarım başına iletken uzunluğu (MLT) (cm)

Diğer büyüklükler ve birimleri aşağıdaki gibidir.

- Hava aralığı uzunluğu l_g (m)
- Çıplak iletken kesiti A_w (cm^2)

Uzunluk ve alan ölçülerinde m ve m^2 yerine cm ve cm^2 kullanıldığından gerekli birim dönüşümü çarpanları tasarım denklemlerine eklenmelidir.

4.1.3.1 Nüve Boyutunun Belirlenmesi

Nüve boyutunun belirlenmesi için nüve geometrik sabitinin hesaplanması gerekir. Bunun için (4.7) ve (4.8)'den yararlanılır. Ancak (4.7) eşitsizliğine birim dönüşüm çarpanı eklenmelidir.

$$K_g = \frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_u} \cdot 10^8 \text{ (cm}^5\text{)} \quad (4.9)$$

Bu eşitsizliği sağlayan en küçük K_g değerine göre bir nüve seçilir. Bu adımdan sonra kullanılacak A_c , W_A ve (MLT) değerleri, seçilen nüveye ait değerler olacaktır.

4.1.3.2 Hava Aralığının Belirlenmesi

Hava aralığının diğer bilinen büyüklükler cinsinden belirlenmesi için (4.2) ve (4.3) eşitliklerinden yararlanılarak aşağıdaki adımlar uygulanır.

- $L = \frac{\mu_o A_c N^2}{l_g} \Rightarrow N^2 = \frac{L l_g}{\mu_o A_c}$
- $N I_{max} = B_{max} \frac{l_g}{\mu_o} \Rightarrow N^2 I_{max}^2 = B_{max}^2 \frac{l_g^2}{\mu_o^2}$
- $\frac{L l_g}{\mu_o A_c} I_{max}^2 = B_{max}^2 \frac{l_g^2}{\mu_o^2}$

$$l_g = \frac{\mu_o L I_{max}^2}{B_{max}^2 A_c} \quad (4.10)$$

Burada A_c (cm^2) ve hava aralığı uzunluğu (m) olarak istenildiğinden birim dönüşüm çarpanı (4.10) eşitliğine eklenmelidir.

$$l_g = \frac{\mu_o L I_{max}^2}{B_{max}^2 A_c} \cdot 10^4 \text{ (m)} \quad (4.11)$$

(4.11) eşitliğinden elde edilen değer yaklaşık değerdir. Çünkü hava aralığının kenarlarında oluşan akı ve diğer ideal olmayan durumlar ihmal edilmiştir [6].

4.1.3.3 Sarım Sayısının Belirlenmesi

Sarım sayısının bilinen büyüklükler cinsinden belirlenmesi için (4.2) ve (4.3) eşitliklerine aşağıdaki adımlar uygulanır.

- $NI_{max} = B_{max} \frac{l_g}{\mu_o} \Rightarrow l_g = \frac{NI_{max}\mu_o}{B_{max}}$
- $L = \frac{\mu_o A_c N^2}{l_g} \Rightarrow L = \frac{\mu_o A_c N^2 B_{max}}{NI_{max}\mu_o}$

$$N = \frac{LI_{max}}{B_{max}A_c} \quad (4.12)$$

Burada A_c (cm^2) cinsinden verildiğinden (4.12) eşitliğine birim dönüşüm çarpanı eklenmelidir.

$$N = \frac{LI_{max}}{B_{max}A_c} \cdot 10^4 \text{ (sarım)} \quad (4.13)$$

4.1.3.4 İletken Kesitinin Belirlenmesi

İletken kesiti (4.4) eşitsizliğine göre aşağıdaki gibi belirlenir.

$$A_w \leq \frac{K_u W_A}{N} \text{ (cm}^2\text{)} \quad (4.14)$$

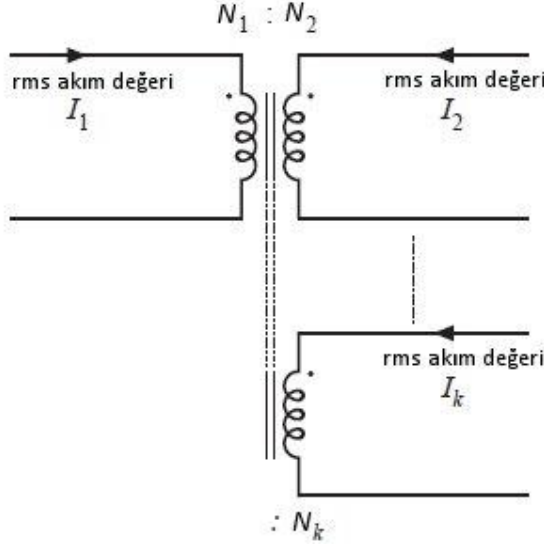
Ek-B'de Amerikan tel kalınlıkları listesi verilmiştir. Buna göre (4.14) eşitsizliğini sağlayan en büyük iletken kesiti listeden seçilir. İletken seçimi yapıldıktan sonra izin verilen bakır kaybının aşılmadığı kontrol edilmelidir.

4.2 K_g Yöntemi Kullanılarak Çok Sargılı Manyetik Devre Tasarımı

Geri dönüşlü dönüştürücü transformatörü veya kuplajlı endüktans gibi çok sargılı manyetik devrelerde K_g yönteminin uygulanabilmesi için bakır kayıplarının nüve kayıplarına göre çok daha baskın olması gerekir [6]. Bu gibi durumlarda tasarım yapılırken nüve kayıpları ihmal edilir. Ayrıca manyetik devredeki maksimum manyetik alan B_{max} belli olmalıdır. Bu şartlar sağlandığında K_g yöntemiyle tasarım gerçekleştirilebilir. Çok sargılı manyetik devrelerde sargıların hangi oranla pencere alanına dağılacağı bilinmelidir.

4.2.1 Sargıların Nüvenin Pencere Alanına Dağılımı

Şekil 4.3'teki gibi sargıların rms akım değerleri ve sarım sayısı oranları bilinen, k sargılı bir manyetik devre içeren uygulamalarda, k tane sargının nüvenin pencere alanı içindeki dağılımı belirlenmelidir.

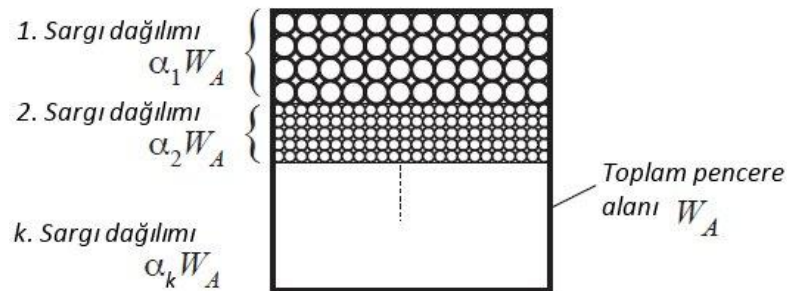


Şekil 4.3 k sargılı manyetik devre [6]

Bu manyetik devre için sargıların gerilimleri ve sarım sayıları arasındaki oran sabittir.

$$\frac{v_1(t)}{N_1} = \frac{v_2(t)}{N_2} = \dots = \frac{v_k(t)}{N_k} \quad (4.15)$$

Nüvenin pencere alanına hangi sargının hangi oranla sarılacağı toplam bakır kaybının minimize edilmesine bağlıdır. Bunun için α dağılım sabiti tanımlanmıştır. Şekil 4.4'te sargıların α 'ya göre nasıl dağıldığı gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Sargıların pencere alanına dağılımı [6]

Burada dağılım sabitlerinin toplamı bire eşit olup herhangi bir sargının (j.) dağılım sabitinin değeri sıfırla bir arasındadır.

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k = 1 \quad (4.16)$$

$$0 < \alpha_j < 1 \quad (4.17)$$

4.2.1.1 Sargılardaki Bakır Kayıpları

Sargıların bakır kayıpları hesaplanırken yakınlık etkisi ihmal edilmiştir. Herhangi bir sargının DC direncinden dolayı meydana gelen bakır kaybı, dağılım sabitini de içerecek şekilde, aşağıdaki adımlar uygulanarak hesaplanır.

- $P_{Cu,j} = I_j^2 R_j$
- $R_j = \rho \frac{l_j}{A_{W,j}}$
- $l_j = N_j(MLT)$
- $A_{W,j} = \frac{W_A K_u \alpha_j}{N_j}$

$$R_j = \rho \frac{N_j^2 (MLT)}{W_A K_u \alpha_j} \quad (4.18)$$

$$P_{Cu,j} = \frac{N_j^2 I_j^2 \rho (MLT)}{W_A K_u \alpha_j} \quad (4.19)$$

4.2.1.2 Toplam Bakır Kaybının Hesaplanması ve Minimize Edilmesi

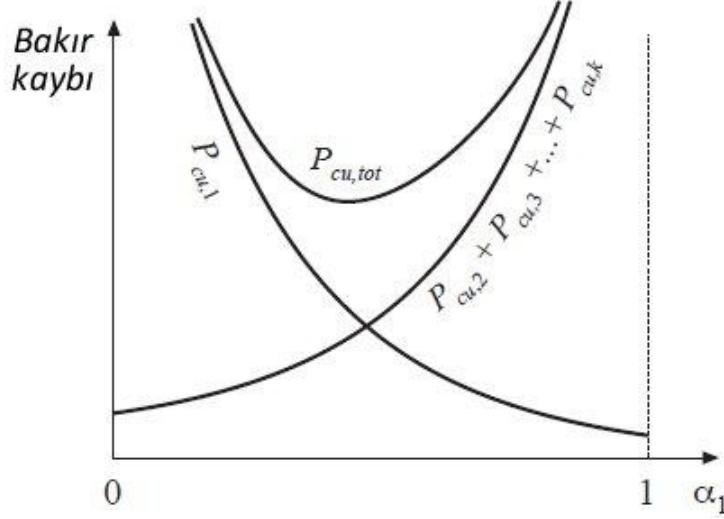
Manyetik devredeki tüm sargıların toplam bakır kaybı, ayrı ayrı sargıların bakır kayıplarının toplamına eşittir. k tane sargı için toplam bakır kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{Cu,tot} = P_{Cu,1} + P_{Cu,2} + \dots + P_{Cu,k} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \sum_{j=1}^k \left(\frac{N_j^2 I_j^2}{\alpha_j} \right) \quad (4.20)$$

(4.20) eşitliğindeki $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ değerleri toplam bakır kaybı minimum olacak şekilde belirlenmelidir. α_1 'e göre birinci sargının, diğer sargıların ve toplam bakır kayıplarının değişimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. (4.19) eşitliğine göre $\alpha_1 = 0$ için birinci sargının alanı sıfır olacağından $P_{Cu,1}$ sonsuza yaklaşır, $\alpha_1 = 1$ için geriye kalan sargıların alanı sıfır olacağından bunların bakır kayıpları sonsuza yaklaşır. Buna göre toplam bakır kaybının minimum olacağı α_1 değeri seçilmelidir. Toplam bakır kaybının minimize edilmesi için Lagrange çarpanları yöntemi kullanılarak aşağıdaki adımlar uygulanır.

- $f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi) = P_{cu,tot}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k) + \xi g(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$
- $g(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k) = 1 - \sum_{j=1}^k \alpha_j$
- $f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi) = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \sum_{j=1}^k \left(\frac{N_j^2 I_j^2}{\alpha_j} \right) + \xi - \xi \sum_{j=1}^k \alpha_j$

Burada ξ Lagrange çarpanıdır.



Şekil 4.5 α_1 'e göre sargıların bakır kayıplarının değişimi [6]

Toplam bakır kaybını minimum yapan α değerlerinin tespiti için $f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi)$ fonksiyonunun k tane sargı için $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 'ya göre kısmi türevlerinin sıfıra eşitlenerek çözülmesi gerekir.

- $\frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi)}{\partial \alpha_1} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \left(-\frac{N_1^2 I_1^2}{\alpha_1^2} \right) - \xi = 0 \Rightarrow \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \left(\frac{N_1^2 I_1^2}{\alpha_1^2} \right) = -\xi$
- $\frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi)}{\partial \alpha_2} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \left(-\frac{N_2^2 I_2^2}{\alpha_2^2} \right) - \xi = 0 \Rightarrow \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \left(\frac{N_2^2 I_2^2}{\alpha_2^2} \right) = -\xi$
- $\vdots$
- $\frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi)}{\partial \alpha_k} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \left(-\frac{N_k^2 I_k^2}{\alpha_k^2} \right) - \xi = 0 \Rightarrow \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \left(\frac{N_k^2 I_k^2}{\alpha_k^2} \right) = -\xi$
- $\frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi)}{\partial \xi} = 1 - \sum_{j=1}^k \alpha_j = 0 \Rightarrow \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k = 1$
- $\frac{N_1 I_1}{\alpha_1} = \frac{N_2 I_2}{\alpha_2} = \dots = \frac{N_k I_k}{\alpha_k}$
- $N_1 I_1 \alpha_2 = N_2 I_2 \alpha_1$
- $N_1 I_1 \alpha_3 = N_3 I_3 \alpha_1$
- $\vdots$
- $N_1 I_1 \alpha_k = N_k I_k \alpha_1$

- $N_1 I_1 (\alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_k) = \alpha_1 (N_2 I_2 + N_3 I_3 + \dots + N_k I_k)$
- $N_1 I_1 (1 - \alpha_1) = \alpha_1 (N_2 I_2 + N_3 I_3 + \dots + N_k I_k)$
- $N_1 I_1 - N_1 I_1 \alpha_1 = \alpha_1 (N_2 I_2 + N_3 I_3 + \dots + N_k I_k)$
- $\alpha_1 = \frac{N_1 I_1}{N_1 I_1 + N_2 I_2 + N_3 I_3 + \dots + N_k I_k}$
- $\alpha_1 = \frac{N_1 I_1}{\sum_{j=1}^k N_j I_j}$
- $\alpha_2 = \frac{N_2 I_2}{\sum_{j=1}^k N_j I_j}$
- $\vdots$
- $\alpha_k = \frac{N_k I_k}{\sum_{j=1}^k N_j I_j}$

$$\alpha_m = \frac{N_m I_m}{\sum_{j=1}^k N_j I_j}, m = 1, 2, 3, \dots, k \quad (4.21)$$

Toplam bakır kaybını minimum yapan α değerlerinin bulunmasının ardından bu değerler (4.20)'de yerine konularak minimum toplam bakır kaybı hesaplanır.

- $P_{Cu,tot,min} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \left(\frac{\frac{N_1^2 I_1^2}{N_1 I_1}}{\sum_{j=1}^k N_j I_j} + \frac{\frac{N_2^2 I_2^2}{N_2 I_2}}{\sum_{j=1}^k N_j I_j} + \dots + \frac{\frac{N_k^2 I_k^2}{N_k I_k}}{\sum_{j=1}^k N_j I_j} \right)$
- $P_{Cu,tot,min} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} [(N_1 I_1)(\sum_{j=1}^k N_j I_j) + (N_2 I_2)(\sum_{j=1}^k N_j I_j) + \dots + N_k I_k \sum_{j=1}^k N_j I_j]$
- $P_{Cu,tot,min} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} (\sum_{j=1}^k N_j I_j) (N_1 I_1 + N_2 I_2 + \dots + N_k I_k)$

$$P_{Cu,tot,min} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} (\sum_{j=1}^k N_j I_j)^2 \quad (4.22)$$

Eşitlik (4.15)'e göre her bir sargının dağılım sabiti aşağıdaki gibi de yazılabilir.

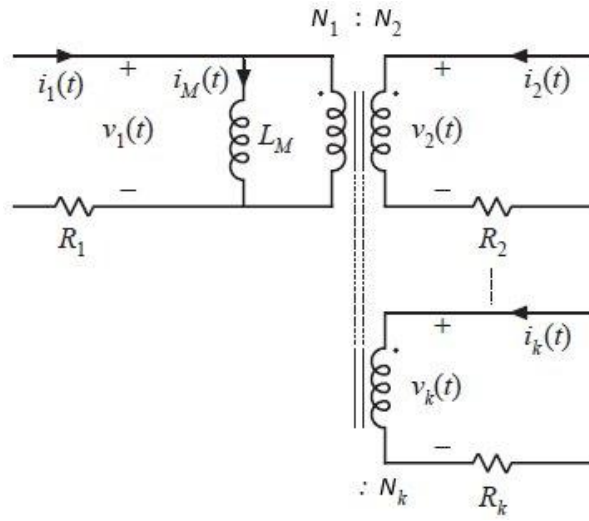
$$\alpha_m = \frac{V_m I_m}{\sum_{j=1}^k V_j I_j}, m = 1, 2, 3, \dots, k \quad (4.23)$$

(4.23) eşitliğine göre sargıların dağılımı, her bir sargının gücüne göre gerçekleştirilmiştir.

4.2.2 Çok Sargılı Manyetik Devre Tasarımı Kriterleri

Şekil 4.6'daki gibi k sargılı kuplajlı endüktans tasarlanırken primere indirgenmiş mıknatıslama endüktansının değeri, sarım sayılarının oranı ve toplam bakır kaybı belirlenmelidir. Ayrıca primere indirgenmiş mıknatıslama akımı diğer sargı akımları cinsinden ifade edilmelidir. (3.39) eşitliğine göre k sargılı bir manyetik devre için primere indirgenmiş mıknatıslama akımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

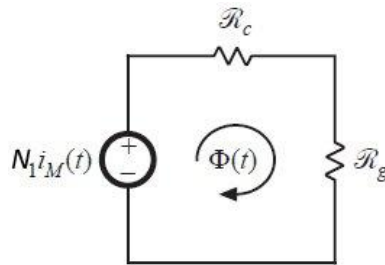
$$i_M(t) = i_1(t) + \frac{N_2}{N_1} i_2(t) + \frac{N_3}{N_1} i_3(t) + \dots + \frac{N_k}{N_1} i_k(t) \quad (4.24)$$



Şekil 4.6 k sargılı kuplajlı endüktans [6]

4.2.2.1 Kriter I, Maksimum Manyetik Alan (B_{max})

Çok sargılı manyetik devrede nüvenin içinde dolaşan akıyı oluşturan akım, mıknatıslama akımıdır. Primere indirgenmiş mıknatıslama endüktansı ve akımıyla hesaplar yapılıyorsa primer sargının sarım sayısı kullanılır. Buna göre Şekil 4.6'daki k sargıdan oluşan kuplajlı endüktansın manyetik eşdeğer devresi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 k sargılı bir kuplajlı endüktansın manyetik eşdeğer devresi [6]

Burada da $\mathcal{R}_c \ll \mathcal{R}_g$ olduğundan nüvenin relüktansı ihmal edilir. Buna göre manyetik denklem aşağıdaki gibidir.

$$N_1 i_M(t) = \Phi(t) \mathcal{R}_g \quad (4.25)$$

Maksimum manyetik alan değeri B_{max} doğrudan mıknatıslama akımının maksimum değerine bağlıdır. Maksimum manyetik alan (2.4), (3.18) ve (4.25) eşitliklerine göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$B_{max} = N_1 I_{M,max} \frac{\mu_o}{l_g} \quad (4.26)$$

4.2.2.2 Kriter II, Mıknatıslama Endüktansı (L_M)

Nüvenin relüktansı ihmal edilmiş hava aralıklı manyetik bir devrenin endüktansı (4.3) eşitliği ile hesaplanır. Buna göre primere indirgenmiş mıknatıslama endüktansı, primer sarım sayısı dikkate alınarak (3.18) ve (3.38)'e göre aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$L_M = N_1^2 \frac{\mu_o A_c}{l_g} \quad (4.27)$$

4.2.2.3 1Kriter III, Minimum Toplam Bakır Kaybı ($P_{Cu,tot,min}$)

Minimum toplam bakır kaybı (4.22)'ye göre hesaplanır. Ancak burada, mıknatıslama endüktansı ve akımı primere indirgendiğinden, aşağıdaki adımlar uygulanarak minimum toplam bakır kaybı, primer sarım sayısı ve primere indirgenmiş toplam akım cinsinden yeniden düzenlenmelidir.

- $P_{Cu,tot,min} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} (N_1 I_1 + N_2 I_2 + \dots + N_k I_k)^2$
- $P_{Cu,tot,min} = \frac{\rho(MLT)}{W_A K_u} \left[N_1 \left(I_1 + \frac{N_2}{N_1} I_2 + \dots + \frac{N_k}{N_1} I_k \right) \right]^2$
- $I_{tot} = I_1 + \frac{N_2}{N_1} I_2 + \dots + \frac{N_k}{N_1} I_k = \sum_{j=1}^k \frac{N_j}{N_1} I_j$

$$P_{Cu,tot,min} = \frac{\rho(MLT) N_1^2 I_{tot}^2}{W_A K_u} \quad (4.28)$$

4.2.3 Kriterlerin Değerlendirilmesi ve Nüve Geometrik Sabiti (K_g)

Elde edilen üç kriterden bilinmeyenler l_g ve N_1 elenerek, diğer bilinen büyüklükler ve seçilecek nüvenin geometrik özelliklerine bağlı büyüklüklerden oluşan tek bir denklem elde etmek için aşağıdaki adımlar uygulanır.

- $N_1 I_{M,max} = B_{max} \frac{l_g}{\mu_o} \Rightarrow l_g = \frac{N_1 I_{M,max} \mu_o}{B_{max}}$
- $L_M = N_1^2 \frac{\mu_o A_c}{l_g} = \frac{N_1^2 \mu_o A_c}{\frac{N_1 I_{M,max} \mu_o}{B_{max}}} \Rightarrow N_1 = \frac{L_M I_{M,max}}{B_{max} A_c}, N_1^2 = \frac{L_M^2 I_{M,max}^2}{B_{max}^2 A_c^2}$
- $P_{Cu,tot,min} = \frac{\rho(MLT) I_{tot}^2 L_M^2 I_{M,max}^2}{W_A K_u B_{max}^2 A_c^2}$

$$K_g = \frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} \geq \frac{\rho L_M^2 I_{tot}^2 I_{M,max}^2}{K_u B_{max}^2 P_{Cu,tot,min}} \quad (4.29)$$

Çok sargılı manyetik devrede nüve geometrik sabiti K_g , tek sargılı endüktansta olduğu gibi nüvenin geometrik özelliklerini belirten bir değerdir. Bilinen ferit nüveler için K_g değerleri Ek-A'da verilmiştir.

4.2.4 Tasarımda İzlenecek Yol

Tasarımda kullanılacak bilinen büyüklükler ve birimleri aşağıda belirtilmiştir.

- İletkenin öz direnci ρ (Ωcm)
- Toplam rms sargı akımları I_{tot} (A) (Primere indirgenmiş)
- Maksimum mıknatıslama akımı $I_{M,max}$ (A) (Primere indirgenmiş)
- Mıknatıslama endüktansı L_M (H) (Primere indirgenmiş)
- İstenilen sargı oranları $N_2/N_1, N_3/N_1, \dots, N_k/N_1$
- Minimum toplam bakır kaybı $P_{Cu,tot,min}$ (W)
- Doluluk faktörü K_u
- Maksimum manyetik alan B_{max} (T)

Nüve boyutları cm cinsinden aşağıdaki gibi verilmiştir.

- Nüvenin kesit alanı A_c (cm^2)
- Nüvenin pencere alanı W_A (cm^2)
- Sarım başına iletken uzunluğu (MLT) (cm)

Diğer büyüklükler ve birimleri aşağıdaki gibidir.

- Hava aralığı uzunluğu l_g (m)
- Çıplak iletken kesitleri $A_{w1}, A_{w2}, \dots, A_{wk}$ (cm²)

Uzunluk ve alan ölçülerinde m ve m^2 yerine cm ve cm^2 kullanıldığından gerekli birim dönüşümü çarpanları tasarım denklemlerine eklenmelidir.

4.2.4.1 Nüve Boyutunun Belirlenmesi

Nüve boyutunun belirlenmesi için nüve geometrik sabitinin hesaplanması gerekir. Bunun için (4.29) eşitliğine birim dönüşüm çarpanı eklenmelidir.

$$K_g = \frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} \geq \frac{\rho L_M^2 I_{M,max}^2}{K_u B_{max}^2 P_{Cu,tot,min}} \cdot 10^8 \text{ (cm}^5\text{)} \quad (4.30)$$

Bu eşitsizliği sağlayan en küçük K_g değerine göre nüve seçimi yapılır. Bu adımdan sonra kullanılacak A_c , W_A ve (MLT) değerleri, seçilen nüveye ait değerler olacaktır.

4.2.4.2 Hava Aralığının Belirlenmesi

Hava aralığının diğer bilinen büyüklükler cinsinden belirlenmesi için (4.26) ve (4.27) eşitliklerinden yararlanılarak aşağıdaki adımlar uygulanır.

- $L_M = N_1^2 \frac{\mu_o A_c}{l_g} \Rightarrow N_1^2 = \frac{L_M l_g}{\mu_o A_c}$
- $N_1 I_{M,max} = B_{max} \frac{l_g}{\mu_o} \Rightarrow N_1^2 I_{M,max}^2 = B_{max}^2 \frac{l_g^2}{\mu_o^2}$
- $\frac{L_M l_g}{\mu_o A_c} I_{M,max}^2 = B_{max}^2 \frac{l_g^2}{\mu_o^2}$

$$l_g = \frac{\mu_o L_M I_{M,max}^2}{B_{max}^2 A_c} \quad (4.31)$$

Burada A_c (cm²) ve hava aralığı uzunluğu (m) olarak istendiğinden birim dönüşüm çarpanı (4.31) eşitliğine eklenmelidir.

$$l_g = \frac{\mu_o L_M I_{M,max}^2}{B_{max}^2 A_c} \cdot 10^4 \text{ (m)} \quad (4.32)$$

(4.32) eşitliğinden elde edilen değer yaklaşık değerdir. Çünkü hava aralığının kenarlarında oluşan akı ve diğer ideal olmayan durumlar ihmal edilmiştir [6].

4.2.4.3 Sarım Sayılarının Belirlenmesi

Öncelikle primer sargının sarım sayısı belirlenmelidir. Bunun için (4.26) ve (4.27) eşitliklerine aşağıdaki adımlar uygulanır.

- $N_1 I_{M,max} = B_{max} \frac{l_g}{\mu_o} \Rightarrow l_g = \frac{N_1 I_{M,max} \mu_o}{B_{max}}$
- $L_M = N_1^2 \frac{\mu_o A_c}{l_g} \Rightarrow L_M = \frac{\mu_o A_c N_1^2 B_{max}}{N_1 I_{M,max} \mu_o}$

$$N_1 = \frac{L_M I_{M,max}}{B_{max} A_c} \quad (4.33)$$

Burada A_c (cm^2) cinsinden verildiğinden (4.33) eşitliğine birim dönüşüm çarpanı eklenmelidir.

$$N_1 = \frac{L_M I_{M,max}}{B_{max} A_c} \cdot 10^4 \text{ (sarım)} \quad (4.34)$$

Primer sargının sarım sayısı belirlendikten sonra diğer sargıların sarım sayıları istenilen sargı oranlarına göre hesaplanır.

$$N_n = \left(\frac{N_n}{N_1} \right) N_1 \text{ (sarım)}, n = 2, 3, \dots, k \quad (4.35)$$

4.2.4.4 Dağılım Sabitlerinin Belirlenmesi ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$)

Her bir sargının dağılım sabit (4.21)'e göre belirlenir. Dağılım sabitlerini primer sargı sarım sayısı ve primere indirgenmiş toplam akım cinsinden hesaplanması için aşağıdaki adımlar uygulanır.

- $\alpha_m = \frac{N_m I_m}{N_1 I_1 + N_2 I_2 + N_3 I_3 + \dots + N_k I_k}$
- $\alpha_m = \frac{N_m I_m}{N_1 \left(I_1 + \frac{N_2}{N_1} I_2 + \frac{N_3}{N_1} I_3 + \dots + \frac{N_k}{N_1} I_k \right)}$

$$\alpha_m = \frac{N_m I_m}{N_1 I_{tot}}, m = 1, 2, 3, \dots, k \quad (4.36)$$

4.2.4.5 İletken Kesitlerinin Belirlenmesi

Herhangi bir sargının iletken kesitinin hesaplanması için, (4.14) eşitsizliğinin payına dağılım sabiti çarpan olarak eklenmelidir. Çünkü her sargı kendi dağılım sabitinin belirlediği oranda pencere alanına sarılır. Buna göre sargıların iletken kesitleri aşağıdaki eşitsizliğe göre belirlenir.

$$A_{Wm} \leq \frac{\alpha_m K_u W_A}{N_m}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, k \quad (4.37)$$

Ek-B'de Amerikan tel kalınlıkları listesi verilmiştir. Buna göre (4.37) eşitsizliğini sağlayan en büyük iletken kesitleri listeden seçilir. İletkenlerin seçimi yapıldıktan sonra izin verilen toplam bakır kaybının aşılmadığı kontrol edilmelidir.

4.3 Transformatör Tasarımı

Transformatör tasarımı, filtre endüktansı ve çok sargılı kuplajlı endüktans tasarımından farklı olarak sadece bakır kaybına göre değil nüve ve bakır kayıplarının toplamı dikkate alınarak yapılır. Bu tasarımda maksimum manyetik alanın önceden belirlenmiş bir değeri yoktur, aksine toplam kaybı minimize edecek manyetik alan hesaplanır. Transformatör tasarımında endüktans değerinin bir önemi yoktur. Transformatörde önemli olan, uygulama şartlarına göre nüve doyuma girmeden, bir sargıdan diğerine enerjinin minimum kayıpla aktarılmasıdır. k sargılı bir transformatör Şekil 4.6'daki k sargılı kuplajlı endüktans gibidir. Aralarındaki tek fark transformatörde hava aralığı bulunmayışıdır.

4.3.1 Transformatör Tasarımı Kriterleri

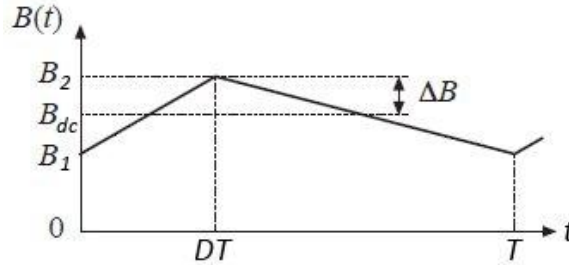
Öncelikle nüve kaybının (P_{fe}), manyetik alan değişiminin (ΔB) ve bakır kaybının (P_{cu}) nelere bağlı olduğu belirlenir. Toplam kaybı minimize edecek optimum manyetik alan değişimi bulunur. Daha sonra transformatöre özgü nüve geometrik sabiti (K_{gfe}) belirlenerek nüve seçimi yapılır. Nüve seçiminin ardından manyetik alan değişimi, sarım sayısı, iletken kesiti gibi bilinmeyenler hesaplanır.

4.3.1.1 Kriter I, Nüve Kaybı (P_{fe})

Nüve kayıplarını histerezis ve nüvedeki girdap akımları kayıplarının toplamı oluşturur. Toplam nüve kaybının hesabı için deneysel olarak belirlenmiş eşitlik aşağıdaki gibidir.

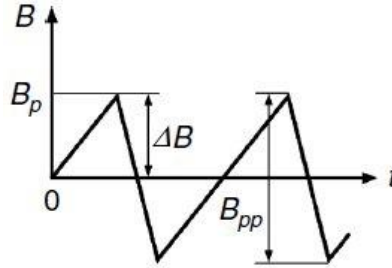
$$P_{fe} = K_{fe}(\Delta B)^\beta A_c l_m \quad (4.38)$$

Burada K_{fe} katsayısı ve β üssel katsayısı deneysel sabitlerdir. K_{fe} 'nin frekansa göre değişen değeri nüve katalogunda verilir. β 'nin ise ferit nüve için tipik değeri 2.6 veya 2.7'dir[6]. ΔB , dalgalanan manyetik alanın üst tepe değeri ile alt tepe değeri arasındaki farkın yarısına eşittir ($\Delta B = (B_2 - B_1)/2$). Şekil 4.8'de B_{dc} değeri üzerinde dalgalanan bir manyetik alan gösterilmiştir.



Şekil 4.8 B_{dc} değeri üzerinde dalgalanan bir manyetik alan

Şekil 4.9'daki gibi simetrik dalga şekilleri için ΔB , AC manyetik alanın tepe değeri B_p 'ye eşittir[4]. B_{pp} AC manyetik alanın tepeden tepeye değeridir.



Şekil 4.9 Simetrik bir AC manyetik alanın dalga şekli

4.3.1.2 Kriter II, Manyetik Alan Değişimi (ΔB)

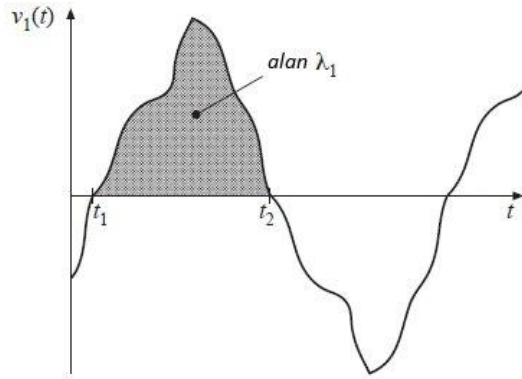
Faraday yasasına göre manyetik akı $\Phi(t)$ ve manyetik alan $B(t)$ primer sargıya uygulanan gerilime bağlıdır. Şekil 4.10'daki $v_1(t)$ geriliminin pozitif kısmı süresince primer sargıya uygulanan volt-saniye λ_1 olarak tanımlanır. λ_1 aynı zamanda $v_1(t)$ geriliminin pozitif kısmının alanına eşittir. Buna göre λ_1 aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\lambda_1 = \int_{t_1}^{t_2} v_1(t) dt \quad (4.39)$$

$v_1(t)$ geriliminin pozitif kısmı süresince AC manyetik akı, negatif tepe değerinden $(-\Phi_p)$ pozitif tepe değerine (Φ_p) kadar değiştiğinden AC manyetik alan da negatif tepe değerinden $(-B_p)$ pozitif tepe değerine (B_p) kadar değişir. Uygulanan dalga şekli simetrik olduğundan B_p değeri, ΔB 'ye eşittir. Buna göre aşağıdaki adımlar uygulanarak manyetik alan değişimi ΔB , volt-saniye cinsinden belirlenir.

- $v_1(t) = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ (Faraday yasası)
- $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = A_c B_1$ (Gauss yasası)
- $N_1 A_c dB = v_1(t) dt$
- $N_1 A_c \int_{B_1}^{B_2} dB = \int_{t_1}^{t_2} v_1(t) dt$
- $\lambda_1 = \int_{t_1}^{t_2} v_1(t) dt$
- $N_1 A_c [B_p - (-B_p)] = \lambda_1 \Rightarrow \lambda_1 = 2N_1 A_c B_p$

$$B_p = \Delta B = \frac{\lambda_1}{2N_1 A_c} \quad (4.40)$$



Şekil 4.10 Birinci sargıya uygulanan gerilim [6]

4.3.1.3 Kriter III, Minimum Bakır Kaybı ($P_{cu,tot,min}$)

Primer sargının sarım sayısı (4.40) eşitliğine göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$N_1 = \frac{\lambda_1}{2(\Delta B)A_c} \quad (4.41)$$

(4.41) eşitliğindeki primer sargı sarım sayısı (4.28)'de yerine yazıldığında minimum toplam bakır kaybı, ΔB cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{Cu,tot,min} = \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right) \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2} \right) \left(\frac{1}{\Delta B} \right)^2 \quad (4.42)$$

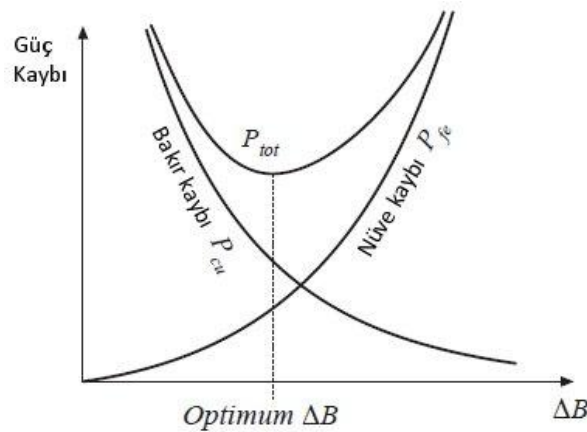
Eşitlik (4.42)'ye göre ΔB arttıkça bakır kaybı hızlı bir şekilde azalır [6].

4.3.1.4 Kriter IV, Toplam Güç Kaybı (P_{tot})

Toplam güç kaybı, nüve kaybı ve minimum bakır kaybının toplamına eşittir.

$$P_{tot} = P_{fe} + P_{Cu,tot,min} = K_{fe}(\Delta B)^\beta A_c l_m + \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right) \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2} \right) \left(\frac{1}{\Delta B} \right)^2 \quad (4.43)$$

Minimum bakır kaybının, nüve kaybının ve toplam güç kaybının ΔB 'ye göre değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 Nüve, bakır ve toplam kaybın ΔB 'ye göre değişimi [6]

4.3.1.5 Kriter V, Optimum Manyetik Alan Değişimi (ΔB_{opt})

Toplam güç kaybını minimize eden optimum ΔB 'nin bulunabilmesi için (4.43) eşitliğinde belirtilen toplam güç kaybının ΔB 'ye göre türevi alınıp sıfıra eşitlenmelidir.

$$\frac{dP_{tot}}{d(\Delta B)} = \frac{dP_{Cu,tot,min}}{d(\Delta B)} + \frac{dP_{fe}}{d(\Delta B)} = 0 \quad (4.44)$$

Optimum ΔB için $P_{Cu,tot,min} = P_{fe}$ olması şart değildir. $\frac{dP_{fe}}{d(\Delta B)} = -\frac{dP_{Cu,tot,min}}{d(\Delta B)}$ şartının sağlanması gerekir [6]. Buna göre optimum ΔB aşağıdaki adımlar uygulanarak hesaplanır.

- $\frac{dP_{fe}}{d(\Delta B)} = \beta K_{fe} A_c l_m (\Delta B)^{\beta-1}$
- $\frac{dP_{Cu,tot,min}}{d(\Delta B)} = -2 \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right) \left(\frac{MLT}{W_A A_c^2} \right) (\Delta B)^{-3}$
- $\beta K_{fe} A_c l_m (\Delta B)^{\beta-1} = 2 \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right) \left(\frac{MLT}{W_A A_c^2} \right) (\Delta B)^{-3}$
- $\frac{(\Delta B)^{\beta-1}}{(\Delta B)^{-3}} = \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \right) \left(\frac{MLT}{W_A A_c^3 l_m} \right) \left(\frac{1}{\beta K_{fe}} \right)$
- $(\Delta B)^{\beta+2} = \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \right) \left(\frac{MLT}{W_A A_c^3 l_m} \right) \left(\frac{1}{\beta K_{fe}} \right)$

$$\Delta B_{opt} = \left[\left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \right) \left(\frac{MLT}{W_A A_c^3 l_m} \right) \left(\frac{1}{\beta K_{fe}} \right) \right]^{\left(\frac{1}{\beta+2} \right)} \quad (4.45)$$

4.3.2 Kriterlerin Değerlendirilmesi ve Nüve Geometrik Sabiti (K_{gfe})

Beş kriter yardımıyla bulunan (4.45)'teki ΔB_{opt} (4.43) eşitliğinde yerine yazılıp aşağıdaki adımlar uygulandığında, toplam güç kaybı, devre şartlarına göre bilinen değerler ve seçilecek nüvenin geometrik özelliklerine bağlı değerler cinsinden elde edilir.

- $P_{tot} = K_{fe} A_c l_m \left[\left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \right) \left(\frac{MLT}{W_A A_c^3 l_m} \right) \left(\frac{1}{\beta K_{fe}} \right) \right]^{\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)} +$
 $\left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right) \left(\frac{MLT}{W_A A_c^2} \right) \left[\left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \right) \left(\frac{MLT}{W_A A_c^3 l_m} \right) \left(\frac{1}{\beta K_{fe}} \right) \right]^{-\left(\frac{2}{\beta+2} \right)}$
- $\left(\frac{MLT}{W_A A_c^3 l_m} \right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)} = \left(\frac{MLT}{W_A A_c^2} \right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)} (A_c l_m)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)}$
- $(K_{fe} A_c l_m) (A_c l_m K_{fe})^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)} = (A_c l_m K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta+2} \right)}$
- $\left(\frac{2}{2} \right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)} \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)} = \left(\frac{1}{2} \right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)} \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)}$
- $1.Terim = \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)} \left(\frac{MLT}{W_A A_c^2} \right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)} (A_c l_m K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta+2} \right)} \left(\frac{\beta}{2} \right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2} \right)}$
- $\left(\frac{2}{2} \right)^{-\left(\frac{2}{\beta+2} \right)} \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \right)^{-\left(\frac{2}{\beta+2} \right)} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\left(\frac{2}{\beta+2} \right)} \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right)^{-\left(\frac{2}{\beta+2} \right)}$

- $\left(\frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u}\right) \left(\frac{2}{2}\right)^{-\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \left(\frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u}\right)^{-\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \left(\frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)}$
- $\left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^3 l_m}\right)^{-\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} = \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2}\right)^{-\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} (A_c l_m)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)}$
- $\left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2}\right) \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^3 l_m}\right)^{-\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} = \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} (A_c l_m)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)}$
- $2.Terim = \left(\frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} (A_c l_m K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)}$

$$P_{tot} = (A_c l_m K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \left(\frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \right] \quad (4.46)$$

(4.46) eşitliği, aşağıdaki adımlar uygulanarak, seçilecek nüvenin geometrik özelliklerine bağlı değerler eşitliğin sol tarafına, bilinen değerler eşitliğin sağ tarafında olacak şekilde yeniden düzenlendiğinde nüve geometrik sabiti K_{gfe} elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \bullet \frac{P_{tot} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \right]^{-1}}{(A_c l_m K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)}} = \left(\frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} \\
& \bullet \left[\frac{P_{tot} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \right]^{-1}}{(A_c l_m K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)}} \right]^{\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)} = \left[\left(\frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u}\right)^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} \right]^{\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)} \\
& \bullet \frac{(P_{tot})^{\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \right]^{-\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)}}{(A_c l_m K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta}\right)} \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2}\right)} = \left(\frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u}\right) \\
& \bullet \frac{W_A (A_c)^{\left(2-\frac{2}{\beta}\right)} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \right]^{-\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)}}{(MLT)(l_m)^{\left(\frac{2}{\beta}\right)}} = \frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2 (K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta}\right)}}{4K_u (P_{tot})^{\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)}} \\
& K_{gfe} = \frac{W_A (A_c)^{\left(\frac{2(\beta-1)}{\beta}\right)}}{(MLT)(l_m)^{\left(\frac{2}{\beta}\right)}} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \right]^{-\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)} \geq \frac{\rho\lambda_1^2 I_{tot}^2 (K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta}\right)}}{4K_u (P_{tot})^{\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)}} \quad (4.47)
\end{aligned}$$

Nüve geometrik sabiti K_{gfe} , K_g 'ye benzerdir. Tasarlanan devrede B_{max} 'ın değeri belli ise K_g , toplam güç kaybını minimize edecek ΔB değeri seçilecekse K_{gfe} kullanılır [6.] Bilinen ferit nüveler için K_{gfe} değerleri Ek-A'da verilmiştir.

4.3.3 Tasarımda İzlenecek Yol

Tasarımda kullanılacak bilinen büyüklükler ve birimleri aşağıda belirtilmiştir.

- İletkenin öz direnci ρ (Ωcm)
- Toplam rms sargı akımı I_{tot} (A) (Primere indirgenmiş)
- İstenilen sargı oranları $N_2/N_1, N_3/N_1, \dots, N_k/N_1$
- Primer sargıya uygulanan volt-saniye λ_1 (V – s)
- İzin verilen toplam güç kaybı P_{tot} (W)
- Doluluk faktörü K_u
- Nüve kaybı üssel katsayısı β
- Nüve kaybı katsayısı K_{fe} ($W/cm^3 T^\beta$)

Nüve boyutları cm cinsinden aşağıdaki gibi verilmiştir.

- Nüvenin kesit alanı A_c (cm^2)
- Nüvenin pencere alanı W_A (cm^2)
- Sarım başına iletken uzunluğu (MLT) (cm)
- Manyetik yol uzunluğu l_m (cm)

Diğer büyüklükler ve birimleri aşağıdaki gibidir.

- Çıplak iletken kesitleri $A_{w1}, A_{w2}, \dots, A_{wk}$ (cm^2)
- Optimum manyetik alan değişimi ∇B_{opt} (T)

Uzunluk ve alan ölçülerinde m ve m^2 yerine cm ve cm^2 kullanıldığından gerekli birim dönüşümü çarpanları tasarım denklemlerine eklenmelidir.

4.3.3.1 Nüve Boyutunun Belirlenmesi

Nüve boyutunun belirlenmesi için nüve geometrik sabitinin hesaplanması gerekir. Bunun için (4.47) eşitliğine birim dönüşüm çarpanı eklenmelidir.

$$K_{gfe} \geq \frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2 (K_{fe})^{\left(\frac{2}{\beta}\right)}}{4 K_u (P_{tot})^{\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)}} \cdot 10^8 \quad (4.48)$$

Bu eşitsizliği sağlayan en küçük K_{gfe} değerine göre, Ek-A'dan nüve seçimi yapılır. Bu adımdan sonra kullanılacak A_c , W_A , (MLT) ve l_m değerleri, seçilen nüveye ait değerler olacaktır. Daha küçük bir nüve seçimi yapmak için K_{fe} gibi daha düşük nüve kaybına sahip nüve malzemesi seçilmelidir [6].

4.3.3.2 Optimum Manyetik Alan Değişiminin Hesaplanması ve Değerlendirilmesi

Optimum manyetik alan değişiminin belirlenmesi için (4.45) eşitliğine birim dönüşüm çarpanı eklenmelidir.

$$\Delta B_{opt} = \left[\left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2 K_u} \right) \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^3 l_m} \right) \left(\frac{1}{\beta K_{fe}} \right) \cdot 10^8 \right]^{\left(\frac{1}{\beta+2}\right)} \quad (4.49)$$

Manyetik alan değişiminin hesaplanan değeri B_{sat} 'ı aşmamalıdır. Eğer nüve bir DC bias manyetik alanı B_{dc} ile çalıştırılıyorsa $\Delta B_{opt} + B_{dc}$ değeri B_{sat} değerinden daha az olmalıdır [6]. Nüve doyuma giriyorsa iki seçenek vardır. Birincisi belli bir ΔB değeri belirlenip K_g yöntemi ile tasarıma devam edilmelidir. İkincisi daha büyük nüve kaybına sahip nüve malzemesi seçilip birinci ve ikinci adımlar tekrarlanmalıdır [6].

4.3.3.3 Sarım Sayılarının Belirlenmesi

Öncelikle primer sargının sarım sayısı belirlenmelidir. Bunun için (4.41) eşitliğine birim dönüşüm çarpanı eklenmelidir.

$$N_1 = \frac{\lambda_1}{2 \Delta B A_c} \cdot 10^4 \text{ (sarım)} \quad (4.50)$$

Primer sargının sarım sayısı (4.50)'ye göre belirlendikten sonra diğer sargıların sarım sayıları, (4.35) eşitliği ile istenilen sargı oranlarına göre belirlenir.

4.3.3.4 Dağılım Sabitlerinin Belirlenmesi ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$)

Her bir sargının dağılım sabiti Bölüm 4.2.4.4'te detaylı olarak verilen (4.36) eşitliğine göre belirlenir.

4.3.3.5 İletken Kesitlerinin Belirlenmesi

Ek-B’de Amerikan tel kalınlıkları listesi verilmiştir. Buna göre (4.37) eşitsizliğini sağlayan en büyük iletken kesitleri listeden seçilir. İletkenlerin seçimi yapıldıktan sonra izin verilen toplam bakır kaybının aşılmadığı kontrol edilmelidir.

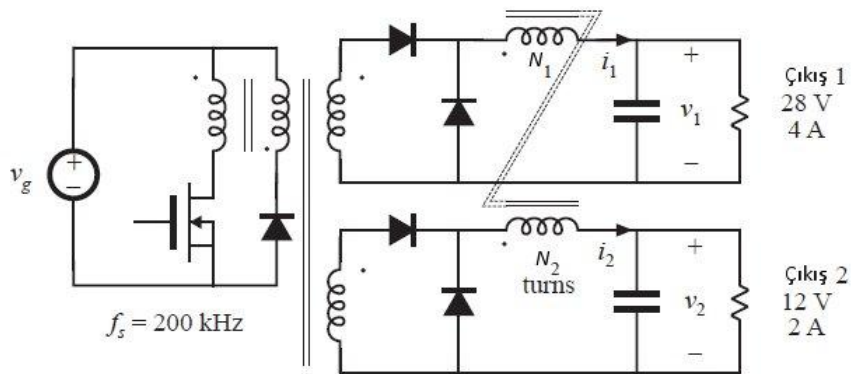
SAYISAL ÖRNEKLER

Bu bölümde tasarım için sayısal örnekler verilmiştir. Sayısal örnekler [6] nolu referanstan alınmıştır. Bu bölümde elde edilen sonuçlar Bölüm 6'da tartışılmıştır.

5.1 İki Çıkışlı İleri Yönlü Dönüştürücü İçin Kuplajlı Endüktans Tasarımı

Şekil 5.1'deki iki çıkışlı ileri yönlü dönüştürücü kesintisiz modda çalışacak şekilde tasarlanacaktır. Devrenin diğer çalışma şartları aşağıdaki gibidir.

- Anahtarlama frekansı, $f_s = 200 \text{ kHz} \Rightarrow T_s = 1/f_s = 5 \mu s$
- Doluluk oranı, $D = 0,35$
- Çıkış gerilimleri, $V_1 = 28 \text{ V}$, $V_2 = 12 \text{ V}$
- Çıkış akımları, $I_1 = 4 \text{ A}$, $I_2 = 2 \text{ A}$
- Mıknatıslanma akımı dalgalanma oranı, $\Delta i_M = \%20 I_M$
- Sargı oranı, $N_2/N_1 = v_2/v_1 = 12/28$

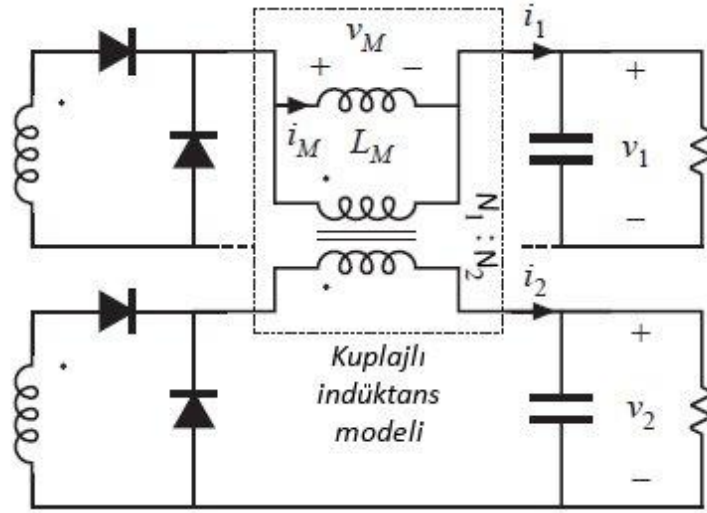


Şekil 5.1 İki çıkışlı ileri yönlü dönüştürücü [6]

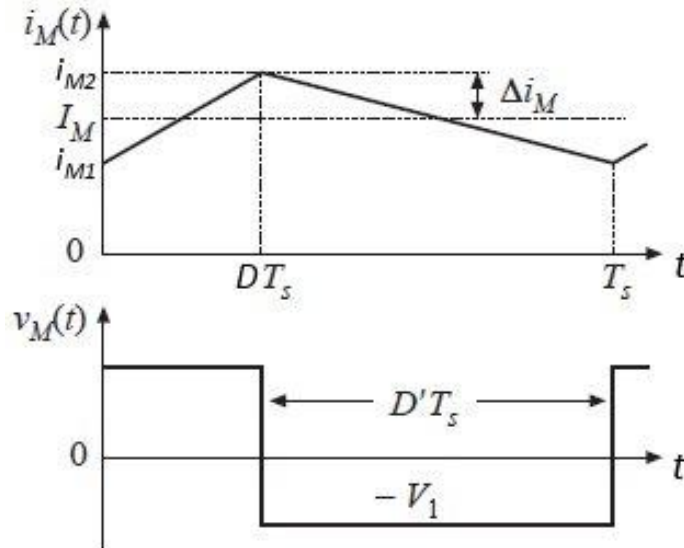
5.1.1 Kuplajlı Endüktans Modeli ve Nominal Tam Yük Çalışma Koşulları

İki çıkışlı ileri yönlü dönüştürücünün kuplajlı endüktans modeli Şekil 5.2'deki gibidir. Bu modele göre primere indirgenmiş mıknatıslama akımının ve primer sargının maruz kaldığı gerilimin dalga şekilleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Eşitlik (3.39)'e göre mıknatıslama akımının DC bileşeni aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $I_M = 4 + (12/28)2 \cong 4,86 \text{ A}$



Şekil 5.2 Kuplajlı endüktans modeli [6]



Şekil 5.3 Mıknatıslama akımı ve gerilimi dalga şekilleri [6]

Devrenin çalışma şartlarına göre mıknatıslama endüktansının değeri (3.36)'ya göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $v_1(t) = L_M \frac{di_M}{dt} \Rightarrow di_M = \frac{1}{L_M} v_1(t) dt$
- $\int_{i_{M2}}^{i_{M1}} di_M = \frac{1}{L_M} \int_{DT_s}^{T_s} v_1(t) dt$
- $i_{M1} - i_{M2} = \frac{(-V_1)}{L_M} \int_{DT_s}^{T_s} dt = \frac{(-V_1)}{L_M} (T_s - DT_s)$
- $\Delta i_M = \frac{i_{M2} - i_{M1}}{2}$
- $-2\Delta i_M = \frac{(-V_1)}{L_M} (1 - D) T_s$
- $L_M = \frac{V_1(1-D)T_s}{2\Delta i_M}$
- $L_M = \frac{28(1-0,35)5 \cdot 10^{-6}}{2(\%20)4,86} \cong 47 \mu H$

Primere indirgenmiş rms sargı akımlarının toplamı I_{tot} için sargı akımlarının rms değerlerinin bilinmesi gerekir. Sargı akımlarındaki dalgalanma küçük olduğundan sargı akımlarının rms değerleri DC bileşen değerlerine yaklaşık olarak eşittir [6]. Bu nedenle primere indirgenmiş rms sargı akımlarının toplamı, mıknatıslama akımının DC bileşenine eşittir.

- $I_{tot} = 4,86 A$

Dalgalanan mıknatıslama akımının tepe değeri $I_{M,max}$ aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $I_{M,max} = I_M + \Delta i_M = 4,86 + (\%20)4,86 \cong 5,83 A$

5.1.2 Nüve Seçimi

Nüve seçimi için nüve geometrik sabiti K_g 'nin hesaplanması gerekir. K_g değeri için izin verilen toplam bakır kaybı $P_{Cu,tot}$, maksimum manyetik alan B_{max} ve doluluk faktörü K_u belirlenmelidir. Küçük bir nüve için termal direnç $40^\circ C/W$ 'tan daha küçük olup maksimum sıcaklık artışı $30^\circ C$ 'den az olmalıdır [6]. Bu nedenle izin verilen toplam bakır kaybı $P_{Cu,tot} = 0,75 W$ seçilir. Eşitlik (4.7)'ye göre nüve boyutunu küçültmek için mümkün olduğunca büyük bir B_{max} değeri seçilmelidir. Ancak bu değer B_{sat} ile sınırlıdır. Ferit nüveler için B_{sat} değeri $0,3-0,5 T$ aralığındadır [6]. Bu nedenle B_{max} değeri $0,25 T$ seçilir. Düşük gerilimli, çok sargılı bir endüktansın doluluk faktörü K_u için

0,4 değeri mantıklı bir tahmindir [6]. Bu nedenle $K_u = 0,4$ seçilir. Gerekli bütün büyüklükler belirlendikten sonra (4.30)'a göre K_g aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $$K_g \geq \frac{(1,724 \cdot 10^{-6})(47 \cdot 10^{-6})^2 (4,86)^2 (5,83)^2}{(0,4)(0,25)^2 (0,75)} \cdot 10^8 \cong 16 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^5$$

Tasarımda PQ tipi nüve seçilmesi istenmektedir. Ek-A'dan $K_g \geq 16 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^5$ şartını sağlayan en küçük nüve seçilmelidir. Buna göre K_g değeri $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^5$ olan PQ 20/16 nüve seçilir. Seçilen bu nüvenin geometrik özellikleri aşağıdaki gibidir.

- $A_c = 0,62 \text{ cm}^2$
- $W_A = 0,256 \text{ cm}^2$
- $(MLT) = 4,4 \text{ cm}$

5.1.3 Diğer Bilinmeyenlerin Belirlenmesi

Nüvede bırakılması gereken hava aralığı uzunluğu (4.31)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $$l_g = \frac{(4\pi \cdot 10^{-7})(47 \cdot 10^{-6})(5,83)^2}{(0,25)^2 (0,62)} \cdot 10^4 \cong 0,52 \text{ mm}$$

Birinci ve ikinci sargının sarım sayıları (4.34) ve (4.35)'e göre aşağıdaki gibi belirlenir.

- $$N_1 = \frac{(47 \cdot 10^{-6})(5,83)}{(0,25)(0,62)} \cdot 10^4 \cong 17,68$$
- $$N_2 = \left(\frac{12}{28}\right) 17,68 \cong 7,58$$

Buna göre birinci sargı sarım sayısı $N_1 = 17$ ve ikinci sargı sarım sayısı $N_2 = 7$ seçilir.

Dağılım sabitleri (4.36)'ya göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $$\alpha_1 = \frac{(17)(4)}{(17)(4,86)} \cong 0,823$$
- $$\alpha_2 = \frac{(7)(2)}{(17)(4,86)} \cong 0,1695$$

Dağılım sabitleri belirlendikten sonra birinci ve ikinci sargının iletken kesitleri (4.37)'ye göre aşağıdaki gibi belirlenir.

- $$A_{W1} \leq \frac{(0,823)(0,4)(0,256)}{(17)} \cong 4,96 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

- $A_{W2} \leq \frac{(0,1695)(0,4)(0,256)}{(7)} \cong 2,48 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$

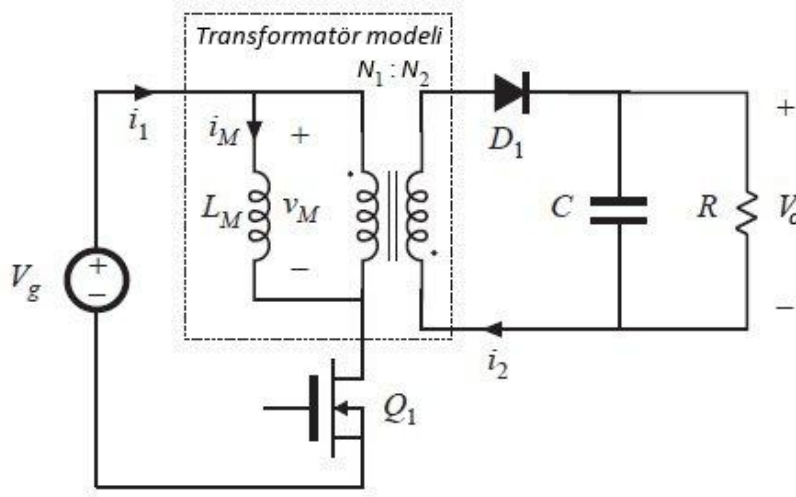
Ek-B'de verilen listeden yukarıdaki eşitsizlikleri sağlayan en büyük iletken kesitleri seçilmelidir. Buna göre birinci sargı için AWG #21 ve ikinci sargı için AWG #24 seçilerek izin verilen toplam bakır kaybının aşılmadığı (3,59), (4,6) ve (4.20)'ye göre aşağıdaki gibi kontrol edilir.

- $P_{Cu1} = (4)^2 \left((1,724 \cdot 10^{-6}) \frac{(17)(4,4)}{(4,116 \cdot 10^{-3})} \right) \cong 0,501 \text{ W}$
- $P_{Cu2} = (2)^2 \left((1,724 \cdot 10^{-6}) \frac{(7)(4,4)}{(2,047 \cdot 10^{-3})} \right) \cong 0,104 \text{ W}$
- $P_{Cu,tot} = 0,501 + 0,104 = 0,605 \text{ W}$

Toplam bakır kaybı izin verilen değeri aşmadığı için seçilen kesitler uygundur.

5.2 Kesintisiz Modda Çalışan Geri Dönümlü Dönüştürücü için Transformatör Tasarımı

Şekil 5.4'te bir geri dönümlü dönüştürücü devresi görülmektedir. Bu dönüştürücüde kullanılan transformatör tasarlanacaktır.



Şekil 5.4 Transformatör modeli içeren geri dönümlü dönüştürücü devresi [6]

Devrenin çalışma şartları aşağıdaki gibidir.

- Anahtarlama frekansı, $f_s = 150 \text{ kHz} \Rightarrow T_s = 1/f_s = 6,67 \mu s$
- Doluluk oranı, $D = 0,40$

- Giriş gerilimi, $V_g = 200 \text{ V}$
- Çıkış gerilimi, $V_o = 20 \text{ V}$
- Çıkış akımı (tam yükte), $I_o = 5 \text{ A}$
- Mıknatıslanma akımı dalgalanma oranı, $\Delta i_M = \%20 I_M$
- Sargı oranı, $N_2/N_1 = 0,15$
- İzin verilen toplam bakır kaybı, $P_{Cu} = 1,5 \text{ W}$
- Maksimum manyetik alan, $B_{max} = 0,25 \text{ T}$
- Doluluk faktörü, $K_u = 0,3$

5.2.1 Nominal Tam Yük Çalışma Koşulları

Geri dönüşlü dönüştürücü transformatörünün primer sargısının maruz kaldığı gerilimin, primere indirgenmiş mıknatıslama akımının, primer ve sekonder sargıların akımlarının dalga şekilleri Şekil 5.5'teki gibidir.

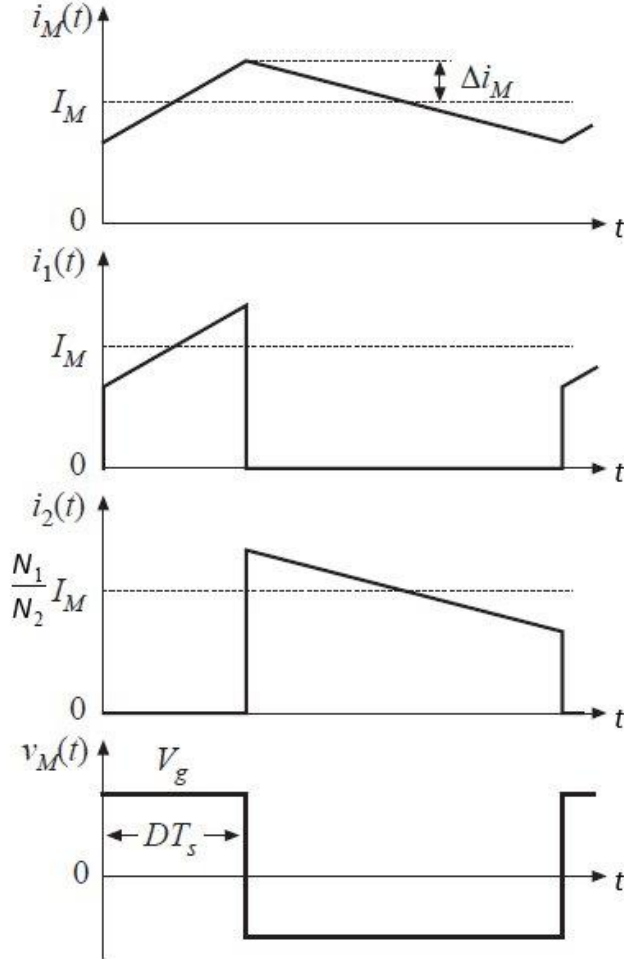
Mıknatıslama akımının DC bileşeni, dalgalanan akım ve maksimum mıknatıslama akımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $I_M = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \frac{1}{(1-D)} \frac{V_o}{R} = (0,15) \frac{1}{(1-0,4)} 5 = 1,25 \text{ A}$
- $\Delta i_M = (\%20) I_M = (\%20)(1,25) = 0,25 \text{ A}$
- $I_{M,max} = I_M + \Delta i_M = 1,25 + 0,25 = 1,5 \text{ A}$

Devrenin çalışma şartlarına göre mıknatıslama endüktansının değeri (3.36)'ya göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $v_1(t) = L_M \frac{di_M}{dt} \Rightarrow di_M = \frac{1}{L_M} v_1(t) dt$
- $\int_{i_{M1}}^{i_{M2}} di_M = \frac{1}{L_M} \int_0^{DT_s} v_1(t) dt$
- $i_{M2} - i_{M1} = \frac{V_g}{L_M} \int_{DT_s}^{T_s} dt = \frac{V_g}{L_M} DT_s$
- $\Delta i_M = \frac{i_{M2} - i_{M1}}{2}$

- $2\Delta i_M = \frac{V_g}{L_M} DT_s$
- $L_M = \frac{V_g DT_s}{2\Delta i_M}$
- $L_M = \frac{(200)(0,4)(6,67 \cdot 10^{-6})}{2(0,25)} \cong 1,07 \text{ mH}$



Şekil 5.5 Mıknatıslama akımı ve gerilimi ile sargı akımları dalga şekilleri [6]

Primere indirgenmiş rms sargı akımlarının toplamı I_{tot} için primer ve sekonder sargı akımlarının rms değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $I_1 = I_M \sqrt{D} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta i_M}{I_M} \right)^2} = 1,25 \sqrt{0,4} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{0,25}{1,25} \right)^2} \cong 0,796 \text{ A}$
- $I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_M \sqrt{(1-D)} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta i_M}{I_M} \right)^2} = \frac{1}{0,15} 1,25 \sqrt{(1-0,4)} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{0,25}{1,25} \right)^2}$
- $I_2 \cong 6,50 \text{ A}$

- $I_{tot} = I_1 + \frac{N_2}{N_1} I_2 = 0,796 + (0,15)(6,50) \cong 1,77 \text{ A}$

5.2.2 Nüve Seçimi

Nüve seçimi için nüve geometrik sabiti K_g (4.30)'a göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $K_g \geq \frac{(1,724 \cdot 10^{-6})(1,07 \cdot 10^{-3})^2 (1,77)^2 (1,5)^2}{(0,3)(0,25)^2 (1,5)} \cdot 10^8 \cong 49 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^5$

Ek-A'dan $K_g \geq 49 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^5$ şartını sağlayan en küçük EE tipi nüve, K_g değeri $85,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^5$ olan EE30 seçilir. Seçilen bu nüvenin geometrik özellikleri aşağıdaki gibidir.

- $A_c = 1,09 \text{ cm}^2$
- $W_A = 0,476 \text{ cm}^2$
- $(MLT) = 6,6 \text{ cm}$

5.2.3 Diğer Bilinmeyenlerin Belirlenmesi

Nüvede bırakılması gereken hava aralığı uzunluğu (4.31)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $l_g = \frac{(4\pi \cdot 10^{-7})(1,07 \cdot 10^{-3})(1,5)^2}{(0,25)^2 (1,09)} \cdot 10^4 \cong 0,44 \text{ mm}$

Birinci ve ikinci sargının sarım sayıları (4.34) ve (4.35)'e göre aşağıdaki gibi belirlenir.

- $N_1 = \frac{(1,07 \cdot 10^{-3})(1,5)}{(0,25)(1,09)} \cdot 10^4 \cong 58,90$
- $N_2 = (0,15)(58,90) \cong 8,83$

Buna göre birinci sargı sarım sayısı $N_1 = 59$ ve ikinci sargı sarım sayısı $N_2 = 9$ seçilir.

Dağılım sabitleri (4.36)'ya göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $\alpha_1 = \frac{(59)(0,796)}{(59)(1,77)} \cong 0,45$
- $\alpha_2 = \frac{(9)(6,5)}{(59)(1,77)} \cong 0,56$

Dağılım sabitleri belirlendikten sonra birinci ve ikinci sargının iletken kesitleri (4.37)'ye göre aşağıdaki gibi belirlenir.

- $A_{W1} \leq \frac{(0,45)(0,3)(0,476)}{(59)} \cong 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$
- $A_{W2} \leq \frac{(0,56)(0,3)(0,476)}{(9)} \cong 8,88 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$

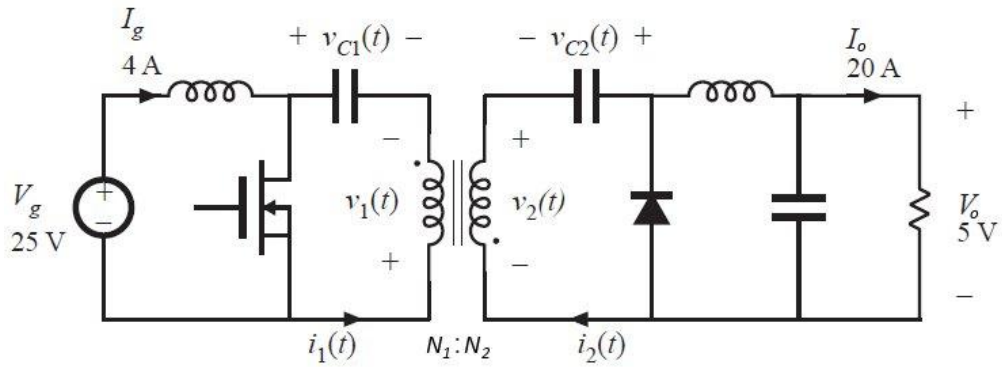
Ek-B'de verilen listeden yukarıdaki eşitsizlikleri sağlayan en büyük iletken kesitleri seçilmelidir. Buna göre birinci sargı için AWG #27 ve ikinci sargı için AWG #18 seçilerek izin verilen toplam bakır kaybının aşılmadığı (3,59), (4,6) ve (4.20)'ye göre aşağıdaki gibi kontrol edilir.

- $P_{Cu1} = (0,796)^2 \left((1,724 \cdot 10^{-6}) \frac{(59)(6,6)}{(1,021 \cdot 10^{-3})} \right) \cong 0,417 \text{ W}$
- $P_{Cu2} = (6,5)^2 \left((1,724 \cdot 10^{-6}) \frac{(9)(6,6)}{(8,228 \cdot 10^{-3})} \right) \cong 0,526 \text{ W}$
- $P_{Cu,tot} = 0,417 + 0,526 = 0,943 \text{ W}$

Toplam bakır kaybı izin verilen değeri aşmadığı için seçilen kesitler uygundur.

5.3 Tek Çıkışlı İzoleli Cuk Dönüştürücü için Transformator Tasarımı

Şekil 5.6'da tek çıkışlı, izoleli bir cuk dönüştürücü devresi görülmektedir. Bu dönüştürücüde kullanılan transformator tasarlanacaktır.



Şekil 5.6 Tek çıkışlı, izoleli cuk dönüştürücü devresi [6]

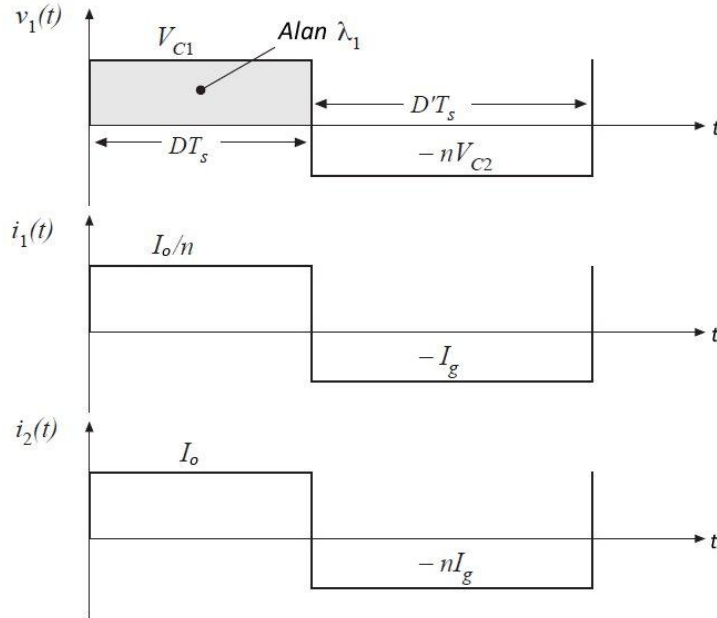
Devrenin çalışma şartları aşağıdaki gibidir.

- Anahtarlama frekansı, $f_s = 200 \text{ kHz} \Rightarrow T_s = 1/f_s = 5 \mu\text{s}$
- Doluluk oranı, $D = 0,5$
- Giriş gerilimi, $V_g = 25 \text{ V}$

- Çıkış gerilimi, $V_o = 5 V$
- Giriş akımı (tam yükte), $I_g = 4 A$
- Çıkış akımı (tam yükte), $I_o = 20 A$
- Sargı oranı, $n = N_1/N_2 = 5$
- İzin verilen toplam güç kaybı, $P_{tot} = 0,25 W$
- Doluluk faktörü, $K_u = 0,5$
- Ferit pot tipi nüve kullanılacak
- 200 kHz için nüve kaybı katsayısı, $K_{fe} = 24,7$
- 200 kHz için nüve kaybı üssel katsayısı, $\beta = 2.6$

5.3.1 Nominal Tam Yük Çalışma Koşulları

Cuk dönüştürücü devresi transformatörünün primer sargısının maruz kaldığı gerilimin, primer ve sekonder sargıların akımlarının dalga şekilleri Şekil 5.7'deki gibidir.



Şekil 5.7 Primer sargıya uygulanan gerilim ile sargı akımlarının dalga şekilleri [6]

$v_1(t)$ geriliminin pozitif kısmı süresince primer sargıya uygulanan volt-saniye (4.39)'a göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $\lambda_1 = V_{c1} \int_0^{DT_s} dt$
- $\lambda_1 = V_{c1} DT_s = (25)(0,5)(5 \cdot 10^{-6}) = 62,5 \cdot 10^{-6} V - s$

Primere indirgenmiş rms sargı akımlarının toplamı I_{tot} için primer ve sekonder sargı akımlarının rms değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $I_1 = \sqrt{D \left(\frac{I_g}{n}\right)^2 + (1-D)(I_g)^2} = \sqrt{0,5 \left(\frac{20}{5}\right)^2 + (1-0,5)(4)^2} = 4 A$
- $I_2 = nI_1 = (5)(4) = 20 A$
- $I_{tot} = I_1 + \frac{1}{n}I_2 = 4 + \left(\frac{1}{5}\right)(20) = 8 A$

5.3.2 Nüve Seçimi

Nüve seçimi için nüve geometrik sabiti K_{gfe} (4.48)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $K_{gfe} \geq \frac{(1,724 \cdot 10^{-6})(62,5 \cdot 10^{-6})^2 (8)^2 (24,7)^{\left(\frac{2}{2,6}\right)}}{4(0,5)(0,25)^{\left(\frac{2,6+2}{2,6}\right)}} \cdot 10^8 \cong 0,00295$

Ek-A'dan $K_{gfe} \geq 0,00295 cm^5$ şartını sağlayan en küçük Pot tipi nüve, K_{gfe} değeri $4,9 \cdot 10^{-3} cm^5$ olan 2213 pot nüve seçilir. Seçilen bu nüvenin geometrik özellikleri aşağıdaki gibidir.

- $A_c = 0,635 cm^2$
- $W_A = 0,297 cm^2$
- $(MLT) = 4,42 cm$
- $l_m = 3,15 cm$

5.3.3 Diğer Bilinmeyenlerin Belirlenmesi

Nüvede olması gereken optimum manyetik alan değişimi ΔB_{opt} (4.49)'a göre aşağıdaki gibi bulunur.

- $\Delta B_{opt} = \left[\left(\frac{(1,724 \cdot 10^{-6})(62,5 \cdot 10^{-6})^2 (8)^2}{2(0,5)} \right) \left(\frac{(4,42)}{(0,297)(0,635)^3 (3,15)} \right) \left(\frac{1}{(2,6)(24,7)} \right) \right]^{10812,6+2}$

- $\Delta B_{opt} = 0,0857 T$

Bu değer, nüvenin yaklaşık doyma manyetik alan değeri 0,35 T'dan çok daha küçüktür. Tipik ferit nüve tasarımlarında, 100 kHz civarındaki çalışma frekansları için, ΔB değerleri 0,1 T civarındadır [6].

Birinci ve ikinci sargının sarım sayıları (4.50) ve (4.35)'e göre aşağıdaki gibi belirlenir.

- $N_1 = \frac{(62,5 \cdot 10^{-6})}{2(0,0857)(0,635)} \cdot 10^4 \cong 5,74$

- $N_2 = \left(\frac{1}{5}\right) (5,87) \cong 1,15$

Buna göre primer sargının sarım sayısı $N_1 = 5$, sekonder sargının sarım sayısı $N_2 = 1$ seçilir. Primer sargının sarım sayısının hesaplanan değeri 5,87'nin 5'e yuvarlanması manyetik alan değişimi ΔB 'nin ve buna bağlı olarak nüve kaybının çok az artmasına neden olur [6]. (4.40)'a göre ΔB aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $\Delta B = \frac{(62,5 \cdot 10^{-6})}{2(5)(0,635 \cdot 10^{-4})} \cong 0,0984 T$

Sarım sayılarının belirlenmesinin ardından sargıların dağılım sabitleri (4.36)'ya göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $\alpha_1 = \frac{(5)(4)}{(5)(8)} \cong 0,5$

- $\alpha_2 = \frac{(1)(20)}{(5)(8)} \cong 0,5$

Dağılım sabitleri belirlendikten sonra birinci ve ikinci sargının iletken kesitleri (4.37)'ye göre aşağıdaki gibi belirlenir.

- $A_{W1} \leq \frac{(0,5)(0,5)(0,297)}{(5)} = 14,85 \cdot 10^{-3} cm^2$

- $A_{W2} \leq \frac{(0,5)(0,5)(0,297)}{(1)} = 74,25 \cdot 10^{-3} cm^2$

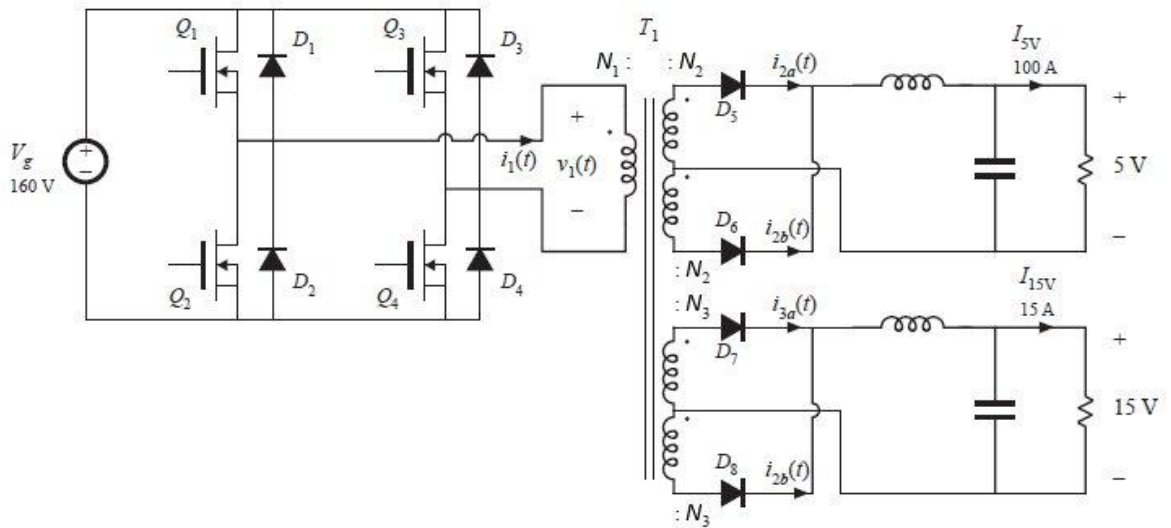
Ek-B'de verilen listeden yukarıdaki eşitsizlikleri sağlayan en büyük iletken kesitleri seçilmelidir. Buna göre birinci sargı için AWG #16 ve ikinci sargı için AWG #9 seçilerek izin verilen toplam kaybın aşılmadığı (3,59), (4,6), (4,20), (4,38) ve (4,43)'e göre aşağıdaki gibi kontrol edilir.

- $P_{Cu1} = (4)^2 \left((1,724 \cdot 10^{-6}) \frac{(5)(4,42)}{(13,07 \cdot 10^{-3})} \right) \cong 0,0466 \text{ W}$
- $P_{Cu2} = (20)^2 \left((1,724 \cdot 10^{-6}) \frac{(1)(4,42)}{(66,32 \cdot 10^{-3})} \right) \cong 0,0460 \text{ W}$
- $P_{Cu,tot} = 0,0466 + 0,0460 = 0,0926 \text{ W}$
- $P_{fe} = (24,7)(0,0984)^{(2,6)}(0,635)(3,15) \cong 0,119 \text{ W}$
- $P_{tot} = 0,119 + 0,0926 = 0,2116 \text{ W}$

Toplam güç kaybı izin verilen değeri aşmadığı için seçilen kesitler izin verilen güç kaybına göre uygundur. Ancak sargının 6,632 mm² kesitli AWG #9 ile sarılması pratik bir çözüm değildir. Buna alternatif olarak folyo sargı veya Litz tel kullanılabilir [6]. Bir diğer alternatif olarak sekonder sargı iletkeninin kesiti, toplam güç kaybı aşılmadan küçültülebilir.

5.4 Çok Çıkışlı Tam Köprü Düşürücü Dönüştürücü için Transformatör Tasarımı

Çok çıkışlı, tam köprü düşürücü dönüştürücü devresi Şekil 5.8'deki gibidir. Bu dönüştürücüde kullanılan beş sargılı transformatör tasarlanacaktır.



Şekil 5.8 Çok çıkışlı, tam köprü düşürücü dönüştürücü devresi [6]

Devrenin çalışma şartları aşağıdaki gibidir.

- Anahtarlama frekansı, $f_s = 150 \text{ kHz} \Rightarrow T_s = 1/f_s = 6,67 \mu\text{s}$
- Transformatör frekansı, $f_t = 75 \text{ kHz}$

- Doluluk oranı, $D = 0,75$
- Giriş gerilimi, $V_g = 25 \text{ V}$
- Birinci çıkış gerilimi, $V_{o1} = 5 \text{ V}$
- İkinci çıkış gerilimi, $V_{o1} = 15 \text{ V}$
- Birinci çıkış akımı (tam yükte), $I_{5V} = 100 \text{ A}$
- İkinci çıkış akımı (tam yükte), $I_{15V} = 15 \text{ A}$
- Sargı oranları, $N_2/N_1 = 5/110$, $N_3/N_1 = 15/110$
- İzin verilen toplam güç kaybı, $P_{tot} = 4 \text{ W}$
- Doluluk faktörü, $K_u = 0,25$
- Ferit EE tipi nüve kullanılacak
- 75 kHz için nüve kaybı katsayısı, $K_{fe} = 7,6$
- 75 kHz için nüve kaybı üssel katsayısı, $\beta = 2.6$

5.4.1 Nominal Tam Yük Çalışma Koşulları

Tam köprü düşürücü dönüştürücü devresi transformatörünün primer sargısının maruz kaldığı gerilimin, primer ve sekonder sargıların akımlarının dalga şekilleri Şekil 5.9'daki gibidir.

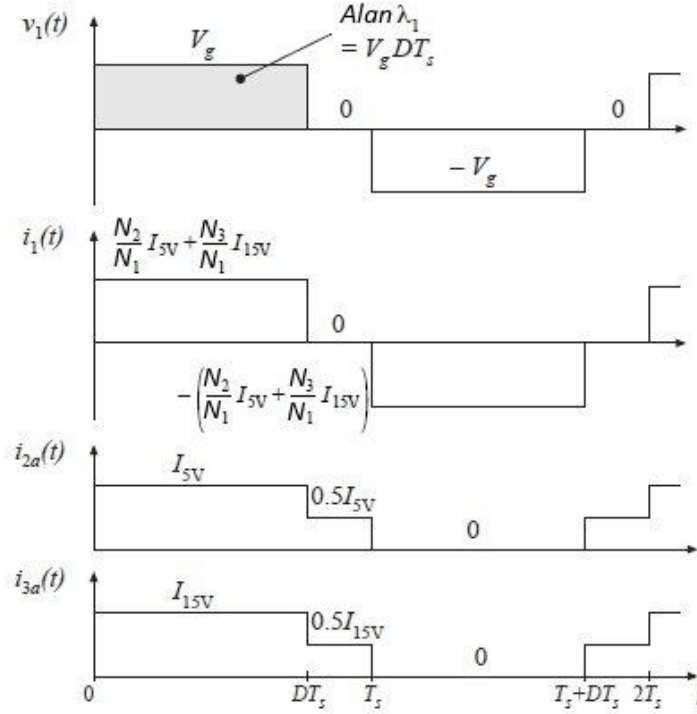
$v_1(t)$ geriliminin pozitif kısmı süresince primer sargıya uygulanan volt-saniye (4.39)'a göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $\lambda_1 = V_g \int_0^{DT_s} dt$
- $\lambda_1 = V_g DT_s = (160)(0,75)(6,67 \cdot 10^{-6}) \cong 800 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{s}$

Primere indirgenmiş rms sargı akımlarının toplamı I_{tot} için primer ve sekonder sargı akımlarının rms değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $I_1 = \left(\frac{N_2}{N_1} I_{5V} + \frac{N_3}{N_1} I_{15V} \right) \sqrt{D} = \left(\frac{5}{110} 100 + \frac{15}{110} 15 \right) \sqrt{0,75} \cong 5,7 \text{ A}$
- $I_2 = \frac{1}{2} I_{5V} \sqrt{1 + D} = \frac{1}{2} (100) \sqrt{1 + 0,75} \cong 66,1 \text{ A}$

- $I_3 = \frac{1}{2} I_{15V} \sqrt{1 + D} = \frac{1}{2} (15) \sqrt{1 + 0,75} \cong 9,9 \text{ A}$
- $I_{tot} = I_1 + 2 \frac{N_2}{N_1} I_2 + 2 \frac{N_3}{N_1} I_3 = 5,7 + 2 \left(\frac{5}{110} \right) (66,1) + 2 \left(\frac{15}{110} \right) (9,9) \cong 14,4 \text{ A}$



Şekil 5.9 Primer sargıya uygulanan gerilim ile sargı akımlarının dalga şekilleri [6]

5.4.2 Nüve Seçimi

Nüve seçimi için nüve geometrik sabiti K_{gfe} (4.48)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $K_{gfe} \geq \frac{(1,724 \cdot 10^{-6})(800 \cdot 10^{-6})^2 (14,4)^2 (7,6)^{\left(\frac{2}{2,6}\right)}}{4(0,25)(4)^{\left(\frac{2,6+2}{2,6}\right)}} \cdot 10^8 \cong 0,00937$

Ek-A'dan $K_{gfe} \geq 0,00937$ şartını sağlayan en küçük EE tipi nüve, K_{gfe} değeri 0,0118 olan EE40 nüve seçilir. Seçilen bu nüvenin geometrik özellikleri aşağıdaki gibidir.

- $A_c = 1,27 \text{ cm}^2$
- $W_A = 1,1 \text{ cm}^2$
- $(MLT) = 8,5 \text{ cm}$
- $l_m = 7,7 \text{ cm}$

5.4.3 Diğer Bilinmeyenlerin Belirlenmesi

Nüvede olması gereken optimum manyetik alan değişimi ΔB_{opt} (4,49)'a göre aşağıdaki gibi bulunur.

- $\Delta B_{opt} = \left[\left(\frac{(1,724 \cdot 10^{-6})(800 \cdot 10^{-6})^2 (14,4)^2}{2(0,25)} \right) \left(\frac{(8,5)}{(1,1)(1,27)^3 (7,7)} \right) \left(\frac{1}{(2,6)(7,6)} \right) \cdot 10^8 \right]^{\left(\frac{1}{2,6+2} \right)}$
- $\Delta B_{opt} \cong 0,23 \text{ T}$

Bu değer, nüvenin yaklaşık doyma manyetik alan değeri 0,35 T'dan daha küçüktür. Birinci ve diğer sargıların sarım sayıları (4.50) ve (4.35)'e göre aşağıdaki gibi belirlenir.

- $N_1 = \frac{(800 \cdot 10^{-6})}{2(0,23)(1,27)} \cdot 10^4 \cong 13,7$
- $N_2 = \left(\frac{5}{110} \right) (13,7) \cong 0,62$
- $N_3 = \left(\frac{15}{110} \right) (13,7) \cong 1,87$

Buna göre $N_2 = 1$ 'e yuvarlanır. Sargı oranlarının sağlanabilmesi için primer sargı sarım sayısı $N_1 = 22$, sekonder tarafta $N_3 = 3$ seçilir. Primer sargının optimum manyetik alan değişimine göre hesaplanan sarım sayısının değeri ile seçilen değer arasındaki fark manyetik alan değişimi ΔB 'nin ve buna bağlı olarak nüve kaybının azalmasına neden olur. Ancak bu durum toplam bakır kaybını daha fazla artırır. Bu nedenle toplam güç kaybında bir artış meydana gelir. Toplam güç kaybının izin verilen değeri aşıp aşmadığı kontrol edilmelidir. (4.40), (4.38), (4.42) ve (4.43) eşitliklerine göre P_{tot} aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $\Delta B = \frac{(800 \cdot 10^{-6})}{2(22)(1,27 \cdot 10^{-4})} \cong 0,143 \text{ T}$
- $P_{fe} = (7,6)(0,143)^{2,6}(1,27)(7,7) \cong 0,47 \text{ W}$
- $P_{Cu,tot,min} = \frac{(1,724 \cdot 10^{-6})(800 \cdot 10^{-6})(14,4)^2}{4(0,25)} \frac{(8,5)}{(1,1)(1,27)^2} \left(\frac{1}{(0,143)^2} \right)^2 \cdot 10^8 \cong 5,35 \text{ W}$
- $P_{tot} = 0,47 + 5,35 = 5,82 \text{ W}$

Hesaplanan P_{tot} değeri, izin verilen değer yaklaşık %50'si kadar daha fazla. Bu nedenle bir büyük nüve EE50 seçilerek hesaplar bir kez daha yapılır. Yeni nüveye göre bulunan değerler aşağıdaki gibidir.

- $A_c = 2,26 \text{ cm}^2$
- $W_A = 1,78 \text{ cm}^2$
- $(MLT) = 10 \text{ cm}$
- $l_m = 9,58 \text{ cm}$
- $\Delta B_{opt} \cong 0,14 \text{ T}$
- Hesaplanan sarım sayıları, $N_1 \cong 12,65$, $N_2 \cong 0,57$, $N_3 \cong 1,72$
- Seçilen sarım sayıları, $N_1 = 22$, $N_2 = 1$, $N_3 = 3$
- $\Delta B \cong 0,08 \text{ T}$
- Güç kayıpları, $P_{fe} \cong 0,23 \text{ W}$, $P_{Cu,tot,min} \cong 3,89 \text{ W}$, $P_{tot} \cong 4,12 \text{ W}$

Hesaplanan toplam güç kaybı izin verilen değerin %3 fazlasıdır. Bu kabul edilebilir bir değerdir [6].

Sarım sayılarının belirlenmesinin ardından sargıların dağılım sabitleri (4.36)'ya göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $\alpha_1 = \frac{(22)(5,7)}{(22)(14,4)} \cong 0,396$
- $\alpha_2 = \frac{(1)(66,1)}{22(14,4)} \cong 0,209$
- $\alpha_3 = \frac{(3)(9,9)}{22(14,4)} \cong 0,094$

Dağılım sabitleri belirlendikten sonra sargıların iletken kesitleri (4.37)'ye göre aşağıdaki gibi belirlenir.

- $A_{W1} \leq \frac{(0,396)(0,25)(1,78)}{(22)} \cong 8,01 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$
- $A_{W2} \leq \frac{(0,209)(0,25)(1,78)}{(1)} = 92,85 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$
- $A_{W3} \leq \frac{(0,094)(0,25)(1,78)}{(3)} = 13,91 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$

Ek-B'de verilen listeden yukarıdaki eşitsizlikleri sağlayan en büyük iletken kesitleri seçilmelidir. Buna göre birinci sargı için AWG #19, ikinci sargı için AWG #8 ve üçüncü

sargı için AWG #16 seçilerek izin verilen toplam kaybın aşılmadığı (3,59), (4,6), (4.20), (4.38) ve (4.43)'e göre aşağıdaki gibi kontrol edilir.

- $P_{Cu1} = (5,70)^2 \left((1,724 \cdot 10^{-6}) \frac{(22)(10)}{(6,531 \cdot 10^{-3})} \right) \cong 1,89 \text{ W}$
- $P_{Cu2} = (66,10)^2 \left((1,724 \cdot 10^{-6}) \frac{(1)(10)}{(83,67 \cdot 10^{-3})} \right) \cong 0,9 \text{ W}$
- $P_{Cu3} = (9,9)^2 \left((1,724 \cdot 10^{-6}) \frac{(3)(10)}{(13,07 \cdot 10^{-3})} \right) \cong 0,39 \text{ W}$
- $P_{Cu,tot} = (1,89) + 2(0,9) + 2(0,39) = 4,47 \text{ W}$
- $P_{tot} = 0,23 + 4,47 = 4,7 \text{ W}$

Hesaplanan P_{tot} değeri, izin verilen değerin %17,5'i kadar daha fazla. Bu nedenle bir büyük nüve EE60 seçilerek hesaplar bir kez daha yapılır. Yeni nüveye göre bulunan değerler aşağıdaki gibidir.

- $A_c = 2,47 \text{ cm}^2$
- $W_A = 2,89 \text{ cm}^2$
- $(MLT) = 12,8 \text{ cm}$
- $l_m = 11 \text{ cm}$
- $\Delta B_{opt} \cong 0,12 \text{ T}$
- Hesaplanan sarım sayıları, $N_1 \cong 13,31$, $N_2 \cong 0,60$, $N_3 \cong 1,81$
- Seçilen sarım sayıları, $N_1 = 22$, $N_2 = 1$, $N_3 = 3$
- $\Delta B \cong 0,0736 \text{ T}$
- Güç kayıpları, $P_{fe} \cong 0,23 \text{ W}$, $P_{Cu,tot,min} \cong 3,065 \text{ W}$, $P_{tot} \cong 3,30 \text{ W}$
- Dağılım sabitleri, $\alpha_1 \cong 0,396$, $\alpha_2 \cong 0,209$, $\alpha_3 \cong 0,094$
- İletken kesitleri, $A_{W1} \leq 0,013 \text{ cm}^2$, $A_{W2} \leq 0,1507 \text{ cm}^2$, $A_{W3} \leq 0,0226 \text{ cm}^2$
- Seçilen iletkenler, AWG #17, AWG #6, AWG 14
- Güç kayıpları, $P_{Cu,tot} = 3,62 \text{ W}$, $P_{tot} = 3,85 \text{ W}$

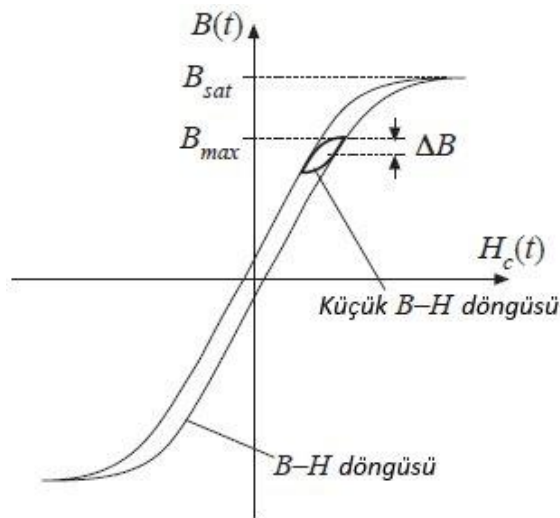
Toplam güç kaybı izin verilen değeri aşmadığı için seçilen kesitler izin verilen güç kaybına göre uygundur. Ancak ikinci sargı için AWG #8 iletken kullanılması pratik bir çözüm değildir. Buna alternatif olarak folyo sargı veya Litz tel kullanılabilir [6]. Bir diğer alternatif olarak sekonder sargı iletkeninin kesiti, toplam güç kaybı aşılmadan küçültülebilir.

TASARIMLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

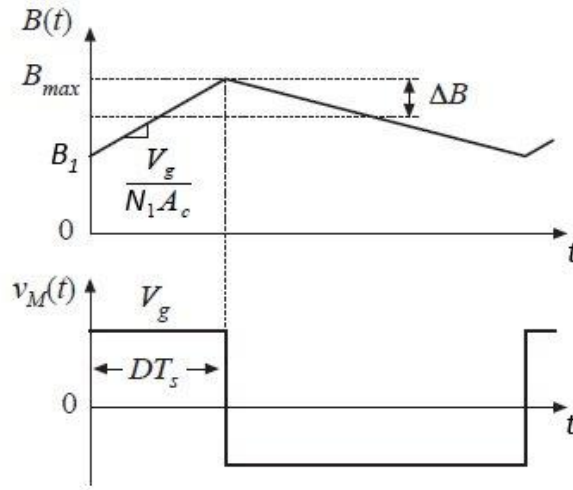
6.1 K_g Yönteminde Nüve Kayıplarının İhmal Edilmesi

Bölüm 5.2’de incelenen kesintisiz modda çalışan geri dönüşlü dönüştürücünün transformatörü K_g yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Bu yöntemde manyetik alandaki dalgalanma fazla olmadığından nüve kaybı ihmal edilmiştir. Tasarlanan transformatörün nüve kaybı devrenin çalışma koşullarına göre hesaplanıp bu yaklaşımın doğru olup olmadığı incelenmiştir.

Kesintisiz modda çalışan geri dönüşlü dönüştürücü örneğinde nüvedeki B-H karakteristiği Şekil 6.1’deki küçük B-H döngüsü gibidir. Bu dönüştürücüde giriş geriliminin ve manyetik alanın zamana göre değişimleri Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1 Kesintisiz modda çalışan geri dönüşlü dönüştürücüde B-H karakteristiği [6]



Şekil 6.2 Giriş geriliminin ve manyetik alanın zaman göre değişimleri [6]

Şekil 6.2'deki grafiğe göre manyetik alanın 0-DT_s aralığındaki denklemi aşağıdaki gibidir.

$$B(t) = \frac{V_g}{N_1 A_c} t + B_1 \quad (6.1)$$

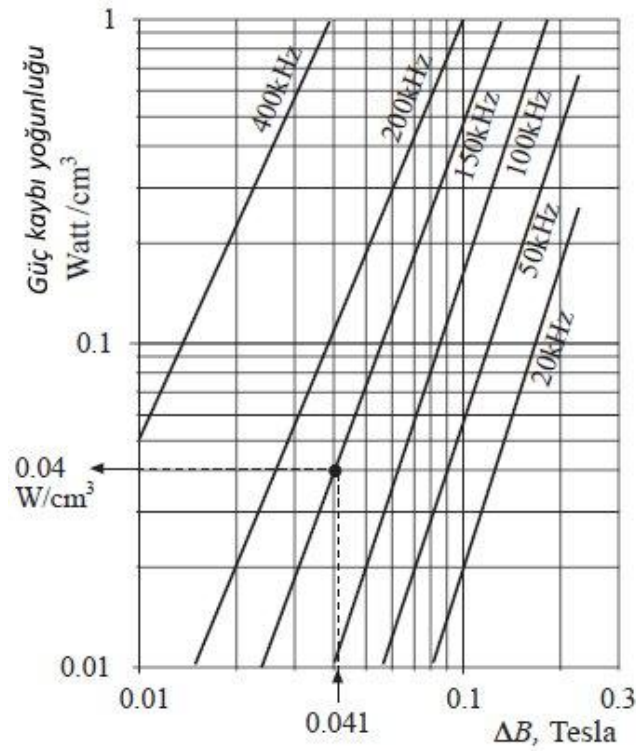
$\Delta B = (B_{max} - B_1)/2$ olduğundan (6.2)'ye göre manyetik alan değişimi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\Delta B = \frac{V_g}{2N_1 A_c} (DT_s) \quad (6.2)$$

(6.2)'ye ve Şekil 6.3'te verilen çeşitli frekanslar için ΔB -Güç kaybı yoğunluğu grafiğine göre nüve kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $\Delta B = \frac{200}{2(59)(1,09 \cdot 10^{-4})} (0,4)(6,67 \cdot 10^{-6}) \cong 0,041 \text{ T}$
- Güç kaybı yoğunluğu = 0,04 W/cm³
- $P_{fe} = (0,04 \text{ W/cm}^3)(A_c l_m) = (0,04)(1,09)(5,77) \cong 0,25 \text{ W}$

Tasarımda izin verilen bakır kaybı (nüve kaybı ihmal edildiği için toplam izin verilen güç kaybı) 1,5 W, tasarıma göre oluşan gerçek bakır kaybı 0,943 W'tır. Nüve kaybı 0,25 W, izin verilen bakır kaybına göre çok daha küçüktür. Bununla birlikte gerçek bakır kaybı ve nüve kaybının toplamı izin verilen kayıp değerini aşmamaktadır. Bu sonuç K_g yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tasarımda nüve kaybının ihmal edilebileceğinin bir göstergesidir.



Şekil 6.3 Çeşitli frekanslar için güç kaybı yoğunluğunun ΔB 'ye göre değişimi [6]

6.2 Sayısal Örneklerin Nüve Tipleri için Çözümü ve Değerlendirilmesi

Bölüm 4'teki tasarım yöntemlerine göre üç farklı tasarım algoritması oluşturulmuştur. Bu algoritmalar Excel'de kodlanıp sayısal örnekler tüm nüve tipleri için bilgisayar destekli olarak çözülmüştür. Oluşturulan algoritmalar ve Excel çözümleri Ek-C'de verilmiştir.

Excel yardımıyla tüm nüve tipleri için çözülen örneklerin sonuçları çizelgelerde özetlenmiştir. Böylece tasarım şartlarına göre hangi tip nüvenin en uygun olduğu karar verilebilmiştir. Ayrıca aynı örnekler bakırın öz direncinin 100 °C'taki değerleri için çözümlenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu sayede ρ 'ya göre nüve boyutunun, iletken kesitlerinin, bakır, nüve ve toplam güç kayıplarının değişimi görülmüştür. Bununla birlikte tasarım sonunda elde edilen dağılım sabitlerinin ρ 'ya göre değişmediği görülmüştür. Bunun nedeni dağılım sabitlerinin sargılardaki bakır kaybı oranlarına göre belirlenmesidir.

Çizelge 6.1 Birinci sayısal örneğin tasarım sonuçları (25 °C)

	Nüve Çeşidi	Vc (cm ³)	lg (mm)	N1	N2	$\alpha 1$	$\alpha 2$	Aw1 (mm ²)	Aw2 (mm ²)	Pcu,Tot (W)
POT NÜVE	2213	2,000250	0,5058143	17	7	0,823045	0,176367	0,51880	0,25080	0,484583
EE NÜVE	EE30	6,289300	0,294672	10	4	0,823045	0,176367	1,307000	0,822800	0,161418
EC NÜVE	EC35	6,524820	0,381011	13	6	0,823045	0,176367	2,002000	1,039000	0,116038
ETD NÜVE	ETD29	5,472000	0,422621	14	6	0,823045	0,176367	2,002000	1,039000	0,124039
PQ NÜVE	PQ20/16	2,318800	0,518052	18	8	0,823045	0,176367	0,411600	0,204700	0,649354

Çizelge 6.2 Birinci sayısal örneğin tasarım sonuçları (100 °C)

	Nüve Çeşidi	Vc (cm ³)	lg (mm)	N1	N2	$\alpha 1$	$\alpha 2$	Aw1 (mm ²)	Aw2 (mm ²)	Pcu,Tot (W)
POT NÜVE	2213	2,000250	0,5058143	17	7	0,823045	0,176367	0,51880	0,25080	0,646486
EE NÜVE	EE30	6,289300	0,294672	10	4	0,823045	0,176367	1,307000	0,822800	0,215349
EC NÜVE	EC35	6,524820	0,381011	13	6	0,823045	0,176367	2,002000	1,039000	0,154807
ETD NÜVE	ETD29	5,472000	0,422621	14	6	0,823045	0,176367	2,002000	1,039000	0,165481
PQ NÜVE	PQ20/20	2,814800	0,518052	18	8	0,823045	0,176367	0,653100	0,324300	0,546124

Tablo

Çizelge 6.3 İkinci sayısal örneğin tasarım sonuçları (25 °C)

	Nüve Çeşidi	V _c (cm ³)	lg (mm)	N1	N2	α1	α2	Aw1 (mm ²)	Aw2 (mm ²)	P _{cu,Tot} (W)
POT NÜVE	2616	3,555000	0,5106082	68	10	0,449718	0,550847	0,08046	0,65310	1,076314
EE NÜVE	EE30	6,289300	0,444089	59	9	0,449718	0,550847	0,102100	0,822800	0,942457
EC NÜVE	EC35	6,524820	0,574207	76	11	0,449718	0,550847	0,162300	1,307000	0,596008
ETD NÜVE	ETD29	5,472000	0,636917	84	13	0,449718	0,550847	0,128000	1,039000	0,867842
PQ NÜVE	PQ26/20	5,509700	0,406770	54	8	0,449718	0,550847	0,080460	0,653100	0,913446

Çizelge 6.4 İkinci sayısal örneğin tasarım sonuçları (100 °C)

	Nüve Çeşidi	V _c (cm ³)	lg (mm)	N1	N2	α1	α2	Aw1 (mm ²)	Aw2 (mm ²)	P _{cu,Tot} (W)
POT NÜVE	2616	3,555000	0,5106082	68	10	0,449718	0,550847	0,08046	0,65310	1,435918
EE NÜVE	EE30	6,289300	0,444089	59	9	0,449718	0,550847	0,102100	0,822800	1,257338
EC NÜVE	EC35	6,524820	0,574207	76	11	0,449718	0,550847	0,162300	1,307000	0,795139
ETD NÜVE	ETD29	5,472000	0,636917	84	13	0,449718	0,550847	0,128000	1,039000	1,157794
PQ NÜVE	PQ26/20	5,509700	0,406770	54	8	0,449718	0,550847	0,080460	0,653100	1,218634

Çizelge 6.5 Üçüncü sayısal örneğin tasarım sonuçları (25 °C)

	Nüve Çeşidi	V _c (cm ³)	ΔB _{opt} (T)	N1	N2	ΔB (T)	α1	α2	Aw1 (mm ²)	Aw2 (mm ²)	P _{cu,Tot} (W)	P _{fe} (W)	P _{tot} (W)
POT NÜVE	2213	2,00025	0,085748	5	1	0,0984252	0,5	0,5	1,307	6,632	0,092601	0,119085	0,211686
EE NÜVE	EE30	6,28930	0,052044	5	1	0,0573394	0,5	0,5	2,002	10,550	0,088609	0,091892	0,180501
EC NÜVE	EC35	6,52482	0,047099	10	2	0,0370700	0,5	0,5	2,002	10,550	0,142311	0,030671	0,172982
ETD NÜVE	ETD29	5,47200	0,052116	10	2	0,0411184	0,5	0,5	2,002	10,550	0,143117	0,033677	0,176794
PQ NÜVE	PQ20/20	2,81480	0,075998	5	1	0,1008065	0,5	0,5	1,651	8,367	0,073021	0,178326	0,251347

Çizelge 6.6 Üçüncü sayısal örneğin tasarım sonuçları (100 °C)

	Nüve Çeşidi	V _c (cm ³)	ΔB _{opt} (T)	N1	N2	ΔB (T)	α1	α2	Aw1 (mm ²)	Aw2 (mm ²)	P _{cu,Tot} (W)	P _{fe} (W)	P _{tot} (W)
POT NÜVE	2213	2,000250	0,0912939	5	1	0,0984252	0,5	0,5	1,307	6,632	0,123540	0,119085	0,242625
EE NÜVE	EE30	6,289300	0,055409	5	1	0,0573394	0,5	0,5	2,002	10,550	0,118214	0,091892	0,210106
EC NÜVE	EC35	6,524820	0,050145	5	1	0,0741400	0,5	0,5	4,160	21,150	0,046497	0,185952	0,232449
ETD NÜVE	ETD29	5,472000	0,055487	5	1	0,0822368	0,5	0,5	4,160	21,150	0,046760	0,204181	0,250941
PQ NÜVE	PQ26/20	5,509700	0,057287	5	1	0,0525210	0,5	0,5	1,651	6,632	0,140595	0,064075	0,204670

Çizelge 6.7 Dördüncü sayısal örneğin tasarım sonuçları (25 °C)

	Nüve Çeşidi	V _c (cm ³)	ΔB _{opt} (T)	N1	N2	N3	ΔB (T)	α1	α2	α3	Aw1 (mm ²)	Aw2 (mm ²)	Aw3 (mm ²)	P _{cu,Tot} (W)	P _{fe} (W)	P _{tot} (W)
POT NÜVE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EE NÜVE	EE60	27,170	0,12165	22	1	3	0,07361	0,39583	0,20865	0,09375	1,0390	13,300	2,002	3,616175	0,233856	3,850031
EC NÜVE	EC41	10,805	0,19748	22	1	3	0,15026	0,39583	0,20865	0,09375	0,5188	6,632	1,039	2,979968	0,594656	3,574623
ETD NÜVE	ETD39	11,513	0,19222	22	1	3	0,14545	0,39583	0,20865	0,09375	0,6531	8,367	1,307	3,061638	0,582203	3,643841
PQ NÜVE	PQ35/35	17,228	0,15025	22	1	3	0,09276	0,39583	0,20865	0,09375	0,6531	8,367	1,039	3,506658	0,270551	3,777209

Çizelge 6.8 Dördüncü sayısal örneğin tasarım sonuçları (100 °C)

	Nüve Çeşidi	V _c (cm ³)	ΔB _{opt} (T)	N1	N2	N3	ΔB (T)	α1	α2	α3	Aw1 (mm ²)	Aw2 (mm ²)	Aw3 (mm ²)	P _{cu,Tot} (W)	P _{fe} (W)	P _{tot} (W)
POT NÜVE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EE NÜVE	EE70/68/19	29,16	0,09611	22	1	3	0,05612	0,39583	0,20865	0,09375	2,6260	33,63	5,241	2,074444	0,123948	2,198392
EC NÜVE	EC52	18,90	0,15315	22	1	3	0,10101	0,39583	0,20865	0,09375	0,8228	10,55	1,651	3,541748	0,370360	3,912107
ETD NÜVE	ETD44	17,92	0,15762	22	1	3	0,10449	0,39583	0,20865	0,09375	0,8228	10,55	1,651	3,598415	0,383556	3,981972
PQ NÜVE	PQ40/40	20,50	0,14179	22	1	3	0,09046	0,39583	0,20865	0,09375	1,0390	10,55	1,651	3,613210	0,301548	3,914758

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada güç elektroniği dönüştürücülerinde endüktans ve transformatör tasarım ve optimizasyonu için kullanılan K_g ve K_{gfe} yöntemleri incelenmiştir. Bir tasarımda K_g yönteminin kullanılabilmesi için bakır kayıplarının nüve kayıplarına göre baskın olması gereklidir. K_g yöntemi manyetik alan dalgalanmasının çok fazla olmadığı uygulamalar için uygundur. Bu yöntemde izin verilen maksimum toplam bakır kaybı ve maksimum manyetik alan değerleri, devre şartlarına göre bellidir. K_{gfe} yöntemi nüve kayıplarının ihmal edilemeyecek kadar yüksek olduğu uygulamalarda kullanılır. Bu yöntemde izin verilen maksimum toplam güç kaybı değeri bellidir. Ancak maksimum manyetik alan değeri, nüve ve bakır kayıplarının toplamını minimize edecek şekilde belirlenir. Bu yöntemlerde yakınlık etkisi dâhil edilmemiştir. Yakınlık etkisini hesaba katmak için tasarım gerçekleştirildikten sonra sargılardaki katman sayıları belirlenerek kayıplar hesaplanır. Bu durumda iletkenin öz direnci yerine efektif öz direnç $\rho_{eff} = \rho(P_{Cu}/P_{dc})$ hesaba katılır. Burada P_{Cu} yakınlık etkisi dâhil bakır kaybı, P_{dc} ise bakırın DC direncinden dolayı meydana gelen kayıptır.

Endüktans ve transformatör tasarım ve optimizasyonu iteratif bir işlemdir. Bu nedenle tasarım ve optimizasyonun bir bilgisayar programı ile yapılması daha uygundur. Bu amaçla tezde verilmiş olan teorik bilgileri kullanan hazır programlar veya uygulamaya yönelik bir program geliştirilerek tasarım ve optimizasyon gerçekleştirilebilir. Bu tez çalışmasında Excel programı kullanılarak optimum tasarım parametreleri bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Serway, R.A. and Jewett, J.W., (2004). Physics for Scientists and Engineers, Sixth Edition, Thomson Brooks/Cole.
- [2] Griffiths, D.J., Introduction to Electrodynamics, Third Edition, Prentic Hall International (UK) Limited, 576, London; Çeviren: Ünal, B., (2003). Elektromagnetik Teori, Gazi Kitabevi Tic. Ltd. Şti., Ankara.
- [3] Pollack, G.L. and Stump, D.R., Electromagnetism, First Edition, Addison Wesley; Çeviren: Türkoz, Ş., Aydın, Z.Z. ve Zengin, M., (2004). Elektromanyetik Teori, Gazi Kitabevi Tic. Ltd. Şti., Ankara.
- [4] Bossche, A.V. and Valchev, V.C., (2005). Inductors and Transformers for Power Electronics, First Edition, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
- [5] Boyanov, B., (2006), "Synthesis and Determination of Curie Temperature of Ferrites From The Systems $\text{BaO-CoO-ZrO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and $\text{BaO-NiO-ZrO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ", Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 41 (1):61-64.
- [6] Erickson, R.W. and Maksimovic, D., (2001). Fundamentals of Power Electronics, Second Edition, Kluwer Academic Publishers, 912.
- [7] Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P., (1995). Power Electronics, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., New York; Çeviren: Tuncay, N., Gökaşan, M. ve Boğosyan. S., (2010). Güç Elektroniği, Üçüncü Baskı, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- [8] Wikipedia, Litz Wire, http://en.wikipedia.org/wiki/Litz_wire, 14 Mayıs 2011
- [9] Bakan, A.F., (2008). "Anahtarlama Güç Kaynakları Tasarımı", YTÜ Ders notları, YTÜ, İstanbul.
- [10] Bodur. H., (2010). Güç Elektroniği, birinci baskı, Birsan Yayınevi, İstanbul.

FERİT NÜVE VERİLERİ

POT NÜVE VERİLERİ							
	Nüve Çeşidi	Geometrik Sabit	Geometrik Sabit	Kesit Alanı	Pencere Alanı	Sarım Başına İletken Uzunluğu	Manyetik yol uzunluğu
	(AH) (mm)	Kg (cm ⁵)	Kgfe (cm ⁴)	Ac (cm ²)	WA (cm ²)	(MLT) (cm)	Im (cm)
1	704	7,38E-07	0,000001610	0,070	0,000	1,46	1,00
2	905	1,83E-04	0,000256000	0,101	0,034	1,90	1,26
3	1107	6,67E-04	0,000554000	0,167	0,055	2,30	1,55
4	1408	2,11E-03	0,001100000	0,251	0,097	2,90	2,00
5	1811	9,45E-03	0,002600000	0,433	0,187	3,71	2,60
6	2213	2,71E-02	0,004900000	0,635	0,297	4,42	3,15
7	2616	6,91E-02	0,008200000	0,948	0,406	5,28	3,75
8	3019	0,180	0,014200000	1,380	0,587	6,20	4,50
9	3622	0,411	0,021700000	2,020	0,748	7,42	5,30
10	4229	1,150	0,041100000	2,660	1,400	8,60	6,81

EE NÜVE VERİLERİ							
	Nüve Çeşidi	Geometrik Sabit	Geometrik Sabit	Kesit Alanı	Pencere Alanı	Sarım Başına İletken Uzunluğu	Manyetik yol uzunluğu
	(A) (mm)	Kg (cm ⁵)	Kgfe (cm ⁴)	Ac (cm ²)	WA (cm ²)	(MLT) (cm)	Im (cm)
1	EE12	0,000731	0,00045800	0,140	0,085	2,28	2,70
2	EE16	0,002020	0,00084200	0,190	0,190	3,40	3,45
3	EE19	0,004070	0,00130000	0,230	0,284	3,69	3,94
4	EE22	0,008260	0,00180000	0,410	0,196	3,99	3,96
5	EE30	0,085700	0,00670000	1,090	0,476	6,60	5,77
6	EE40	0,209000	0,01180000	1,270	1,100	8,50	7,70
7	EE50	0,909000	0,02840000	2,260	1,780	10,00	9,58
8	EE60	1,380000	0,03640000	2,470	2,890	12,80	11,00
9	EE70/68/19	5,060000	0,12700000	3,240	6,750	14,00	9,00

EC NÜVE VERİLERİ						
	Nüve Çeşidi	Geometrik Sabit	Geometrik Sabit	Kesit Alanı	Pencere Alanı	Sarım Başına İletken Uzunluğu
	(A) (mm)	Kg (cm ⁵)	Kgfe (cm ^x)	Ac (cm ²)	WA (cm ²)	(MLT) (cm)
						Im (cm)
1	EC35	0,131	0,0099	0,843	0,975	5,3
2	EC41	0,374	0,0195	1,21	1,35	5,3
3	EC52	0,914	0,0317	1,8	2,12	7,5
4	EC70	2,84	0,0562	2,79	4,71	12,9

ETD NÜVE VERİLERİ						
	Nüve Çeşidi	Geometrik Sabit	Geometrik Sabit	Kesit Alanı	Pencere Alanı	Sarım Başına İletken Uzunluğu
	(A) (mm)	Kg (cm ⁵)	Kgfe (cm ^x)	Ac (cm ²)	WA (cm ²)	(MLT) (cm)
						Im (cm)
1	ETD29	0,0978	0,0085	0,76	0,903	5,33
2	ETD34	0,193	0,0131	0,97	1,23	6
3	ETD39	0,397	0,0198	1,25	1,74	6,86
4	ETD44	0,846	0,0304	1,74	2,13	7,62
5	ETD49	1,42	0,0410	2,11	2,71	8,51

PQ NÜVE VERİLERİ						
	Nüve Çeşidi	Geometrik Sabit	Geometrik Sabit	Kesit Alanı	Pencere Alanı	Sarım Başına İletken Uzunluğu
	(A) (mm)	Kg (cm ⁵)	Kgfe (cm ^x)	Ac (cm ²)	WA (cm ²)	(MLT) (cm)
						Im (cm)
1	PQ20/16	0,0224	0,0037	0,62	0,256	4,4
2	PQ20/20	0,0336	0,0048	0,62	0,384	4,4
3	PQ26/20	0,0839	0,0072	1,19	0,333	5,62
4	PQ26/25	0,125	0,0094	1,18	0,503	5,62
5	PQ32/20	0,203	0,0117	1,7	0,471	6,71
6	PQ32/30	0,384	0,0186	1,61	0,995	6,71
7	PQ35/35	0,82	0,0304	1,96	1,61	7,52
8	PQ40/40	1,2	0,0391	2,01	2,5	8,39

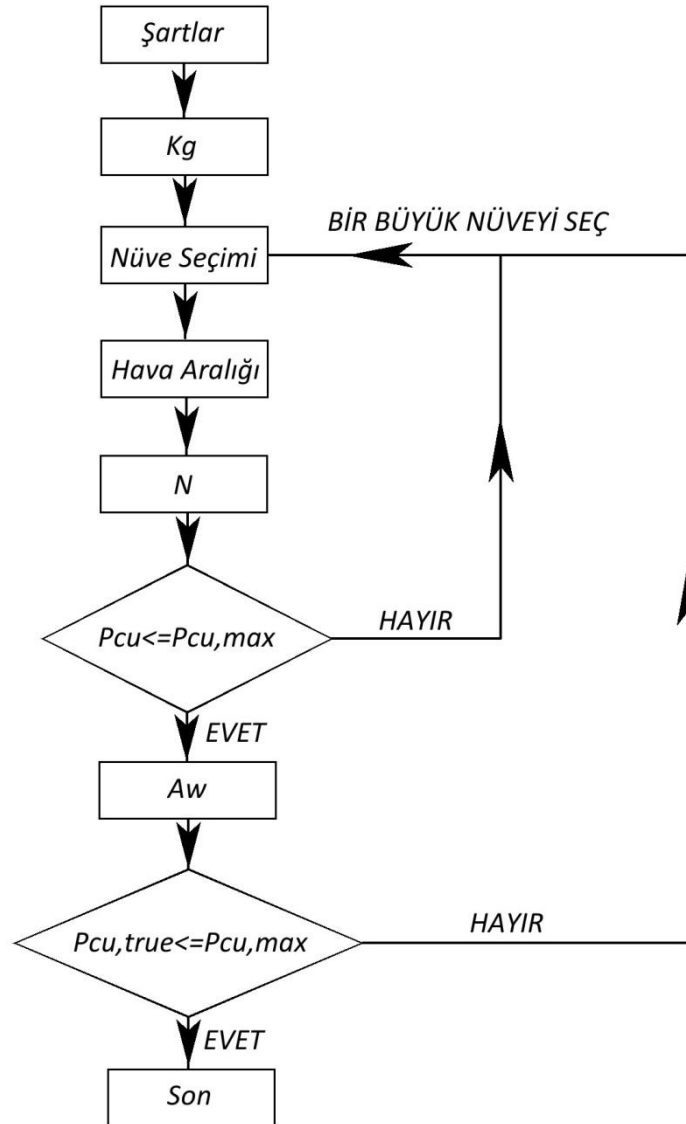
AMERİKAN TEL KALINLIĞI VERİLERİ

	AWG #	İletken Kesiti $\times 10^{-3} \text{ (cm}^2\text{)}$	Direnç $\times 10^{-6}$ (Ohm/cm)	Çap (cm)
1	0000	1072,3	1,608	1,168
2	000	850,3	2,027	1,04
3	00	674,2	2,557	0,927
4	0	534,8	3,224	0,825
5	1	424,1	4,065	0,735
6	2	336,3	5,128	0,654
7	3	266,7	6,463	0,583
8	4	211,5	8,153	0,519
9	5	167,7	10,28	0,462
10	6	133	13	0,411
11	7	105,5	16,3	0,366
12	8	83,67	20,6	0,326
13	9	66,32	26	0,291
14	10	52,41	32,9	0,267
15	11	41,6	41,37	0,238
16	12	33,08	52,09	0,213
17	13	26,26	69,64	0,19
18	14	20,02	82,8	0,171
19	15	16,51	104,3	0,153
20	16	13,07	131,8	0,137
21	17	10,39	165,8	0,122
22	18	8,228	209,5	0,109
23	19	6,531	263,9	0,0948
24	20	5,188	332,3	0,0874
25	21	4,116	418,9	0,0785
26	22	3,243	531,4	0,0701
27	23	2,508	666	0,0632
28	24	2,047	842,1	0,0566
29	25	1,623	1062	0,0505

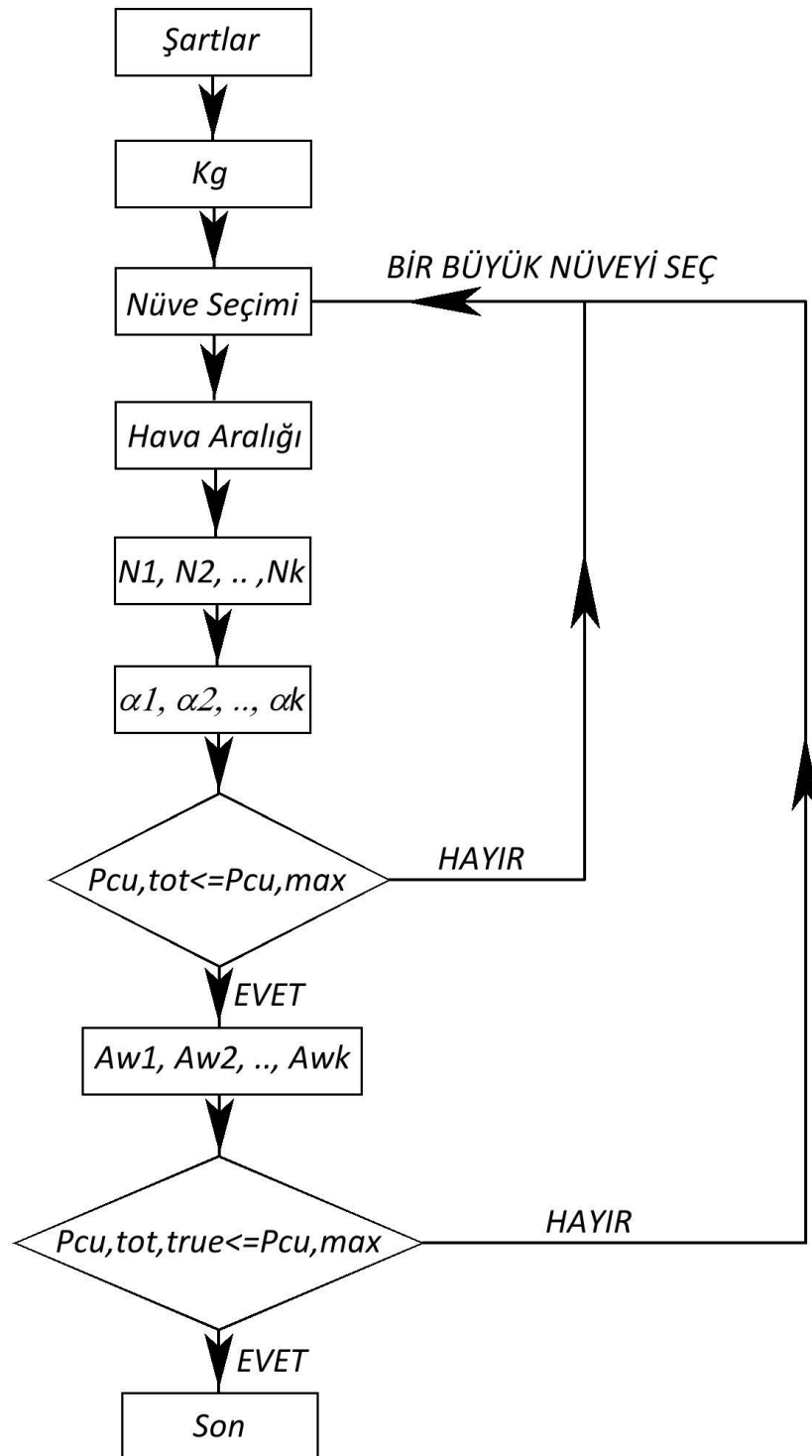
	AWG #	İletken Kesiti $\times 10^{-3} \text{ (cm}^2\text{)}$	Direnç $\times 10^{-6}$ (Ohm/cm)	Çap (cm)
30	26	1,28	1345	0,0452
31	27	1,021	1687,6	0,0409
32	28	0,8046	2142,7	0,0366
33	29	0,647	2664,3	0,033
34	30	0,5067	3402,2	0,0294
35	31	0,4013	4294,6	0,0267
36	32	0,3242	5314,9	0,0241
37	33	0,2554	6748,6	0,0236
38	34	0,2011	8572,8	0,0191
39	35	0,1589	10849	0,017
40	36	0,1266	13608	0,0152
41	37	0,1026	16801	0,014
42	38	0,08107	21266	0,0124
43	39	0,06207	27775	0,0109
44	40	0,04869	35400	0,0096
45	41	0,03972	43405	0,00863
46	42	0,03166	54429	0,00762
47	43	0,02452	70308	0,00685

ALGORİTMALAR VE EXCEL ÇÖZÜMLERİ

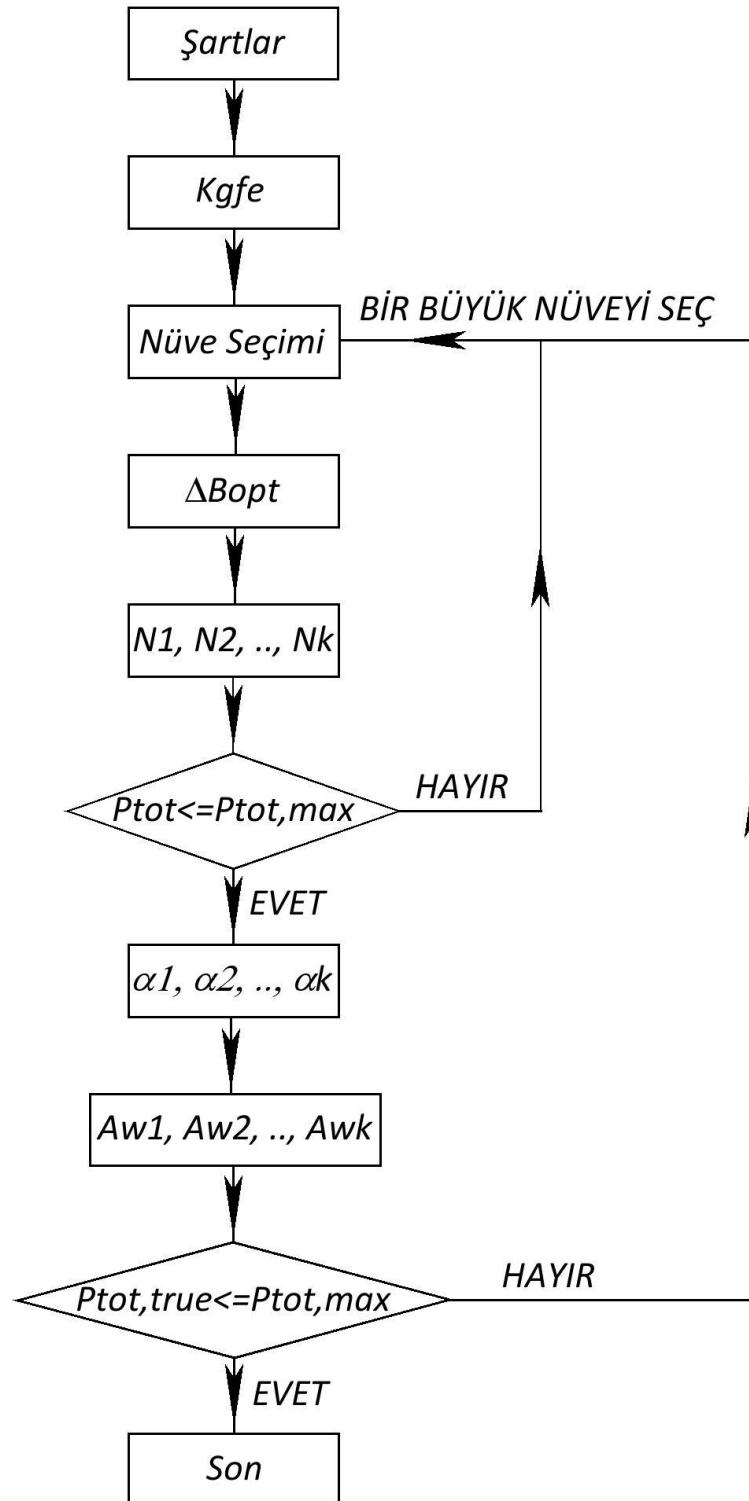
C-1 K_g Yöntemi ile Tek Sargılı Endüktans Tasarımı Algoritması



C-2 K_g Yöntemi ile Çok Sargılı Endüktans Tasarımı Algoritması



C-3 K_{gfe} Yöntemi ile Transformatör Tasarımı Algoritması



C-4 Excel Çözümleri

Mu0	1,257E-06
ro (Ohm-cm)	1,724E-06
L (H)	1,070E-03
I _{max} (A)	1,5000
B _{max} (A)	0,2500
Res (Ohm)	-
Ku	0,30
I _{tot} (A)	1,7700
P _{cuMax} (W)	1,5000
n ₂ /n ₁	0,15
I ₁ (A)	0,7960
I ₂ (A)	6,5000

Kg
0,0495

EE NÜVE

Nüve Çeşidi	WA (cm ²)	Ac (cm ²)	MLT (cm)	Im (cm)
EE30	0,48	1,090	6,60	5,77

I _g (m)
0,0004441

	N1	N2	N3	N4
	58,899	8,83		
TAM	59	9		

alpha1	alpha2
0,44972	0,55085

toplamlar	4,904E+03	6,213E+03
P _{cu,Tot} (W)	8,858E-01	

Aw1	Aw2
0,0010884688	0,00874011299

Sıra	AWG #	Aw x10 ⁻³	
31	27	1,021000	Aw1 (cm ²)
22	18	8,228000	Aw2 (cm ²)

P _{cu,1,2,true} (W)	0,41661375	0,52584305
P _{cu,Tot,true} (W)	0,94245680	

Mu0	1,257E-06	Kgfe	0,00937	EE NÜVE			
ro (Ohm-cm)	1,724E-06						
L (H)	-						
I _{max} (A)	-	Nüve Çeşidi	WA (cm ²)	Ac (cm ²)	MLT (cm)	Im (cm)	
B _{max} (A)	-	EE60	2,89	2,47	12,80	11,00	
Res (Ohm)	-						
Ku	0,25	DeltaBopt (T)	0,1216499				
Itot (A)	14,4000						
P _{cu} Max (W)	-						
N2/N1	0,045454545	N1	N2	N3	DeltaB (T)	0,0736106	
N3/N1	0,13636364	13,3122	0,6051	1,8153			
I1 (A)	5,70	TAM	22,00	1,00	3,000		
I2 (A)	66,10						
I3 (A)	9,90	alpha1	alpha2	alpha3			
P _{tot} Max (W)	4,000E+00	0,39583	0,20865	0,09375			
K _{fe}	7,60						
beta	2,60						
lamda1	8,00E-04	P _{cu} ,Tot (W)	3,0653476	P _{fe} (W)	0,23386	P _{tot} (W)	3,29920
		Aw1 (cm ²)	Aw2 (cm ²)	Aw3 (cm ²)			
		0,0129995265	0,15074889520	0,02257812500			
Sıra	AWG #	Aw x10 ⁻³					
21	17	10,3900	Aw1 (cm ²)				
10	6	133,0000	Aw2 (cm ²)				
18	14	20,0200	Aw3 (cm ²)				
P _{cu} ,1,2,3,true	1,518113	0,724934	0,324097				
P _{cu} ,Tot,true (W)	3,61617474						
P _{tot} ,true (W)	3,85003055						

C-5 Excel Makro Kodları

```
Sub calculator()  
Sheets("Analiz").Select  
Range("A3:H12").Select  
Selection.ClearContents
```

```
If Cells(15, 9).Value = "POT NÜVE" Then  
    Sheets("NuveCesit").Select  
    Range("A6:H15").Select  
    Selection.Copy  
    Sheets("Analiz").Select  
    Cells(3, 1).Select  
    ActiveSheet.Paste
```

```
ElseIf Cells(15, 9).Value = "EE NÜVE" Then  
    Sheets("NuveCesit").Select  
    Range("A22:H30").Select  
    Selection.Copy  
    Sheets("Analiz").Select  
    Cells(3, 1).Select  
    ActiveSheet.Paste
```

```
ElseIf Cells(15, 9).Value = "EC NÜVE" Then  
    Sheets("NuveCesit").Select  
    Range("A37:H40").Select  
    Selection.Copy  
    Sheets("Analiz").Select  
    Cells(3, 1).Select  
    ActiveSheet.Paste
```

```
ElseIf Cells(15, 9).Value = "ETD NÜVE" Then  
    Sheets("NuveCesit").Select  
    Range("A47:H51").Select  
    Selection.Copy  
    Sheets("Analiz").Select  
    Cells(3, 1).Select  
    ActiveSheet.Paste
```

```
ElseIf Cells(15, 9).Value = "PQ NÜVE" Then  
    Sheets("NuveCesit").Select  
    Range("A58:H65").Select  
    Selection.Copy  
    Sheets("Analiz").Select  
    Cells(3, 1).Select  
    ActiveSheet.Paste
```

```
End If
```

```
Kgfe = Cells(15, 5).Value  
PtotMax = Cells(28, 3).Value
```

```
counter = 0
```

```
For i = 1 To Cells(15, 10).Value
```

```
    If (Kgfe >= Cells(i + 2, 4).Value) Then  
        counter = counter + 1  
    End If
```

```
Next
```

```
sira = counter + 1
```

```
Cells(18, 5).Value = Cells(2 + sira, 2)  
Cells(18, 6).Value = Cells(2 + sira, 6)  
Cells(18, 7).Value = Cells(2 + sira, 5)  
Cells(18, 8).Value = Cells(2 + sira, 7)  
Cells(18, 9).Value = Cells(2 + sira, 8)
```

```
Line1:
```

```
Do While Cells(31, 9).Value > PtotMax * 1.05
```

```
    sira = sira + 1
```

```
    Cells(18, 5).Value = Cells(2 + sira, 2)  
    Cells(18, 6).Value = Cells(2 + sira, 6)  
    Cells(18, 7).Value = Cells(2 + sira, 5)  
    Cells(18, 8).Value = Cells(2 + sira, 7)  
    Cells(18, 9).Value = Cells(2 + sira, 8)
```

```
Loop
```

```
Aw1 = Cells(34, 5).Value  
Aw2 = Cells(34, 6).Value  
Aw3 = Cells(34, 7).Value
```

```
counter = 0
```

```
For i = 1 To 47
```

```
    If (Aw1 * 1000 <= Sheets("American Wire Gauge Data").Cells(i + 1, 3).Value) Then  
        counter = counter + 1  
    End If
```

```
Next
```

```
Cells(37, 4).Value = counter + 1
Cells(37, 5).Value = Sheets("American Wire Gauge Data").Cells(counter + 2, 2).Value
Cells(37, 6).Value = Sheets("American Wire Gauge Data").Cells(counter + 2, 3).Value
```

```
counter = 0
```

```
For i = 1 To 47
```

```
    If (Aw2 * 1000 <= Sheets("American Wire Gauge Data").Cells(i + 1, 3).Value) Then
        counter = counter + 1
    End If
```

```
Next
```

```
Cells(38, 4).Value = counter + 1
Cells(38, 5).Value = Sheets("American Wire Gauge Data").Cells(counter + 2, 2).Value
Cells(38, 6).Value = Sheets("American Wire Gauge Data").Cells(counter + 2, 3).Value
```

```
counter = 0
```

```
For i = 1 To 47
```

```
    If (Aw3 * 1000 <= Sheets("American Wire Gauge Data").Cells(i + 1, 3).Value) Then
        counter = counter + 1
    End If
```

```
Next
```

```
Cells(39, 4).Value = counter + 1
Cells(39, 5).Value = Sheets("American Wire Gauge Data").Cells(counter + 2, 2).Value
Cells(39, 6).Value = Sheets("American Wire Gauge Data").Cells(counter + 2, 3).Value
```

```
If Cells(43, 5).Value > PtotMax * 1.05 Then
```

```
    sira = sira + 1
```

```
    Cells(18, 5).Value = Cells(2 + sira, 2)
```

```
    Cells(18, 6).Value = Cells(2 + sira, 6)
```

```
    Cells(18, 7).Value = Cells(2 + sira, 5)
```

```
    Cells(18, 8).Value = Cells(2 + sira, 7)
```

```
    Cells(18, 9).Value = Cells(2 + sira, 8)
```

```
GoTo Line1
```

```
End If
```

```
If Cells(15, 9).Value = "POT NÜVE" Then
```

```
    Sheets("Sonuclar").Cells(2, 2).Value = Cells(18, 5)
```

```
    Sheets("Sonuclar").Cells(2, 3).Value = (Cells(18, 7) * Cells(18, 9))
```

```
    Sheets("Sonuclar").Cells(2, 4).Value = Cells(21, 5)
```

```
    Sheets("Sonuclar").Cells(2, 5).Value = Cells(25, 5)
```

```

Sheets("Sonuclar").Cells(2, 6).Value = Cells(25, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 7).Value = Cells(25, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 8).Value = Cells(24, 9)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 9).Value = Cells(28, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 10).Value = Cells(28, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 11).Value = Cells(28, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 12).Value = (Cells(37, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 13).Value = (Cells(38, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 14).Value = (Cells(39, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 15).Value = Cells(42, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 16).Value = Cells(31, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(2, 17).Value = Cells(43, 5)

```

Elseif Cells(15, 9).Value = "EE NÜVE" Then

```

Sheets("Sonuclar").Cells(3, 2).Value = Cells(18, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 3).Value = (Cells(18, 7) * Cells(18, 9))
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 4).Value = Cells(21, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 5).Value = Cells(25, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 6).Value = Cells(25, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 7).Value = Cells(25, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 8).Value = Cells(24, 9)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 9).Value = Cells(28, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 10).Value = Cells(28, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 11).Value = Cells(28, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 12).Value = (Cells(37, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 13).Value = (Cells(38, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 14).Value = (Cells(39, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 15).Value = Cells(42, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 16).Value = Cells(31, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(3, 17).Value = Cells(43, 5)

```

Elseif Cells(15, 9).Value = "EC NÜVE" Then

```

Sheets("Sonuclar").Cells(4, 2).Value = Cells(18, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 3).Value = (Cells(18, 7) * Cells(18, 9))
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 4).Value = Cells(21, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 5).Value = Cells(25, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 6).Value = Cells(25, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 7).Value = Cells(25, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 8).Value = Cells(24, 9)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 9).Value = Cells(28, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 10).Value = Cells(28, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 11).Value = Cells(28, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 12).Value = (Cells(37, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 13).Value = (Cells(38, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 14).Value = (Cells(39, 6) / 10)

```

```
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 15).Value = Cells(42, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 16).Value = Cells(31, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(4, 17).Value = Cells(43, 5)
```

```
Elseif Cells(15, 9).Value = "ETD NÜVE" Then
```

```
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 2).Value = Cells(18, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 3).Value = (Cells(18, 7) * Cells(18, 9))
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 4).Value = Cells(21, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 5).Value = Cells(25, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 6).Value = Cells(25, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 7).Value = Cells(25, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 8).Value = Cells(24, 9)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 9).Value = Cells(28, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 10).Value = Cells(28, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 11).Value = Cells(28, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 12).Value = (Cells(37, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 13).Value = (Cells(38, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 14).Value = (Cells(39, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 15).Value = Cells(42, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 16).Value = Cells(31, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(5, 17).Value = Cells(43, 5)
```

```
Elseif Cells(15, 9).Value = "PQ NÜVE" Then
```

```
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 2).Value = Cells(18, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 3).Value = (Cells(18, 7) * Cells(18, 9))
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 4).Value = Cells(21, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 5).Value = Cells(25, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 6).Value = Cells(25, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 7).Value = Cells(25, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 8).Value = Cells(24, 9)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 9).Value = Cells(28, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 10).Value = Cells(28, 6)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 11).Value = Cells(28, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 12).Value = (Cells(37, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 13).Value = (Cells(38, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 14).Value = (Cells(39, 6) / 10)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 15).Value = Cells(42, 5)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 16).Value = Cells(31, 7)
Sheets("Sonuclar").Cells(6, 17).Value = Cells(43, 5)
```

```
End If
```

```
End Sub
```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Aren Semerciyan
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.10.1984, İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : arensemer@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Fizik, Elektrik Müh.	YTÜ	2007,2008
Lise		Özel Getronagan Ermeni Lisesi	2001

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	AYK Elektronik	Ar-Ge
2008	Digitron Elektronik	Proje Asistanı
2007	ABB	Staj
2006	Teknik Döküm	Staj
2005	Teknik Döküm	Staj