

**YÜKSEK FREKANSLI MANYETİK MALZEMELERDE
DERİ VE YAKLAŞIM ETKİSİ SONUCU OLUŞAN
İLETKEN KAYIPLARININ HESAPLANMASI**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Hüseyin EMANET

(Enstitü No: 504981009)

101388

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001

Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Haziran 2001

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Emin TACER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. R. Nejat TUNÇAY

Prof. Dr. M. Sait TÜRKÖZ

17.07.2001
[Signatures]

HAZİRAN, 2001

ÖNSÖZ

Bilim ve teknolojinin gelişmesiyle, verimi artırmak diğer bir deyişle kayıpları en düşük seviyeye indirebilmek anlamında, yüksek frekansta deri ve yaklaşım etkileri, sargı tasarımında en önemli konuların başında gelmektedir.

Yüksek Lisans Tezi kapsamında hazırlamaya çalıştığım “Yüksek Frekanslı Manyetik Malzemelerde Deri Ve Yaklaşım Etkisi Sonucu Oluşan İletken Kayıplarının Hesaplanması,, konulu bu çalışmada yol gösterici katkılarından ötürü tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Emin Tacer Bey’e teşekkür ederim.

Haziran, 2001

Hüseyin EMANET



İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Yüksek Frekanslarda İletken Kayıpları	1
2. DERİ VE YAKLAŞIM ETKİSİ	2
2.1 Sonsuz Uzunluktaki Plaka Akımları Tarafından Üretilen Manyetik Alanlar	2
2.2 Alternatif Akımda Deri Etkisi	3
2.3 İçi Boş İletkende Deri Etkisi	7
2.4 Yüksek Frekansta Akım Dağılımları	8
2.5 İki Paralel İletkende Deri ve Yaklaşım Etkisi	9
2.6 Formülsüz Genel Yaklaşım Etkileri	11
3. SİNÜSOİDAL AKIMLAR İÇİN DOWELL' IN YAKLAŞIMI	12
3.1 Analiz için Basitleştirici Varsayımlar	12
3.2 Yuvarlak İletkenin Folyo Sargıya Dönüşümü	12
3.3 Dowell'ın Varsayımlarının Açıklamaları	13
3.4 Tek Tabakalı Sistemde Yaklaşım Etkileri	14
3.5 Çok Tabakalı Sistemde Yaklaşım Etkileri	15
3.6 Azalan İletken Kalınlığının Etkileri	16
3.7 Sargı Bölümleri ve mmk Diyagramları	17
3.8 Sinüsoidal Akımlar için Dowell' in Eşitlikleri	19

4. DOWELL'IN EŞİTLİKLERİNİN SİNÜSOİDAL OLMAYAN AKIMLARA UYGULANMASI	20
4.1 Dowell'ın Eşitliklerindeki Kısıtlar	20
4.2 Sinüsoidal Olmayan Akımlar İçin Sargı Kayıpları	20
4.3 Normalleştirilmiş Etkin Direnç Faktörü	21
4.4 Sargı Kayıplarını Bulmak İçin K_r Kullanılması	24
4.5 Üçgen Dalga Şekilli ve Darbe Akımları İçin K_r Eğrileri:	24
5. KAYIPLARIN AZALTILMASI İÇİN İLETKEN SEÇENEKLERİ	28
5.1 Litz İletkeni	28
5.2 En düşük Kayıp için Diğer Sargı Biçimleri	31
6. EN DÜŞÜK KAYIP İÇİN SARGI YAPILARI	32
6.1 Uygun Sargı Yapıları İle Kayıp Azaltma Yolları	32
6.2 Çoklu-İkincil Sargılarda Kayıpları Azaltma	36
7. AC VE DC AKIMLI İNDÜKTÖRLERDE İLETKEN KAYIPLARI	38
8. SİNÜSOİDAL OLMAYAN DALGA ŞEKLİNİN HARMONİK BİLEŞENLERİNİN HESAPLANMASI	41
8.1 Harmonik Formülleri İle İlgili Notlar	41
8.2 Seçilmiş 12 Dalga Şekli İçin Harmonik Formülleri	42
8.2.1 Genel tek kutuplu dalga şekli için harmonik formülleri	42
8.2.2 Tek kutuplu darbe katarı için harmonik formülleri	43
8.2.3 Trapez dalga için harmonik formülleri	43
8.2.4 Kare dalga için harmonik formülleri	44
8.2.5 Simetrik çift kutup darbe dalga şekli için harmonik formülleri	44
8.2.6 Simetrik çift kutup darbe katarı için harmonik formülleri	45
8.2.7 Asimetrik üçgen darbe dalgası için harmonik formülleri	46
8.2.8 Asimetrik üçgen dalga şekli için harmonik formülleri	46
8.2.9 Üçgen dalga şekli için harmonik formülleri	47
8.2.10 Testere dişi dalga şekli için harmonik formülleri	48
8.2.11 Yarım dalga doğrultulmuş kosinüs dalgası için harmonik formülleri	48
8.2.12 Tam dalga doğrultulmuş kosinüs dalgası için harmonik formülleri	49

8.3 Birleştirilmiş Dalga Şekillerinin Harmonikleri	49
8.3.1 Yükselme ve düşme süreleri	50
8.3.2 Ardışık dalga şekilleri için fourier dönüşümü	51
9. SİMÜLASYON PROGRAMININ TANITIMI VE TASARIM ÖRNEKLERİ	54
9.1 Filtre İndüktörü Tasarım Örneği	54
9.1.1 Çekirdek akı kaybı veya doyma sınırının incelenmesi	54
9.1.2 Sargı tasarımı	55
9.2 Simülasyon Programı	57
9.2.1 Gerçekleştirilen simülasyon programının tanıtımı	57
9.2.2 Program akış diyagramı	61
9.2.3 Simülasyon programına örneğin uygulanması	63
9.2.4 Simülasyon programıyla çizilen kayıp faktörü eğrileri	64
9.2.5 Simülasyon programı ile tasarım örnekleri	68
10. SONUÇLAR	71
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	74

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 : Metallerde bakır ile ilişkili özdirenç ve deri derinliği değerleri.....	5
Tablo 9.1 : Test sonuçları.....	57
Tablo 9.2 : Örnek sonuçlarının karşılaştırılması.....	64
Tablo 9.3 : Darbe akımı için kayıp faktörü ve en uygun sargı bölümü yükseklikleri	65
Tablo 9.4 : Testere dişi dalga şekli için kayıp faktörü değerleri.....	67



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Sonsuz uzunluktaki tabakalarda akım tarafından üretilen manyetik alan	2
Şekil 2.2	: Deri etkisi sonucu akımın yüzeyde yoğunlaşması.....	3
Şekil 2.3	: İletkendeki akım yoğunluğu.....	4
Şekil 2.6	: Yalıtılmış manyetik olmayan içi boş iletkenin direnç oranı.....	7
Şekil 2.7	: Düz baralarda akım ve alan dağılımları.....	8
Şekil 2.8	: Yaklaşım etkisi sonucu akım dağılımı.....	9
Şekil 2.9	: İki paralel iletkende akım dağılımı.....	10
Şekil 3.1	: Yuvarlak iletkenin folyo sargıya dönüşümü.....	13
Şekil 3.3	: Tek tabakalı sistemde yaklaşım etkisi.....	15
Şekil 3.4	: Çok tabakalı sistemde yaklaşım etkisi.....	16
Şekil 3.5	: Sargı tabakasında h / δ oranına göre akım dağılımı.....	17
Şekil 3.6	: İndüktör ve transformatör sargıları için mmk diyagramları.....	18
Şekil 4.1	: Tek kutuplu darbe için yükselme süresine göre kayıp faktörü eğrisi....	23
Şekil 4.2	: Üçgen dalga şekilli akımlar için kayıp faktörü (Kr) eğrisi.....	24
Şekil 4.3	: Darbe akımı için kayıp faktörü (Kr) eğrisi.....	25
Şekil 4.4	: Darbe akımı için en uygun sargı bölümü kalınlıkları (mh/δ) eğrisi.....	26
Şekil 4.5	: Darbe akımı için en uygun sargı bölümü kalınlığında Kr eğrisi.....	26
Şekil 4.6	: Kare dalgalar için en uygun sargı bölümü kalınlığı (mh/δ) eğrisi.....	26
Şekil 4.7	: Kare dalgalar için en uygun sargı bölümü kalınlığında Kr eğrisi.....	27
Şekil 5.1	: Litz iletkeninin eşdeğer folyo tabakalarına dönüşümü.....	28
Şekil 5.2	: Yüksek güçlü 50-60 Hz manyetikler için sürekli çaprazlamış çok şeritli Litz iletkeni.....	29
Şekil 5.3	: Litz iletkeninde üçgen dalga akımları için kayıp faktörü eğrisi.....	30
Şekil 5.4	: Litz iletkeninde darbe akımı için kayıp faktörü eğrisi.....	30
Şekil 5.5	: Litz iletkeninde kare dalga akımı için kayıp faktörü eğrisi.....	31
Şekil 6.1	: Birbirine bakan yüzeylerde akan akımlar.....	32
Şekil 6.2	: Spiral sarıli folyo sargılarına koyulmuş terminaller.....	33
Şekil 6.3	: Boylamasına kesilmiş ve katlanmış terminaller.....	33
Şekil 6.4	: Tek sarımlı radyal bağlantı.....	34
Şekil 6.5	: Çok sarımlı tek tabakalı eksenel bağlantılı selenoid sargısı.....	34
Şekil 6.6	: Çok sarımlı düzlemsel sargı.....	35
Şekil 6.7	: Tek sarımlı düzlemsel sargı.....	35
Şekil 6.8	: Tek sarım düzlemsel sargılar için en uygun bağlantı.....	36
Şekil 6.9	: Bölünmüş ikincil sargıların birincil sargıya göre yerleştirilişi.....	37
Şekil 6.10	: Bölünmüş ikincil sargıların bölünmüş birincil sargıya göre yerleştirilişi.....	37
Şekil 7.1	: Kritik akımın iki katında, AC+DC kayıplarında tabaka sayısının etkisi	38
Şekil 7.2	: Kritik akımında, AC+DC kayıplarında tabaka sayısının etkisi.....	39
Şekil 7.3	: Sargıdaki alan dağılımı.....	39
Şekil 8.1	: Genel tek kutuplu dalga şekli.....	42
Şekil 8.2	: Tek kutuplu darbe katarı.....	43
Şekil 8.3	: Trapez dalga.....	43
Şekil 8.4	: Kare dalga.....	44

Şekil 8.5 : Simetrik çift kutup darbe dalga şekli.....	44
Şekil 8.6 : Simetrik çift kutup darbe katarı.....	45
Şekil 8.7 : Asimetrik üçgen darbe dalgası.....	46
Şekil 8.8 : Asimetrik üçgen dalga şekli.....	46
Şekil 8.9 : Üçgen dalga şekli.....	47
Şekil 8.10 : Testere dişi dalga şekli.....	48
Şekil 8.11 : Yarım dalga doğrultulmuş kosinüs dalgası.....	48
Şekil 8.12 : Tam dalga doğrultulmuş kosinüs dalgası.....	49
Şekil 8.13 : 49. harmonikte kesilmiş kare dalga.....	50
Şekil 8.14 : Ardışık dalga şekillerinin harmonik analizi.....	52
Şekil 9.1 : Simülasyon programı ana menüsü.....	58
Şekil 9.2 : Simülasyon programı değer giriş ekranı.....	58
Şekil 9.3 : Simülasyon programı sonuç ekranı.....	59
Şekil 9.4 : Simülasyon programı sonuçları.....	60
Şekil 9.5 : Simülasyon programı değer giriş ekranına örneğin uygulanması.....	60
Şekil 9.6 : Program Akış Diyagramı.....	61
Şekil 9.7 : Program Akış Diyagramı (Devam).....	62
Şekil 9.8 : Örnek için simülasyon programı sonuç ekranı.....	63
Şekil 9.9 : Üçgen dalga şekli için kayıp faktörü eğrisi.....	65
Şekil 9.11 : Testere dişi dalga şekli için kayıp faktörü eğrisi.....	67
Şekil 9.12 : Testere dişi dalga şekilli akım için simülasyon programı sonuç ekranı	68
Şekil 9.13 : Simülasyon programı sonuçları.....	68
Şekil 9.14 : Tam dalga doğrultulmuş kosinüs dalgalı akım için simülasyon programı sonuç ekranı.....	69
Şekil 9.15 : Simülasyon programı sonuçları.....	69

SEMBOL LİSTESİ

μ_o	: Boşluğun geçirgenliği
μ_c	: İletken geçirgenliği
f	: Frekans
J	: Akım yoğunluğu
H	: Manyetik alan
B	: Akı yoğunluğu
ρ	: Yuvarlak iletken öz direnci
ρ'	: Eşdeğer folyo iletkenin öz direnci
δ	: Yuvarlak iletken deri derinliği
δ'	: Eşdeğer folyo iletkenin deri derinliği
m	: Tabaka sayısı
h	: Tabaka yüksekliği
I_n	: n. harmonik frekansındaki akımın genliği
R_{AC}	: AC direnci
R_{DC}	: DC direnci
Fr	: AC direncinin DC direncine oranı
Kr	: Kayıp faktörü
R_{W_n}	: n. harmonik frekansındaki sargının AC direnci
R_{W_o}	: Sargının DC direnci
Fr_n	: n. harmonik frekansındaki Fr
R_{we}	: Etkin sargı direnci
I_{rms}	: Etkin akım
$P_{kayıp}$	: Kayıp güç
n	: Harmonik derecesi
H_0	: DC bileşen genliği
H_1	: Temel bileşenin genliği
H_n	: n. harmonik genliği
Y	: Dalga şeklinin tepe değeri
T	: Dalga periyodu
t	: Darbe yükselme ve düşme süresi
T_a	: Darbe süresi ya da üçgenin yükselme süresi
T_b	: Üçgenin düşme süresi
D	: Çalışma oranı
H_{cn}	: n. harmonik için kosinüs genliği
H_{sn}	: n. harmonik için sinüs genliği
@	: Hava boşluğu

YÜKSEK FREKANSLI MANYETİK MALZEMELERDE DERİ VE YAKLAŞIM ETKİSİ SONUCU OLUŞAN İLETKEN KAYIPLARININ HESAPLANMASI

ÖZET

Bu çalışmada yüksek frekanslı transformatör ve indüktör sargılarında, deri ve yaklaşım etkisi sonucu oluşan sargı kayıpları incelenmiştir.

İlk olarak manyetik alan bilgileri, deri derinliği tanımı ve yaklaşım etkisi açıklanmıştır. Daha sonra Dowell 'ın sargı dönüşümü gösterilmiş ve sinüsoidal akımlar için eşitlikleri sunulmuştur.

İkinci aşamada Dowell 'ın sinüsoidal akımlar için geçerli olan eşitlikleri sinüsoidal olmayan dalgalara uygulanmıştır. Çeşitli dalgalar için sargı kayıp faktörü eğrileri verilmiştir. Deri ve yaklaşım etkisi sonucu oluşan güç kayıplarını en düşük seviyede tutabilmek için gerekli olan en uygun sargı yüksekliği seçimi açıklanmıştır.

Bir sonraki kısımda besleme akımındaki harmoniklerin sargı kaybındaki önemi anlatılmıştır. Harmonik bakımından zengin olan akımlarla beslenen sargıların kayıplarının daha fazla olduğu görülmüş ve bu sargılardaki kayıpları azaltabilmek için daha ince sargı kalınlıkları kullanılmıştır. Kayıpları azaltmak için kullanılabilecek iletken seçenekleri verilmiştir. Yüksek frekans uygulamalarda sıkça kullanılan litz iletkeninin eşdeğer folyo tabakasına dönüşümü gösterilmiştir. Dönüşüm sonucunda bir genelleme yapılarak damar sayısı ve tabaka sayısı arasında bir ilişki kurulmuştur. Çeşitli akım dalga şekillerinde litz iletkeni için kayıp faktörü eğrileri çizilmiştir. Kayıpları azaltmak için sargı yapıları anlatılmıştır. İndüktördeki iletken kayıpları incelenmiştir. Akım dalga şekilleri için harmonik hesabı gösterilmiştir.

Son bölümde sargı tasarım örneği sunulmuş, aynı örnek simülasyon programına uygulanmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra değişik dalga şekilli akımlar için simülasyon programıyla sargı kayıpları incelenmiş, sonuçlar ve öneriler üzerinde durulmuştur.

CALCULATION OF THE CONDUCTOR LOSSES IN HIGH FREQUENCY MAGNETICS CAUSED BY SKIN AND PROXIMITY EFFECTS

SUMMARY

In this thesis, in high frequency transformer and inductor windings, winding losses which are caused by skin and proximity effect, have been analysed.

First of all, magnetic field knowledge, skin depth and proximity effect have been explained then Dowell's winding transformation has been shown and equations of that have been represented for sinusoidal current.

In the second stage, Dowell's equations for sinusoidal currents have been applied to non-sinusoidal waves. Winding loss factor curves have been given for different waves. Selection of optimum winding thickness has been explained to keep winding losses at minimum.

In the next part, importance of supply current's harmonics in the winding loss has been explained. It has been observed that the losses of windings supplied by the current including many harmonics are more higher and in order to reduce losses of these windings, thinner windings have been used. Transformation of litz-wire which is often used in high frequency applications to equivalent foil winding has been shown. According to the transformation results, a relation has been developed between number of strands and number of layer. Loss factor curves for litz-wire and different waveforms has been drawn. To reduce loss, winding structures have been explained. Conductor losses in inductor have been examined. For current waveform harmonic calculation has been shown.

In the last part, winding design sample has been given and the same sample has been applied to simulation program and results have been compared. Then for the currents with different waveform, winding losses have been evaluated by using simulation program and results and recommendations have been given.

1. GİRİŞ

1.1 Yüksek Frekanslarda İletken Kayıpları

Yüksek frekanslarda akım iletkenin içinde düzgün olarak dağılmaz. Bu nedenle iletken kayıpları beklenen seviyeden çok daha fazla çıkar. Transformatör ve indüktör sargılarındaki bu aşırı güç kaybı, sargı sıcaklığının artması ve verimin azalması ile sonuçlanır.

Bu çalışmada, transformatör ve indüktör sargılarında önemli bir kayba yol açan, “Deri ve Yaklaşım etkisi” diye bilinen kavramlar çeşitli açılardan incelenmiştir.

Bilindiği gibi alternatif akımla beslenen bir sargının direnci, doğru akım direncine eşit olmaz. Bu, alternatif akımın iletkenin kesitine düzgün olarak dağılmamasından kaynaklanır. Akım iletken kesitinin belirli kısımlarında yoğunlaştığı için sargı direncinde bir artış söz konusu olur. Uygun iletken kesiti seçilmediğinde alternatif akım direnci doğru akım direncinden 100 kat daha fazla çıkabilir. Bu ise sargı kayıplarının aynı oranda artması anlamına gelmektedir.

Deri ve yaklaşım etkisi sonucunda oluşan kayıpları en düşük seviyelere indirmek için en uygun sargı boyutunun nasıl seçileceği anlatılmış, sargı yapıları ve iletken çeşitleri açıklanmıştır.

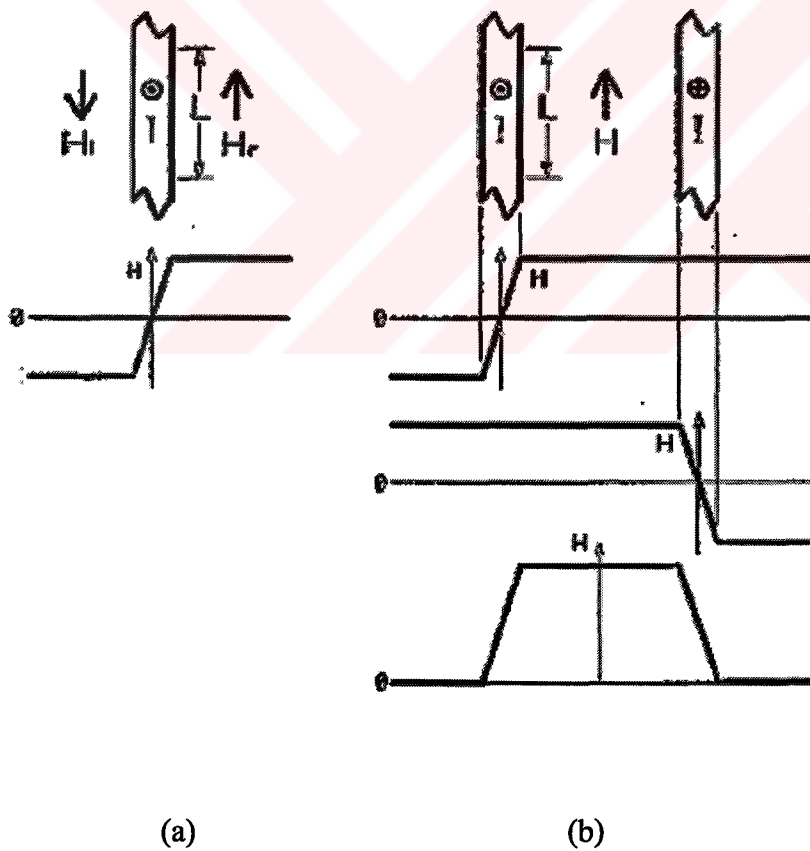
Sargı kayıplarında önemli bir rolü olan besleme akımındaki harmonikler, deri ve yaklaşım etkisi ile birlikte düşünülmüştür. Dowell 'ın geliştirmiş olduğu sargı dönüşümü ve denklemlerine, besleme akımı harmonik bilgileri de eklenerek bir simülasyon programı yapılmıştır. Bu simülasyon programında besleme akımı ve sargı boyutu bilgileri kullanılarak, alternatif akım direncinin doğru akım direncine oranı olan kayıp faktör eğrisi çizilmiştir. Daha sonra eğriden faydalanarak belirtilen özellikleri içeren sargının kayıpları bulunmuş ve kaybı azaltabilmek için gerekli olan sargı yüksekliği hesaplanmıştır. Sonuçlar çeşitli açılardan yorumlanmıştır.

2. DERİ VE YAKLAŞIM ETKİSİ

2.1 Sonsuz Uzunluktaki Plaka Akımları Tarafından Üretilen Manyetik Alanlar

Sonsuz uzunluktaki plakada akan düzgün bir akım, plakanın her bir yüzeyinde düzgün zıt kutuplu manyetik alan oluşturur.[1]

Şekil 2.1’ de gösterildiği üzere, eşit zıt yönlü akım taşıyan, karşılıklı duran iki paralel plakada, plakalar arasında alanlar toplanır, dış kısmında ise birbirlerini yok ederler. İki plaka devamlı bir çevrimde akımın akmasını sağlamak için birleştirildiğinde bu alan dağılımı değişmez.



Şekil 2.1 Sonsuz uzunluktaki tabakalarda akım tarafından üretilen manyetik alan

$$H_r = -H_l = \frac{2\pi I}{10L} \quad (2.1)$$

$$H = H_r - H_l = \frac{4\pi I}{10L} \quad (2.2)$$

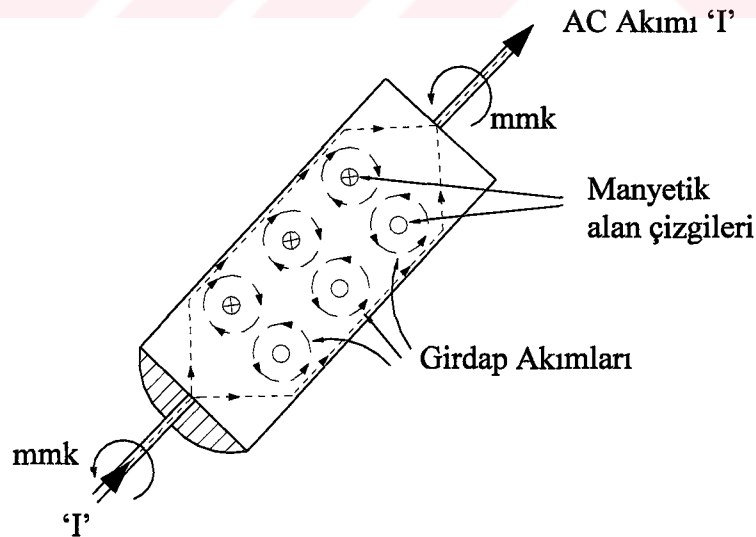
Bu, sonsuz uzunluktaki selonoid şeklidir. Selonoidin alanı iç kısımda düzgün, ölçü ve şekilden bağımsızdır, dışında ise sıfırdır. Eğer selonoid plaka yerine sargıdan oluşursa manyetik alan bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l} = 1.257 \frac{NI}{l} \quad (2.3)$$

Selonoidin birim uzunluğundaki akım, selonoidin içindeki manyetik alanı tek başına belirlemeye yeter. İletkene teğet manyetik alan bununla ilişkili yüzey akımları üretir. Temelde birbirleriyle alakalıdır. Birinin üretilmesi diğerini yaratır. İletken tabakaların üzerlerine yerleştirilmiş olan daimi mıknatıs bir sürekli akımın akmasına neden olmaz (süper iletken hariç).

2.2 Alternatif Akımda Deri Etkisi

Şekil 2.2' de akım taşıyan yalıtılmış bir iletkenin oluşturduğu manyetik alan gösterilmiştir. Alternatif akımlar sonucu iletkende mmk oluşur, bu da girdap akımlarının oluşmasına neden olur. [1,2]

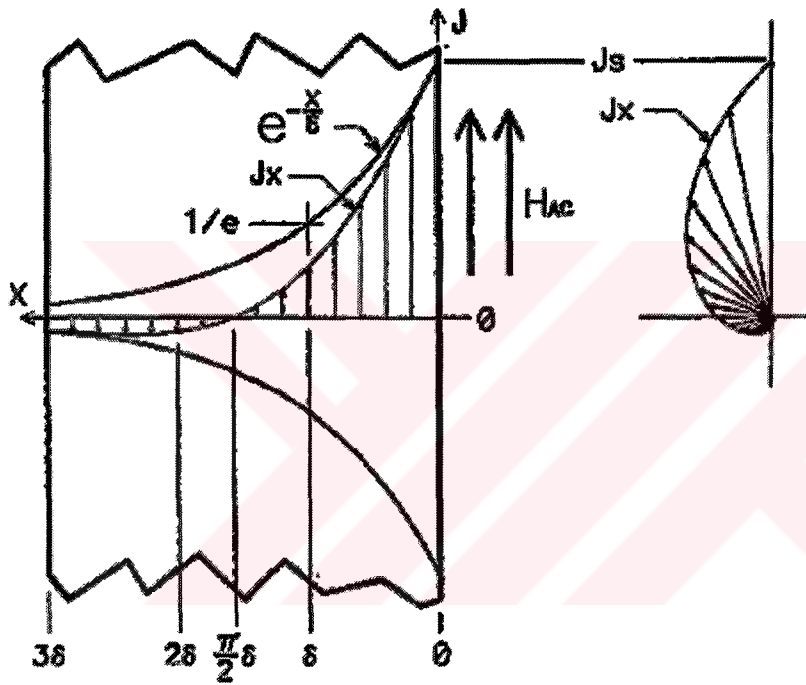


Şekil 2.2 Deri etkisi sonucu akımın yüzeyde yoğunlaşması

Girdap akımlarının doğrultusu iletken yüzeyindeki akımı kuvvetlendirecek yönde, iletkenin merkezinde ise akımı zayıflatacak yöndedir. Girdap akımları, akımın iletkenin yüzeyinde daha yoğun akmasına neden olur. Deri etkisi diye tanımlanan bu

etki sonucunda AC direnci DC direncine oranla çok daha büyük olur. Bu sebeple aşırı güç kayıpları oluşur ve sargı sıcaklığı artar.

Eğer akım yüksek frekanslarda sabit kalmak yerine alternatif kutuplu olursa, akım iletkenin içine girmez ve Şekil 2.3' teki gibi yüzeyden üstel olarak azalır. Akım yoğunluğu, iletkenin yüzeyindeki akım yoğunluğu değerinin $1/e$ 'sine düştüğü yer ile yüzey arasındaki uzaklık deri derinliği olarak tanımlanır. AC akım vektör şekli bir logaritmik spiral şeklindedir.



Şekil 2.3 İletkendeki akım yoğunluğu

İletkendeki akım yoğunluğu değeri aşağıdaki gibidir.

$$J_x = J_s \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \cdot \cos\left(\omega t + \frac{x}{\delta}\right) \quad (2.4)$$

Deri kalınlığı yüksek frekanslı iletkenin kayıp hesabında kullanılan temel kavramlardan biridir ve değeri (2.5) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_o \mu_c f}} \quad (2.5)$$

δ : deri derinliği

ρ : iletken özdirenci

μ_o : boşluğun geçirgenliği

μ_c : iletken geçirgenliği

f : frekans

Bakır için deri kalınlığı,

$$\delta = 6.6 / \sqrt{f} \quad 20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de } (\rho = 1.70 \times 10^{-6} \Omega.\text{cm}) \quad (2.6)$$

$$\delta = 7.1 / \sqrt{f} \quad 60 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de } (\rho = 1.99 \times 10^{-6} \Omega.\text{cm}) \quad (2.7)$$

$$\delta = 7.6 / \sqrt{f} \quad 100 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de } (\rho = 2.28 \times 10^{-6} \Omega.\text{cm}) \quad (2.8)$$

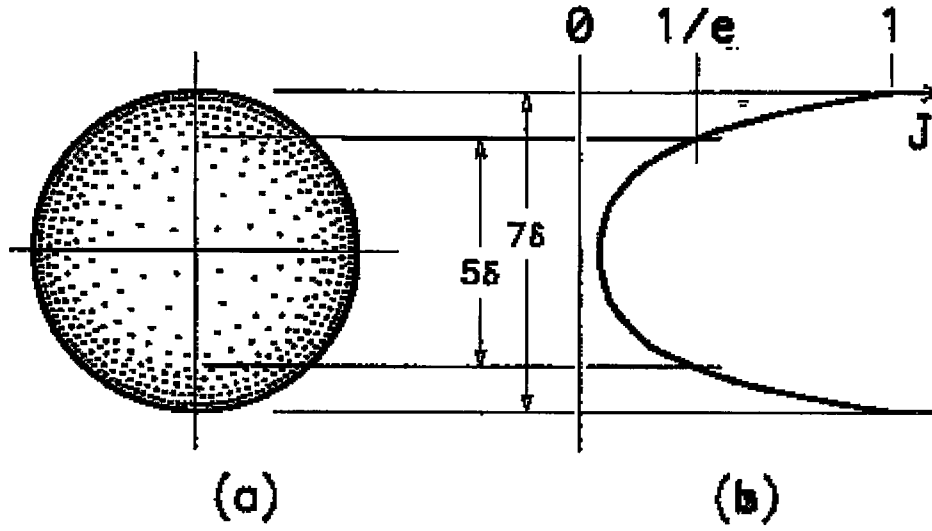
Diğer yaygın metaller için bakırla ilişkili olarak ,

Tablo 2.1 Metallerde bakır ile ilişkili özdirenç ve deri derinliği değerleri

Metal	ρ .	δ .
Bakır	1.00	1.00
Alüminyum	1.69	1.30
Pirinç	4.0	2.0

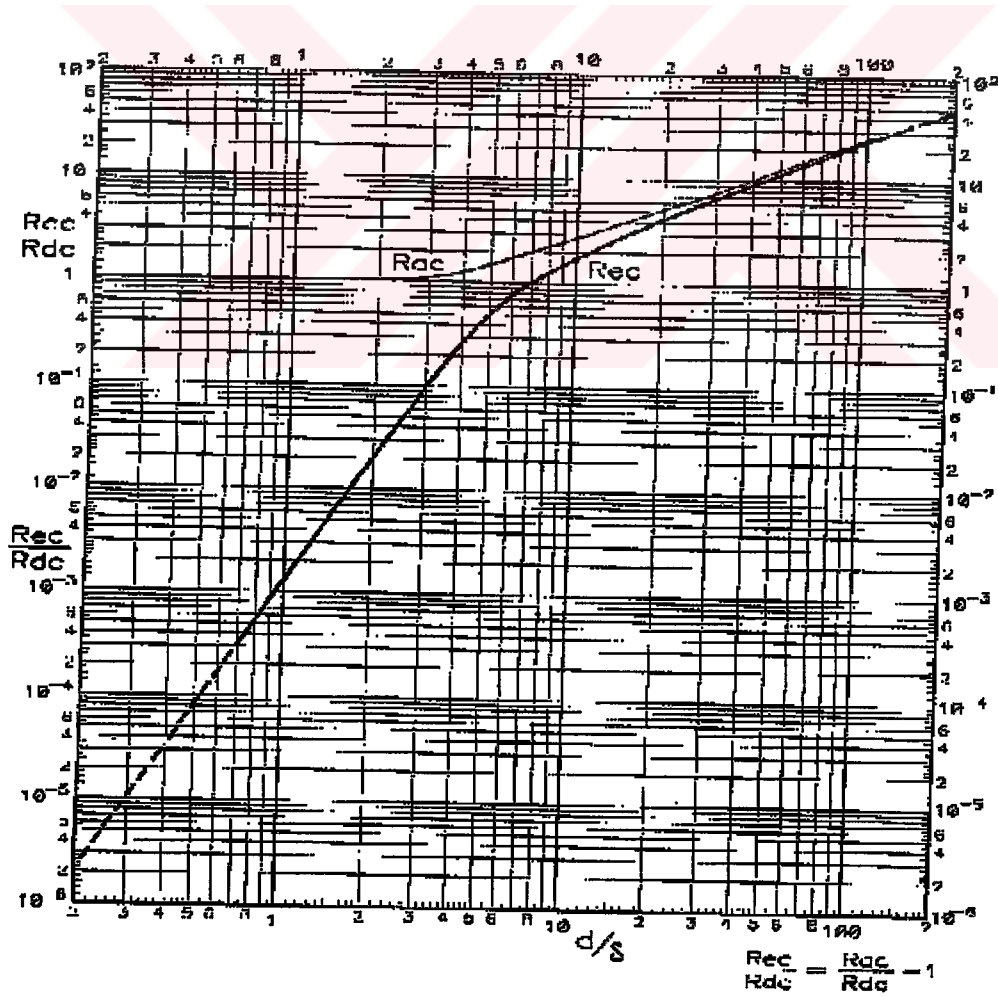
Yedi deri kalınlığı çapındaki bir yuvarlak iletkendeki tipik akım dağılımı Şekil 2.4' te gösterilmiştir. Deri kalınlığının fiziksel önemi yüksek frekanslarda iletken kayıplarında görülür. Toplam akım iletkenin dış tabakasındaki bir kalınlıkta düzgün olarak akıyormuş gibi davranır. İçerdeki 5 deri derinliği büyüklüğündeki bölüm etkili olarak hiç akım taşımadığı için iletkenin AC direncinin DC direncine oranı yaklaşık 2:1 olur.

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{7^2}{7^2 - 5^2} \cong 2$$



Şekil 2.4 Yuvarlak iletkende tipik akım dağılımı

Şekil 2.5' te yalıtılmış yuvarlak iletken, çap ve deri derinliği ile ilişkili olarak kayıp eğrileri çizilmiştir.

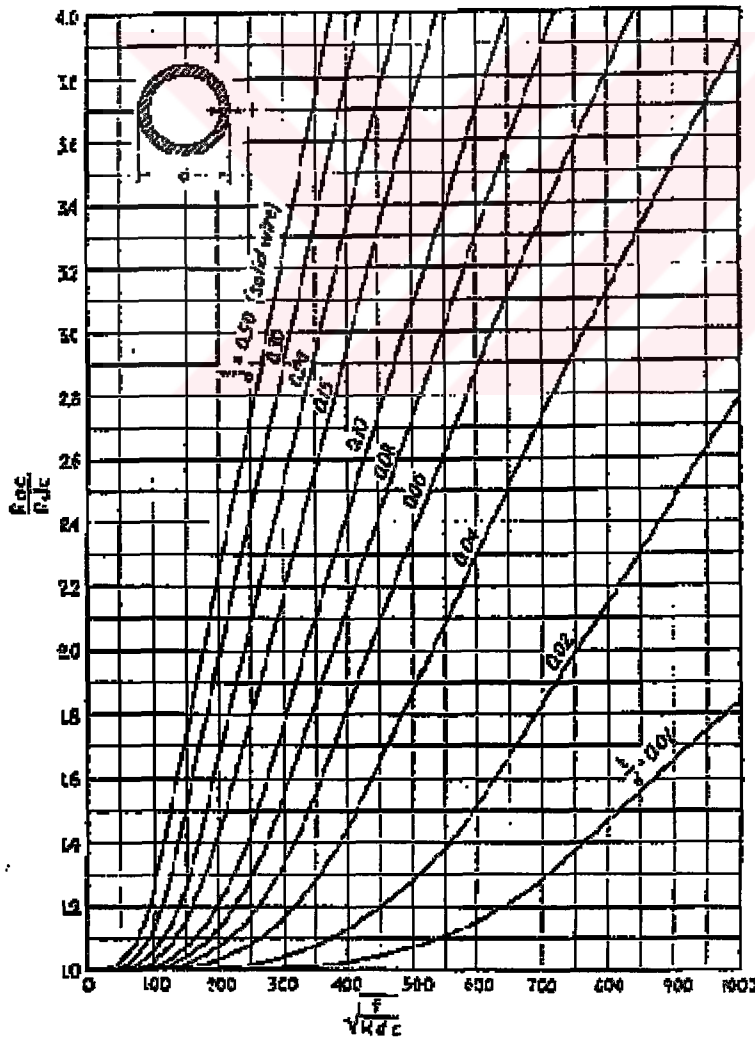


Şekil 2.5 Girdap akımı kayıp direnci R_{ec} ve toplam kayıp direnci R_{ac}

2.3 İçi Boş İletkende Deri Etkisi

60 Hz kadar düşük frekanslarda bile deri derinliği bakırda yaklaşık olarak 1 cm 'dir. İçi boş iletkenler bazen iletken malzemesinden tasarruf etmek için güç iletim sistemlerinde uygulanır. Çelik veya diğer sert yapılar kullanılır. [1]

İçi boş iletkenler için R_{AC}/R_{DC} oranı eğrileri Şekil 2.6' da gösterilmiştir. Bunlar bizim alanımızla az ilgilidir ve üzerinde durulmamıştır. Eğer duvar kalınlığı deri kalınlığından daha az ise R_{AC}/R_{DC} oranı bir birime yaklaşır, eğer duvar kalınlığı deri kalınlığından daha büyük ise AC direnci içi boş bir iletkenin DC direncine eşit olur.

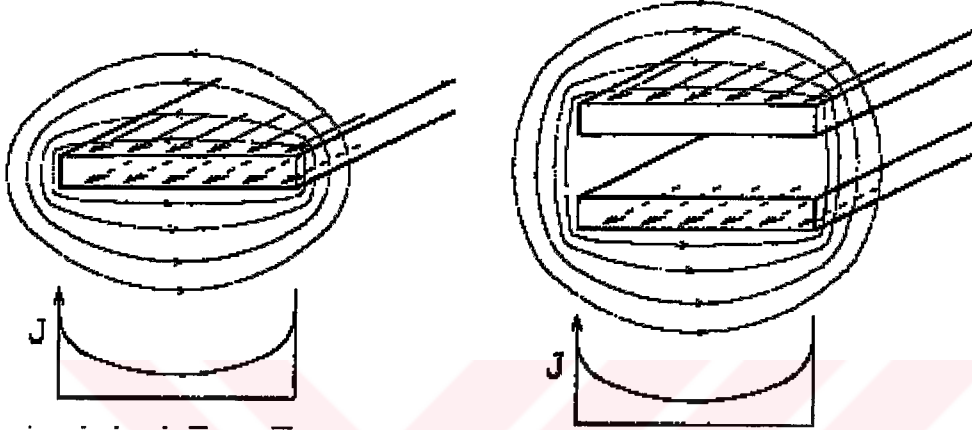


Şekil 2.6 Yalıtılmış manyetik olmayan içi boş iletkenin direnç oranı

2.4 Yüksek Frekansta Akım Dağılımları

Deri kalınlığının iletken boyutlarından çok küçük olduğu varsayımı sonucunda bütün akım iletkenin yüzeyinde çok ince bir deride akar (J : yüzey akımı yoğunluğu).

Şekil 2.7' de düz baralarda akım ve alan dağılımına ilişkin şekiller verilmiştir.

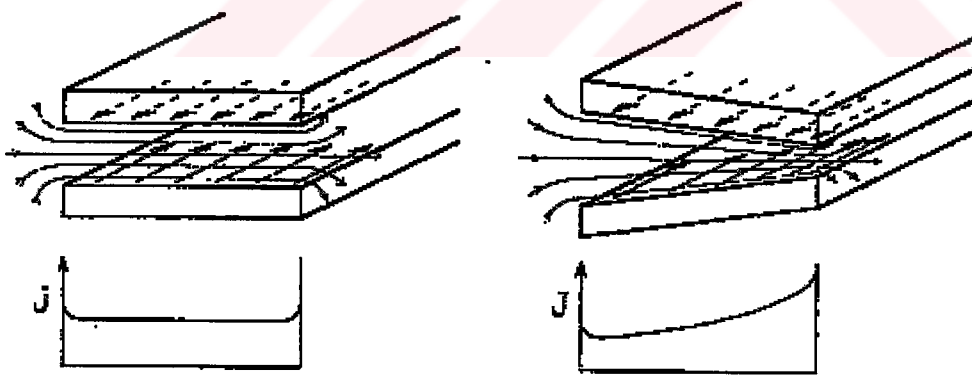


(a) Yalıtılmış bara

(akım yoğunluğu baranın kenarlarında)

(b) Paralel baralar, Paralel akımlar

(baranın iç kısımda akım yok)



(c) Paralel baralar, Ters yönlü akımlar

(akım iç kısımda düzgün)

(d) Eşit olmayan aralıklı baralar, Ters yönlü akımlar

(iç kısımdaki akım boşlukla ters orantılı)

Şekil 2.7 Düz baralarda akım ve alan dağılımları

Aşağıdaki üç kavramın bu noktada açıklanması gerekir.

- 1) İletken yol boyunca akımın devamlılığı 'I' (J akım yoğunluğu değişebilir).
- 2) Manyetik yol boyunca akımın devamlılığı (akı yoğunluğu B değişebilir).
- 3) H ile yüzey akımı yoğunluğu arasındaki sınır koşulu :

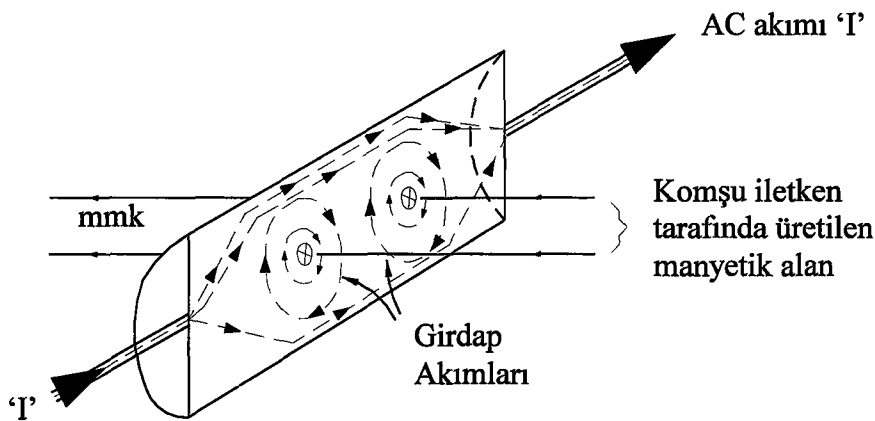
$$H = \frac{4\pi}{10} J = \frac{B}{\mu} \quad (2.9)$$

Diğer yardımcı kavramlar;

- 4) Paralel olmayan akımlar birbirlerini çekerken paralel akımlar birbirlerini iter.
- 5) Manyetik alan çizgileri uzunluğu kısaltacak şekildedir ve birbirlerini iterler.

2.5 İki Paralel İletkende Deri ve Yaklaşım Etkisi

Şekil 2.8' de iki veya daha fazla iletkenin etkileşimi sonucunda akımın iletkende düzgün olarak dağılamadığı gösterilmiştir. Komşu iletkenlerin akımları nedeniyle oluşan mmk iletkende girdap akımlarının oluşmasına neden olur. Bu girdap akımları, iletkenlerdeki akım zıt yönlüyse, akımın iletkenlerin birbirine bakan yüzeylerde yoğunlaşmasına neden olur, iletkendeki akımlar aynı doğrultuda ise akım yoğunluğu dış yüzeylerde artar. Yaklaşım etkisi diye bilinen bu etki deri etkisinden çok daha fazla etkilidir. [1,2]



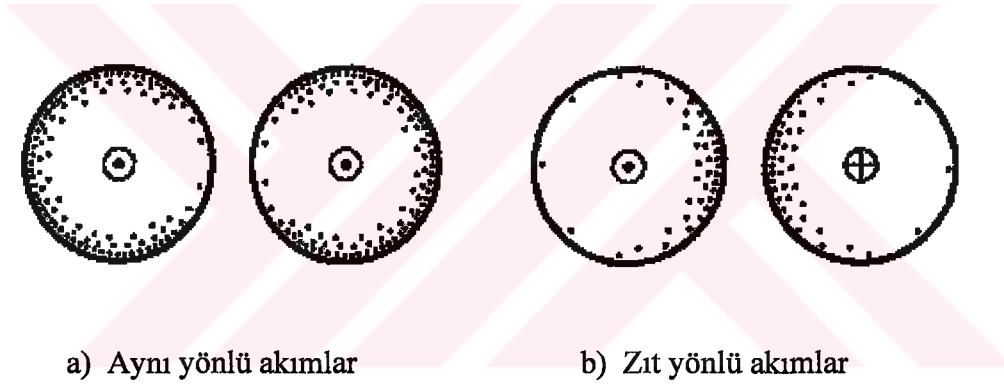
Şekil 2.8 Yaklaşım etkisi sonucu akım dağılımı

Yüksek frekansta akım taşıyan iki iletken çaplarının üç katı kadar birbirlerine yaklaştırılırlarsa yalıtılmış iletkenlerdeki deri etkisi kaybını aşan bir oranda kayıpta

bir yükselme olur. Kayıp artışının derecesi akım doğrultusu ile ilişkilidir. Şekil 2.9' da akım dağılımları gösterilmiştir.

Eğer akımlar aynı yöndeysse, herbir akım tarafından üretilen manyetik akılar, iletkenler arasında birbirlerini yok etme eğilimindedir. İletkenler dışında ise birbirlerine eklenirler. Bu yüzden iletkenler arasında akı daha düşüktür. Akım yoğunluğu birbirlerine bakan yüzeylerde azalır, iletkenler birbirlerine dokunsalar bile akım dairenin dışında düzgün olarak akacaktır ve direnç artışı yavaş yavaş olacaktır.

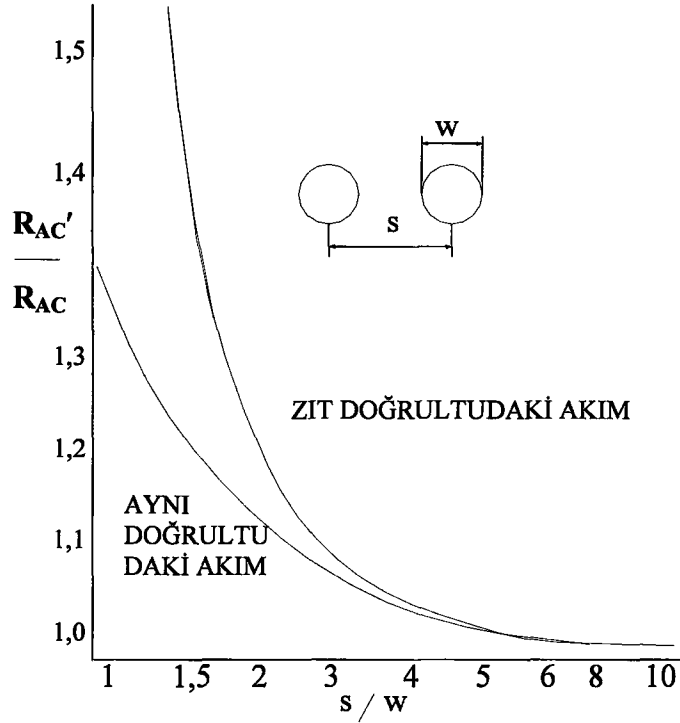
Zıt yönlü akan akımlarda manyetik alanlar iletkenler arasında birbirlerine eklenir, alan yoğunluğu sonuç olarak da akım yoğunluğu artar. Akım dairenin çevresinin daha küçük bölümlerinde yoğunlaşır. Bu yüzden AC direnci daha büyüktür. Yüzeylerde artan akım yoğunluğu manyetik alanı artırır. Bu da tekrar akım yoğunluğunu artırır. Kararlı bir yapı oluşana kadar bu devam eder.[1,3]



Şekil 2.9 İki paralel iletkende akım dağılımı

Aynı ve zıt yönlü paralel akımlar için kayıplardaki artış boşluk/çap oranının bir fonksiyonu olarak Şekil 2.10' da çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, aynı yönlü akım taşıyan yakın aralıklı iletken düzeni, akımı dış yüzeyde akmaya zorlar. Bu yukarıda tek sonsuz iletken tabaka için tanımlanan akım dağılımı ile de tutarlıdır.

Eğer bu iletken düzeni zıt yöndeki akımlarla düzenlenirse, akım iletkenlerin iç kısmında çok daha yoğun bir şekilde akacak ve böylece direnç, akımın aynı yönde aktığı iletken direncinden çok daha fazla olacaktır.



Şekil 2.10 Aynı ve zıt yönlü akan akımların iletken direncine etkisi

2.6 Formülsüz Genel Yaklaşım Etkileri

Yüksek frekanslardaki akım dağılımı ve manyetik alan arasındaki etkileşim (yukarıda iki paralel iletken ile şekilde gösterilmiştir), keyfi bir düzenlemede iletkenlerdeki kayıplar için analitik formüllerin türetilmesini engeller. Mevcut formüller “tek boyutlu” veya diğer özel durumlar için vardır. Konfigürasyonun üç boyutunun ikisi sabit olduğunda 3 boyutlu konfigürasyonlar tek boyuta düşer. Yalıtılmış yuvarlak iletkenlerde akımlar ve alanlar simetri nedeniyle sadece radyal olarak değişir. Bu simetri iki iletken kullanıldığında bozulur ve iki iletkenle daha fazla komplekslik ortaya çıkar. Transformatör ve indüktör sargıları için Dowell tarafından yapılan çalışmalara kadar mevcut bir pratik formül yoktu.

3. SİNÜSOİDAL AKIMLAR İÇİN DOWELL' IN YAKLAŞIMI

Yaklaşım etkisi yüksek frekanslı transformatör ve indüktör sargılarındaki klasik deri etkisine göre daha önemlidir. Bazı aşırı uygulamalarda yaklaşım etkisi kayıpları, DC kayıplarına oranla 10 ila 100 kat kadar büyük olabilir. Çoklu iletkenlerde alternatif akım direncini hesaplamak oldukça zordur. Dowell'ın pek çok basitleştirici varsayımları, transformatör ve indüktör sargılarının yaklaşım etkilerini tek boyutlu bir probleme indirgemıştır. [1,4,5]

3.1 Analiz için Basitleştirici Varsayımlar

- Sargı tabakaları, homojen iletken tabakalar olarak alınmıştır.
- Sargı tabakaları, sonsuz uzun eş eksenli selenoidlerin bir bölümü olarak düşünülmüştür (akı her yerde düzgün ve sargı tabakaları arasında ekseneldir) .
- Tabaka kalınlığı, eğriliğin yarıçapından daha küçüktür.
- Tüm sargılar aynı genişliğe sahiptir (Kısmi tabaka yoktur).
- Sargı bölümündeki tüm tabakalar aynı kalınlıktadır.

Tüm bu varsayımlar problemi tek boyuta düşürmek için yapılmıştır. Akımlar ve alanlar sadece açısal olarak değişir.

3.2 Yuvarlak İletkenin Folyo Sargıya Dönüşümü

Dowell 'ın yuvarlak iletkeni, eşdeğer folyo sargıya dönüştürme aşamaları Şekil 3.1' de gösterilmiştir. Yuvarlak iletkenler (a) öncelikle eşit alana sahip kare iletkenlere (b) dönüştürülmüştür, daha sonra bu kare iletkenler birleştirilmiştir (c) ve gerçek sargı kalınlığını (d) yakalamak için eksenel olarak sıkıştırılmıştır. Aynı DC direncini elde etmek için öz direnç P/h faktörü ile çarpılmıştır. Eşdeğer folyo kalınlığı kare iletkenin kalınlığına eşittir. Benzer bir dönüşüm şerit sargı için de kullanılabilir.

Dönüşümdeki eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$h = 0,8862D \quad (3.1)$$

$$\rho' = 1,128\rho(P/D) = 1,062\delta\sqrt{P/D} \quad (3.2)$$

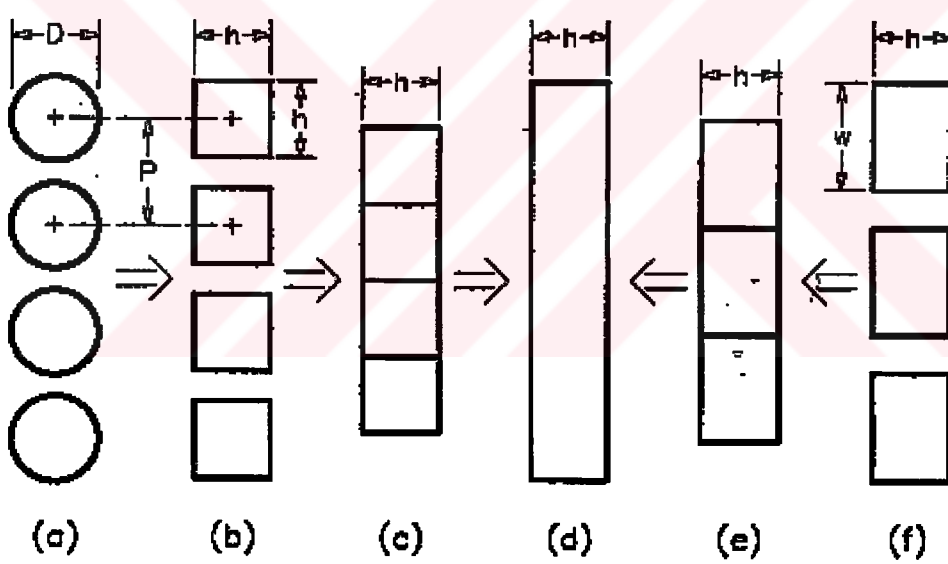
$$\frac{h}{\delta'} = 0,834 \frac{D}{\delta} \sqrt{\frac{D}{P}} \quad (3.3)$$

ρ : Yuvarlak iletken öz direnci

ρ' : Eşdeğer folyo iletkenin öz direnci

δ : Yuvarlak iletken deri derinliği

δ' : Eşdeğer folyo iletkenin deri derinliği



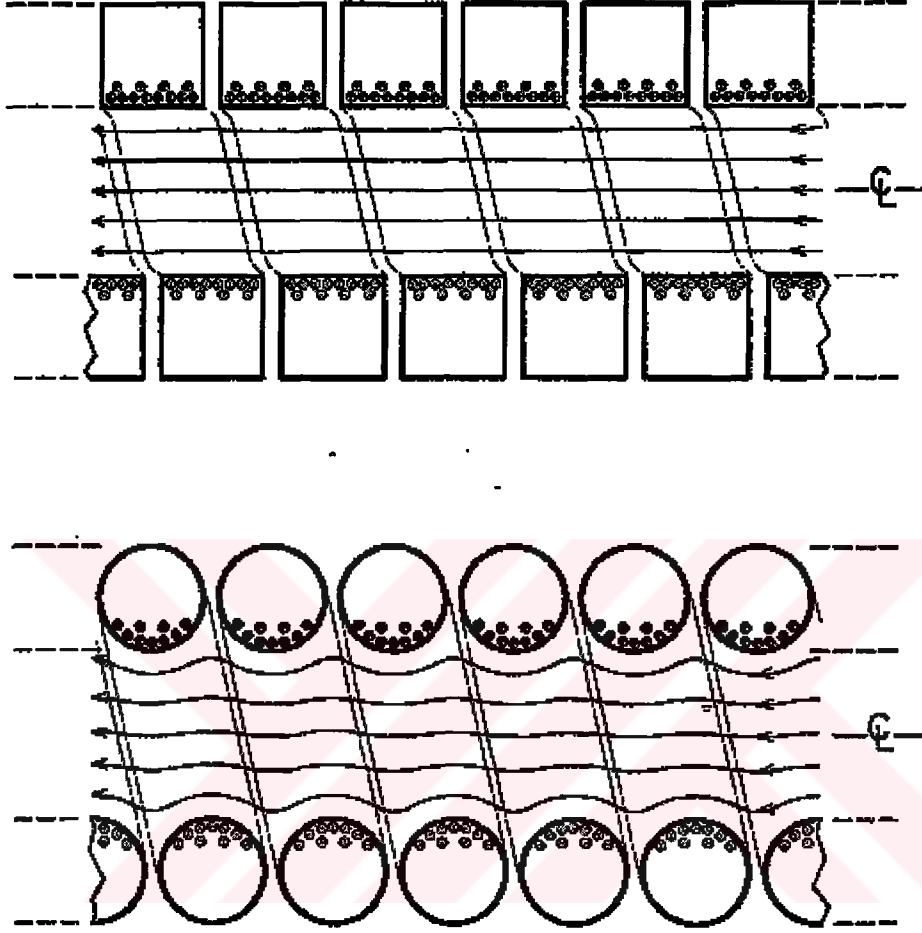
Şekil 3.1 Yuvarlak iletkenin folyo sargıya dönüşümü

3.3 Dowell'ın Varsayımlarının Açıklamaları

Folyo dönüşümünde genellikle yuvarlak iletken kullanılır. Düşük genişlik / çap oranı ile sargıların ucunda akı sarkması daha şiddetli olur. Buna rağmen ikinci varsayım şu nedenlerden ötürü kabul edilebilir;

1. Sargı uçlarına yakın bir çekirdeğin varlığı akıyı doğrultur ve düşük manyetik dirençli bir geri dönüş yolu sağlar.

2. Folyo sargılar eksenel akıyı güçlendirir.



Şekil 3.2 Tek tabakalı selenoid; akım iletkeninin sadece iç yüzeyinde akar.

3. Aralıksız duran iletkenler aynı zamanda akı dağılımını kısıtlar.
4. Aralıklı yuvarlak iletkenlerde akı dağılımı nedeniyle artan yerel kayıplar, sargı uçlarına yakın daha düşük akı ve kayıp tarafından dengelenebilir.

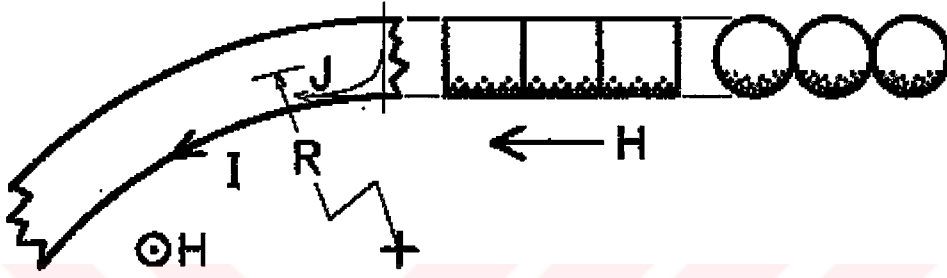
Kısmi tabaka ile ilgili son varsayım çok önemlidir. Kısmi tabakalar kayıpları ve kaçak endüktansı belirgin bir şekilde artırır. Bu nedenle bu durumdan kaçınılmalıdır.

3.4 Tek Tabakalı Sistemde Yaklaşım Etkileri

Tek tabakalı selenoidde yaklaşım etkisi nedeniyle, akımların iletken dairenin iç bölümünde akmasına neden olur. Bu etki, kare ve yuvarlak iletkenlerde Şekil 3.3' te

gösterildiği gibi iletken kalınlığı deri kalınlığından çok daha büyük olduğunda söylenebilir($h \gg \delta$).

$h/\delta \geq 3$ ya da daha fazla olduğunda, yalıtılmış yuvarlak iletken ya da kare iletken için R_{AC}/R_{DC} oranı, sadece deri etkisi nedeniyle oluşan oranın 4 katı civarındadır. Burada yaklaşım etkisinin deri etkisinden çok daha etkili olduğu vurgulanmıştır.

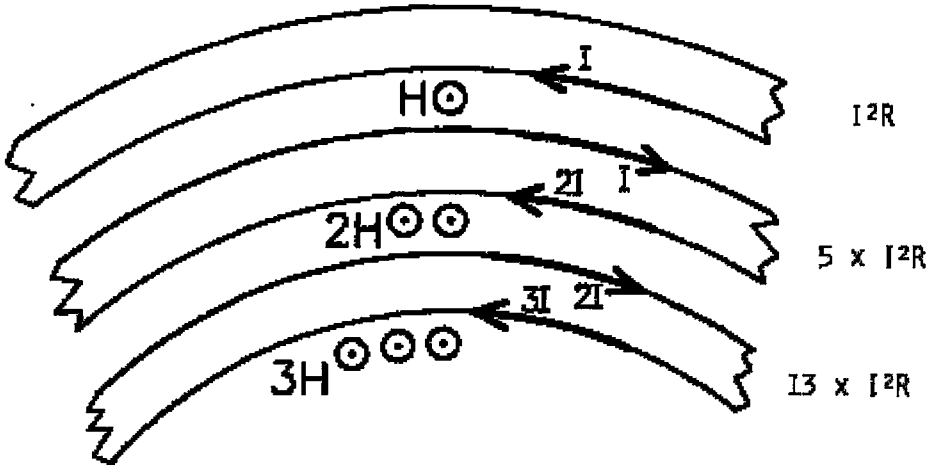


Şekil 3.3 Tek tabakalı sistemde yaklaşım etkisi

3.5 Çok Tabakalı Sistemde Yaklaşım Etkileri

Bir sargı bir ya da daha fazla tabakaya sahip olduğunda aynı akımı taşıyan iç içe selenoidler gibi modellenebilir. İkinci selenoid birinci selenoidin alanının içindedir. Bu yüzden ikincinin içindeki alan iki kat büyük olur. Tabaka selenoidler eklendikçe manyetik alanlar giderek büyür. Eğer tek başına bir sargının kalınlığı deri kalınlığından ($h/\delta \geq 3$) daha büyük olursa, Şekil 3.4' te gösterildiği gibi çok tabakalı yaklaşım etkisi oluşur.

İlk selenoiddeki alan ikincisine geçemez. Böylece eşit, ters yönlü bir akım ikinci selenoidin dış yüzeyinde akar. İkinci selenoid tabakasında birinci selenoid tabakasına eşit değerde bir akım akması ve ikinci selenoidin içinde iki kat büyüklükte akı yaratabilmesi için ikinci selenoidin iç yüzeyinde iki kat akım akar. Bu etki tabaka eklendikçe devam eder. Aynı zamanda ikinci tabakadaki (deri etkisinin 4 katı olan) $I^2 R$ kaybı, birincinin 5 katı olacaktır, 3. tabakada ise 13 katı olacaktır.

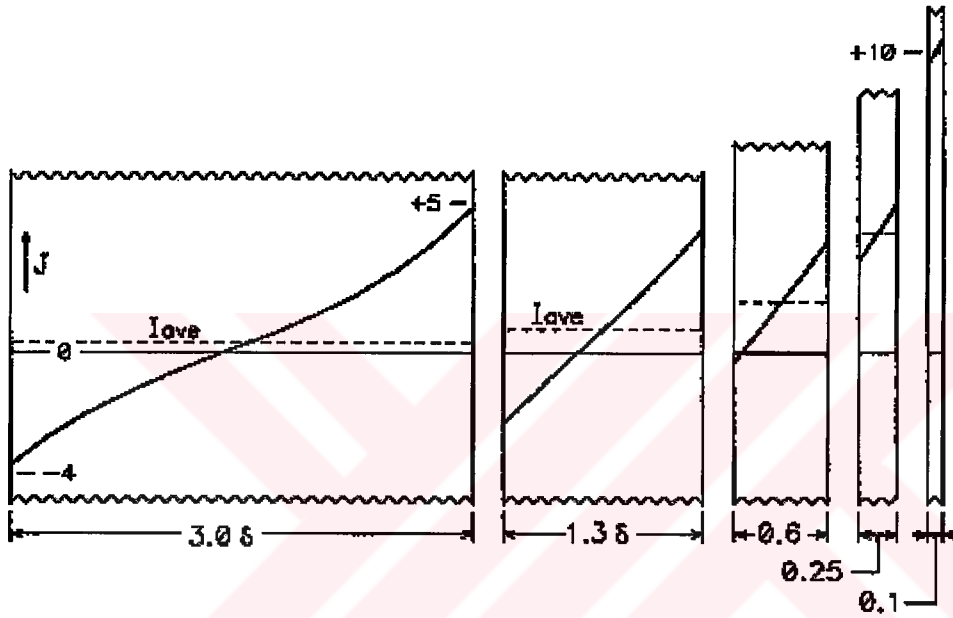
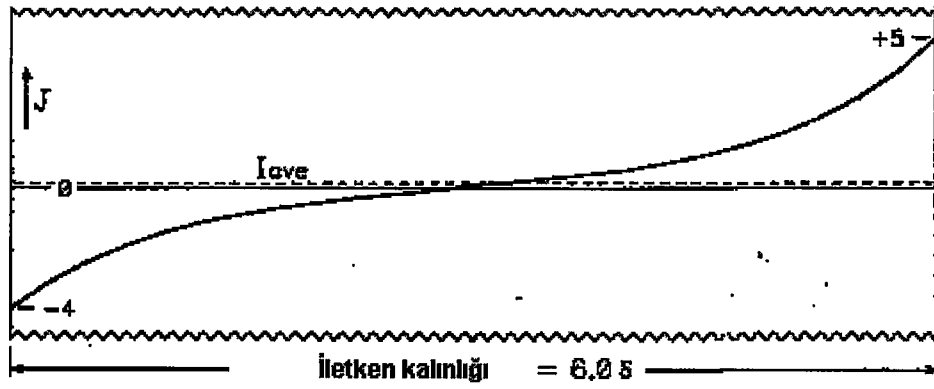


Şekil 3.4 Çok tabakalı sistemde yaklaşım etkisi

3.6 Azalan İletken Kalınlığının Etkileri

3δ 'dan daha düşük iletken kalınlığı, çok tabakalı sargılardaki ters yönlü girdap akımlarının çakışması nedeniyle kayıpları azaltır, fakat artan akım yoğunlukları nedeniyle çok ince tabakalarda kayıplar artar.

$h/\delta=3$ 'ün altında zıt akan akımlar belirgin olarak çakışmaya başlar ve birbirlerini yok ederler. h/δ oranı azaldıkça kayıplarda belirli oranda azalır ve sonuçta kayıplar en düşük noktaya ulaşır. Bu noktadan sonra iletken kesitini daha da azaltmaya çalışırsak, kayıplar yine artma eğilimine geçer. Böylece deri kalınlığı ve tabaka sayısına göre değişen en düşük kayıp için en uygun sargı tabaka kalınlığı bulunur. Sinüsoidal olmayan dalga biçimleri için en uygun kalınlık, akımın harmonik bileşenlerinin bir fonksiyonu olarak değişir.



Şekil 3.5 Sargı tabakasında h / δ oranına göre akım dağılımı

3.7 Sargı Bölümleri ve mmk Diyagramları

Sargı bölümü tanımı için manyetomotor kuvveti (mmk) veya 'H' alan diyagramına ihtiyaç vardır. 'Deri derinliği' yüksek frekanslı iletken kaybı hesaplamalarında önemli bir kavramdır.

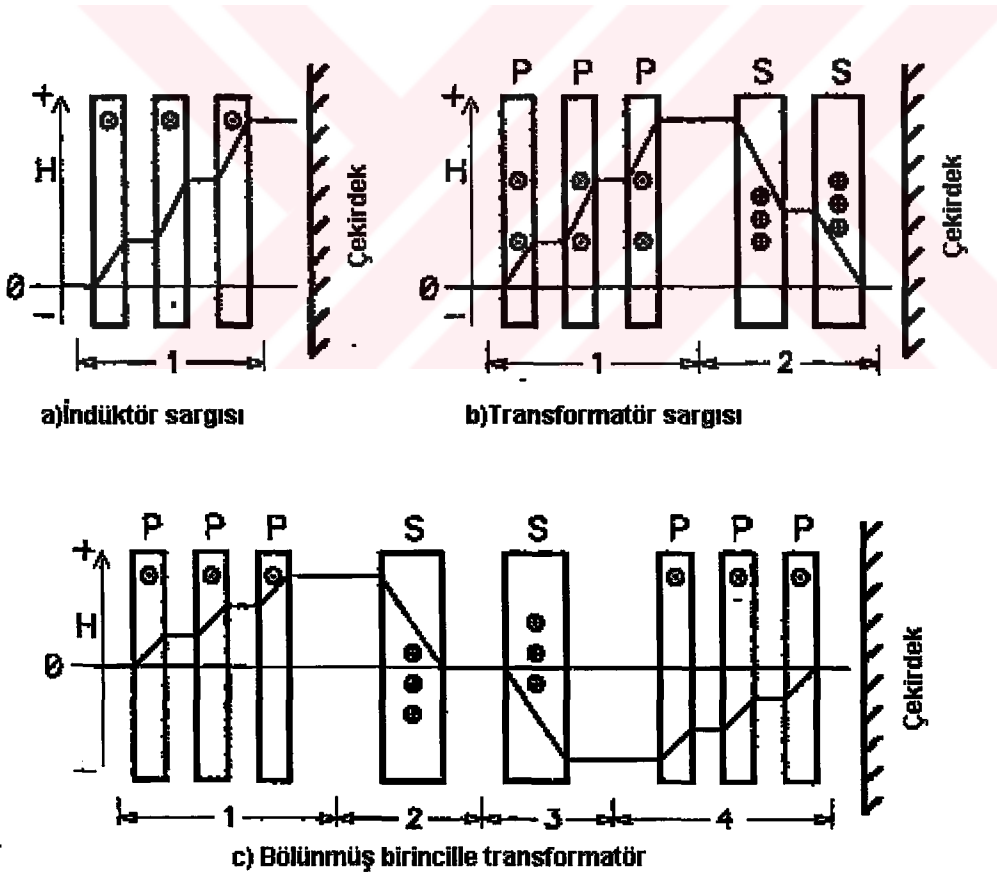
mmk diyagramı transformatör ve indüktör sargılarında 'H' alanının radyal değişimini göstermektedir (Benzer mmk diyagramları kaçak endüktansın hesaplanmasında da kullanılır).

İletken tabakalar için deri ve yaklaşım etkisi kayıplarına yol açan, girdap akımlarını üreten manyetik alandır. Deri ve yaklaşım etkisi her bir yüzeyde tabaka kalınlığı, deri derinliği ve manyetik alan ile tanımlanır.

mmk diyagramı çizilirken ilk önce sargının dışında $H=0$ varsayılır, sonra çekirdek veya merkezin içine radyal olarak ilerlerken, her sargı tabakasının H alan katkısı ilave edilir.

Bir 'sargı bölümü', sıfır mmk ve en yüksek mmk noktaları arasındaki sargı tabakaları bölümü olarak tanımlanır. Bir tam sargı birden fazla sargı bölümünden oluşabilir. Her bir sargı bölümü kayıp hesaplamalarında ayrıca düşünülür.

Şekil 3.6' da indüktör ve transformatörler için sargı bölümleri gösterilmiştir. Bir AC indüktöründe (a), alan, iç sargı ile çekirdek arasında en yüksek değere monoton olarak yükselir ve böylece bir tek sargı bölümü oluşur. Bir transformatörde (b), birincil ve ikincil akımlar zıt yönlüdür ve biri tarafından yaratılan mmk diğeri tarafından yok edilir. Basit iki sargılı transformatörde alan sıfıra düşmeden önce, birincil ve ikincil sargı arasında en yüksek değere ulaşır.



Şekil 3.6 İndüktör ve transformatör sargıları için mmk diyagramları

Transformatörler ek sargı bölümünü yaratan birincil ve ikincil sargıya sahip olabilirler. Genellikle kaçak endüktansı olduğu kadar yüksek frekanslı iletken

kayıplarını da azaltır. Birincil sargı (c) deki gibi bölünmüş ve ikincil sargının her iki tarafına yerleştirilmiştir. Böylece 4 sargı bölümü oluşmuştur.

3.8 Sinüsoidal Akımlar için Dowell' in Eşitlikleri

Dowell 'ın geliştirmiş olduğu bu formüller sinüsoidal akım taşıyan sargı bölümleri için kullanılır. Bir sargıyı belirli bir frekanstaki sinüsoidal akım ile beslediğimizde deri ve yaklaşım etkisi sonucu sargının DC direnci, AC direncine eşit olmaz. Sargının AC direncini hesaplayabilmek için ilgili frekansta F_r katsayısının hesaplanması gerekir. F_r katsayısı tabaka sayısı, tabaka yüksekliği ve besleme akımı frekansına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır. Deri derinliği doğrudan frekansa, sıcaklığa ve sargı malzemesine bağlıdır. [1,4]

$$F_r = \frac{R_w}{R_{wo}} \quad (3.4)$$

Tüm tabakalar aynı kalınlığa sahiptir ;

$$F_r = M' + \frac{(m^2 - 1)}{3} D' \quad (3.5)$$

$$M' = X \frac{\sinh(2X) + \sin(2X)}{\cosh(2X) - \cos(2X)} = X \frac{e^{2X} - e^{-2X} + 2\sin(2X)}{e^{2X} + e^{-2X} - 2\cos(2X)} \quad (3.6)$$

$$D' = 2X \frac{\sinh(X) + \sin(X)}{\cosh(X) - \cos(X)} = 2X \frac{e^X - e^{-X} - 2\sin(X)}{e^X + e^{-X} + 2\cos(X)} \quad (3.7)$$

$$X = h / \delta \quad (3.8)$$

m: Tabaka sayısı

h: Tabaka yüksekliği

δ : Deri derinliği

4. DOWELL'IN EŞİTLİKLERİNİN SİNÜSOİDAL OLMAYAN AKIMLARA UYGULANMASI

4.1 Dowell'in Eşitliklerindeki Kısıtlar

Dowell 'ın eşitlikleri sargı bölümündeki düzgün tabaka kalınlığını öngörerek türetilmiş olmasına rağmen her bir tabakada tek tek hesaplanarak kayıplara yol açan eşitliğin kullanılması ile bu eşitlikler düzgün olmayan tabakalara da uygulanabilir. Dowell'in eşitlikleri pek çok kısıtlamalar içerir. [1]

- Sadece sinüsoidal olan dalgalar için geçerlidir.
- Fr eğrisi en uygun kalınlığı (kayıpların en düşük olduğu yeri) belirlemez.
- Akım taşımayan sargılarda veya plakalarda, diğer sargıların alanlarında kayıp oluşturmaz.

4.2 Sinüsoidal Olmayan Akımlar İçin Sargı Kayıpları

Bilindiği gibi periyodik dalga biçimleri, temel frekansın tam sayılı katlarında bir çok harmonik bileşeni içerir. Dalga, sıfırıncı derecede DC harmonik bileşeni içerir. Bu, Dowell'in eşitliklerinin, her bir ilgili frekansta kayıp hesaplanmasında kullanılabileceği anlamına gelir. Bütün gereken, akım dalga biçiminin harmonik genliklerini bilmektir. Ayrıca her bir harmonik frekansa farklı tabaka kalınlığı h/δ uygun düşeceği için, her bir frekansta Fr değerini hesaplamak gerekir. Pratikte, sözkonusu dalga biçiminde R_{we} etkin sargı direncini hesaplamak için aşağıdaki türetilen eşitlikler kullanılmıştır.

$$P_{kayıp} = I_o^2 R_{w_o} + I_1^2 R_{w_1} + I_2^2 R_{w_2} + + I_n^2 R_{w_n} \quad (4.1)$$

I_n : n. harmonik frekansındaki akımın genliği

R_{w_n} : n. harmonik frekansındaki sargının AC direnci

R_{w_o} : Sargının DC direnci

$$Rw_n = Fr_n Rw_o$$

Fr_n : n. harmonik frekansındaki Fr

Böylece ilgili harmonik frekansındaki AC dirençlerinin yerlerine DC bileşeni cinsinden değerleri yazılırsa;

$$P_{kayit} = Rw_o (I_o^2 + I_1^2 Fr_1 + I_2^2 Fr_2 + + I_n^2 Fr_n) \quad (4.2)$$

Etkin sargı direnci Rwe ;

$$Rwe = P_{kayit} / (I_{rms}^2) \quad (4.3)$$

Sargıdaki toplam efektif akım I_{rms} , her bir harmonik genliğinin karesinin toplamının kareköküne eşittir;

$$I_{rms}^2 = I_o^2 + I_1^2 + I_2^2 + + I_n^2 \quad (4.4)$$

Etkin direnç ifadesi;

$$Rwe = \frac{Rw_o (I_o^2 + I_1^2 Fr_1 + I_2^2 Fr_2 + + I_n^2 Fr_n)}{I_{rms}^2} \quad (4.5)$$

Ya da;

$$\frac{Rwe}{Rw_o} = \frac{(I_o^2 + I_1^2 Fr_1 + I_2^2 Fr_2 + + I_n^2 Fr_n)}{I_{rms}^2} \quad (4.6)$$

Rwe/Rwo oranı, kompleks dalga biçimleri için AC/DC direnç oranıdır ve Fr' ye eşittir.

4.3 Normalleştirilmiş Etkin Direnç Faktörü

AC direncini DC direncine normalleştirme yaparsak Kr , (4.7) 'deki gibi tanımlanır.

$$Kr = Rwe / Rw^* \quad (4.7)$$

$X=1$ ($h/\delta=1$) 'de $n=1$ için;

$$Rw^* = Rwo$$

Diğer bir deyişle, eğer iletkenin yüksekliği temel frekansta bir deri derinliği kalınlığında ($X=1$) yapılırsa Rw^* , sargının DC direncine eşit olacaktır. Temel frekansta $X \neq 1$ iken gerçek sargının DC direnci;

$$Rwo = Rw^* / X \text{ veya } Rw^* = X.Rwo \quad (4.8)$$

Böylece;

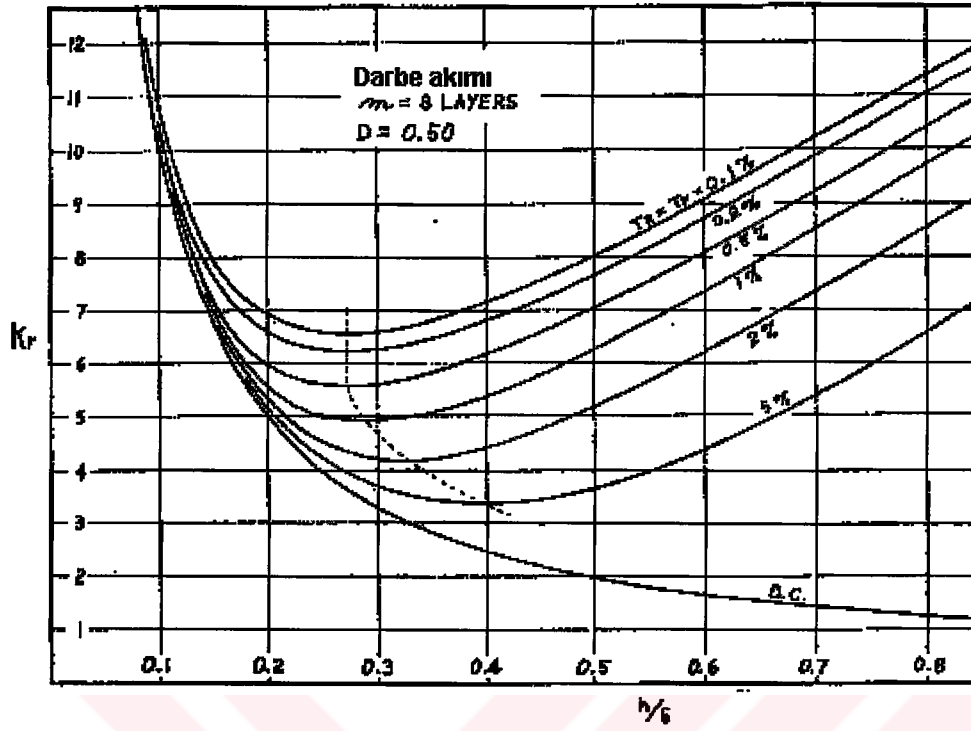
$$Kr = \frac{Rwe}{XRwo} = \frac{P_{kayia}}{XRwo I_{rms}^2} = \frac{Rwo (I_o^2 + I_1^2 Fr_1 + I_2^2 Fr_2 + + I_n^2 Fr_n)}{X.Rwo.I_{rms}^2} \quad (4.9)$$

Sonuç olarak;

$$Kr = \frac{(I_o^2 + I_1^2 Fr_1 + I_2^2 Fr_2 + + I_n^2 Fr_n)}{X.I_{rms}^2} \quad (4.10)$$

Direnç faktörü Kr , etkin dirençle orantılıdır. İletken yüksekliği değiştikçe Kr (ve güç kayıpları) değişir. Söz konusu akım dalga şekli için Kr 'nin değerinin ($0.1 \leq h/\delta \leq 10$) aralığında çizilmesi faydalıdır.

Harmonik hesabı yapıldıktan sonra bazı dalga şekillerinde harmoniğin etkisini belirli bir dereceden sonra kaybettiği görülür .Her bir harmonikteki güç kayıpları çoğu dalga biçimi için hızla azaldığından, genellikle sadece bir kaç harmoniğin hesaplanması düşünülür. Bu, bir şekilde üçgen dalgalar için doğrudur, fakat kesinlikle darbe veya kare dalgalar gibi zengin harmonikli dalga biçimleri için geçerli değildir. Şekil 4.1' de tek kutuplu darbe için yükselme süresine göre etkin direnç faktörü eğrisi çizilmiştir. Eğriden görüldüğü üzere yükselme süresi daha kısa olan dalgalar için yüksek dereceli harmonik bileşenleri etkili olduğundan, yükselme süresi uzun olan dalgaya göre aynı tabaka yüksekliğinde etkin direnç faktörü, dolayısıyla kayıp daha fazladır. Kr eğrisinin en küçük değeri, ilgili dalga şekli için kayıpların en düşük olduğu en uygun sargı yüksekliğinin seçilebileceği noktadır. Bir başka deyişle eğer en düşük kayıp için bir sargının tabaka yüksekliğinin bulunması gerekiyorsa, etkin direnç faktörü eğrisi çizdirilip en düşük noktasına karşılık düşen tabaka yüksekliği seçilir.



Şekil 4.1 Tek kutuplu darbe için yükselme süresine göre kayıp faktörü eğrisi

(Harmonik bileşenlerin etkisi)

$K_r = (\text{AC sargı direnci}) / (h = \delta \text{ olan bir sargı için DC sargı direnci})$

Etkin sargı direnci R_{we} ,

$$R_{we} = K_r \cdot R_{dc} \cdot h / \delta \quad (4.11)$$

h : Sargı tabaka kalınlığı

δ : Temel AC frekansında deri derinliği

K_r ile h/δ arasındaki ilişki, %50 çalışma oranı darbe akımı ile sekiz tabakalı bir sargı için çizilmiştir. K_r çeşitli harmonik bileşenleri için çizilmiştir. 9. dereceye kadar olan harmonikler $T_r/T = \%5$, 49. dereceye kadar olanlar $T_r/T = \%1$ ve 499. dereceye kadar olanlar $T_r/T = \%0.1$ için kullanılmıştır.

Her bir yüksek harmoniğin katkısı küçük görülebileceği gibi, pek çok yüksek dereceli harmoniğin toplam etkisi önemlidir. T_r/T 'nin $\%1$ 'den $\%0.1$ 'e gidebilmesi için gerekli ek 450 harmonik, %35 oranında hesaplanan kayıpları artırır.

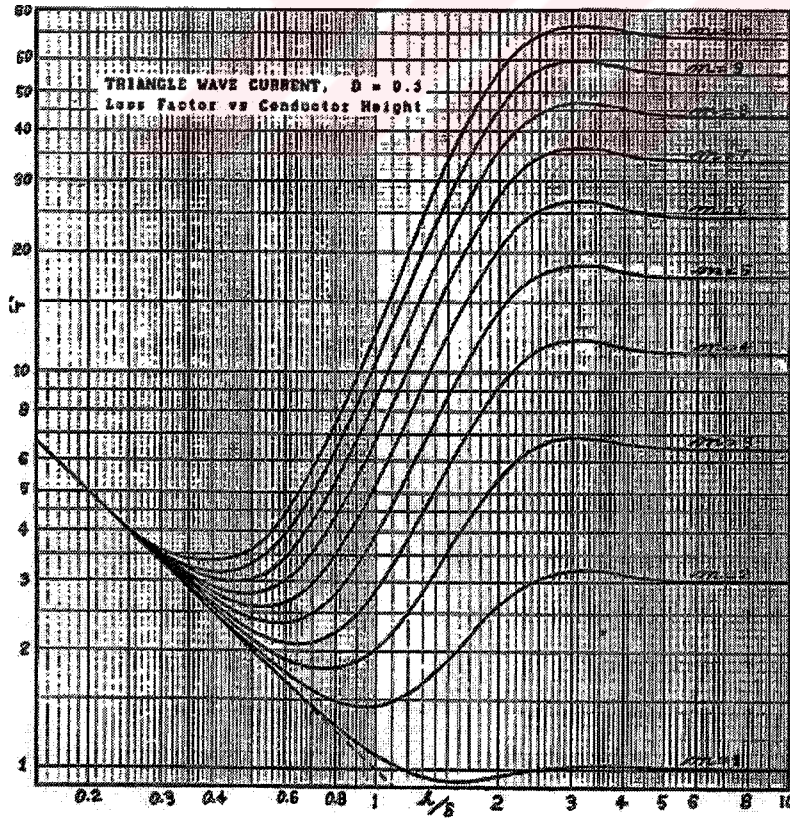
4.4 Sargı Kayıplarını Bulmak İçin Kr Kullanılması

Kr eğrisi akım dalga biçimleri için çizildikten sonra bir sargıdaki kayıplar şu şekilde hesaplanır.

- Etkin sargı tabaka yüksekliği h belirlenir.
- Temel frekanstaki deri derinliği δ bulunur.
- h/δ hesaplanır.
- Rw^* hesaplanır (= gerçek DC direnç $\times h/\delta$).
- Dalga biçimi, tabaka sayısı m ve h/δ için Kr bulunur.
- Etkin sargı direnci hesaplanır ($R_{we}=K_r \times R_{w^*}$).
- Sargı akımı I_{rms} 'den kayıplar hesaplanır

$$P_{kayıp}=(I_{rms})^2 \cdot (R_{we})$$

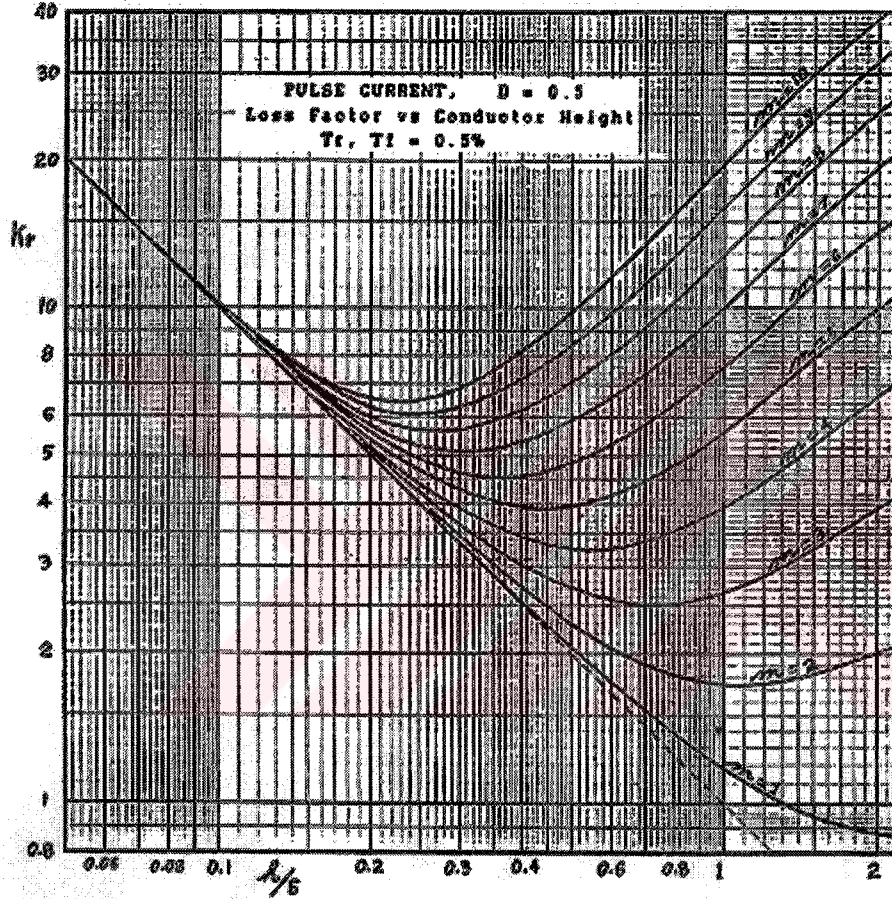
4.5 Üçgen Dalga Şekilli ve Darbe Akımları İçin Kr Eğrileri:



Şekil 4.2 Üçgen dalga şekilli akımlar için kayıp faktörü (K_r) eğrisi

Şekil 4.2' de K_r eğrisi, üçgen dalgalar ve 1 'den 10'a kadar olan tabakalar için h/δ 'ya göre çizilmiştir (sinüs dalgaları için eğriler çok benzerdir). [1]

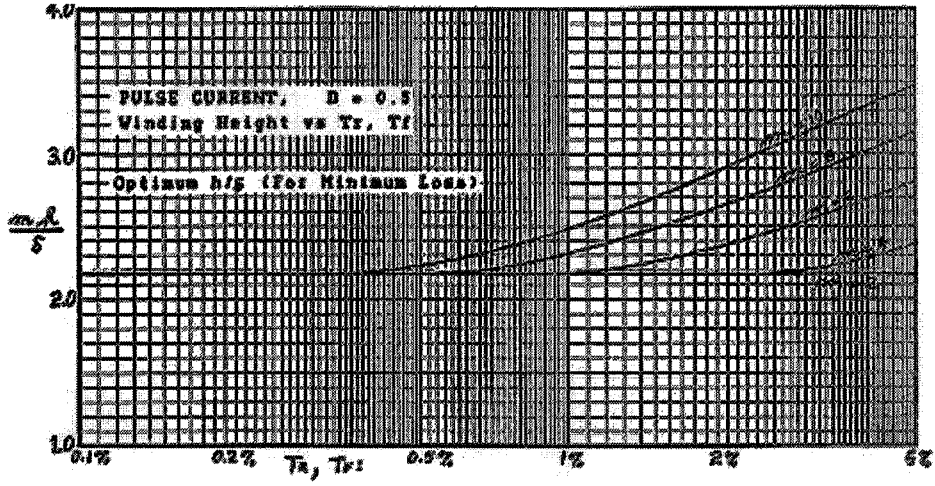
Şekil 4.3, yükselme ve düşme süresi % 0.5 ile %50 çalışma oranlı darbe akımı için benzer eğrileri göstermektedir. DC bileşeni eğriyi bir şekilde düzgünleştirir fakat üçgen dalgaya göre daha yüksek harmonik bileşeni içerdiğinden K_r değeri artar ve genellikle en düşük kayıplar için daha ince sargı tabakaları gerektirir.



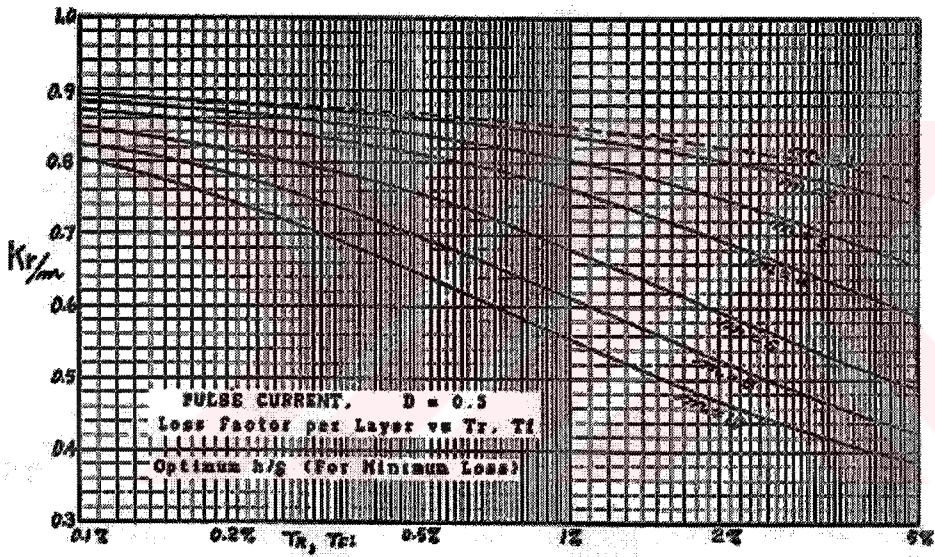
Şekil 4.3 Darbe akımı için kayıp faktörü (K_r) eğrisi

Çalışma oranı ve yükselme/düşme süreleri için bir dizi benzer eğriler olabilir, bu da pek çok grafik anlamına gelir. Pratikte en düşük kayıp noktalarının belirlenmesinde K_r-h/δ en çok kullanılan eğridir.

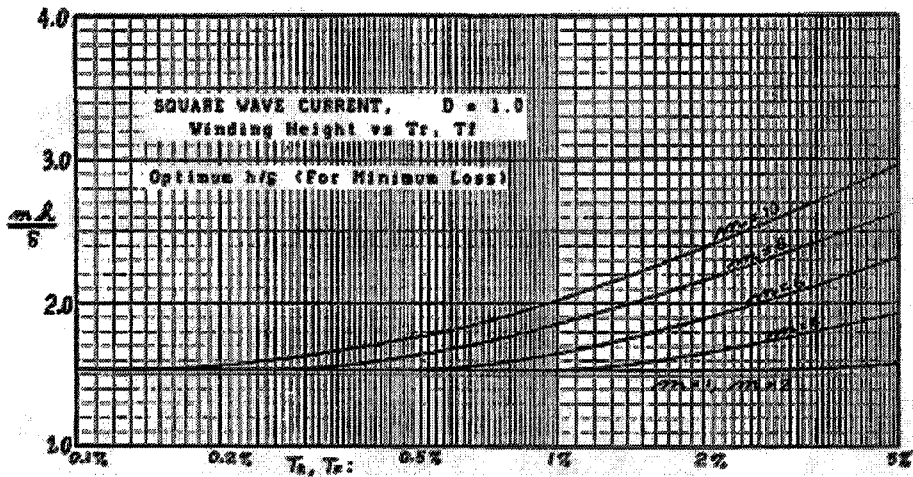
Şekil 4.4' te $m h/\delta$ (en uygun toplam sargı kalınlığı) 'nın yükselme/düşme süresine göre eğrisi çizilmiştir. Şekil 4.5' te ise aynı koşullar için K_r/m (kayıp faktör / tabaka) eğrisi çizilmiştir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 ise kare dalgalar için olan eğriler gösterilmiştir.



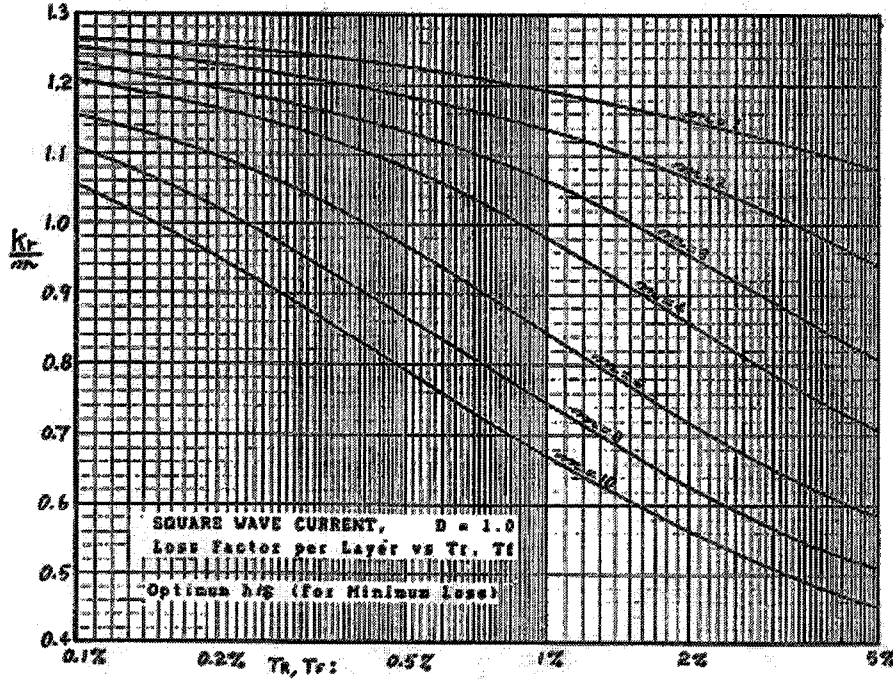
Şekil 4.4 Darbe akımı için en uygun sargı bölümü kalınlıkları (mh/δ) eğrisi



Şekil 4.5 Darbe akımı için en uygun sargı bölümü kalınlığında K_r eğrisi



Şekil 4.6 Kare dalgalar için en uygun sargı bölümü kalınlığı (mh/δ) eğrisi



Şekil 4.7 Kare dalgalar için en uygun sargı bölümü kalınlığında Kr eğrisi

Şekil 4.4-4.7' den aşağıdaki önemli sonuçlara varabiliriz;

1. Belirli bir basit sargı için (sarım sayısı, sargı genişliği vs), kayıp, en uygun kalınlığın en yüksek tabaka sayısı ile en düşük seviyeye getirilir.
2. Daha hızlı yükselme zamanlı akımlar için, bir sargı bölümünün en uygun toplam kalınlığı ($m h/\delta$), tabaka sayısını dikkate almaksızın sabit hale gelir. Bu en uygun sargı kalınlığı, $D=0.5$ ile tek kutuplu darbeler için 2.17 deri kalınlığı ve kare dalgalar için 1.54 deri kalınlığıdır.

Hızlı yükselme sürelerinde en uygun sargı bölümü kalınlığı, çalışma oranının “D” nin karekökü ile doğru orantılıdır.

Tek kutuplu darbe dalgaları için, en uygun sargı kalınlığı;

$$m h/\delta = 3.075 \sqrt{D} \quad (4.12)$$

ve çift kutuplu dalgalar için ;

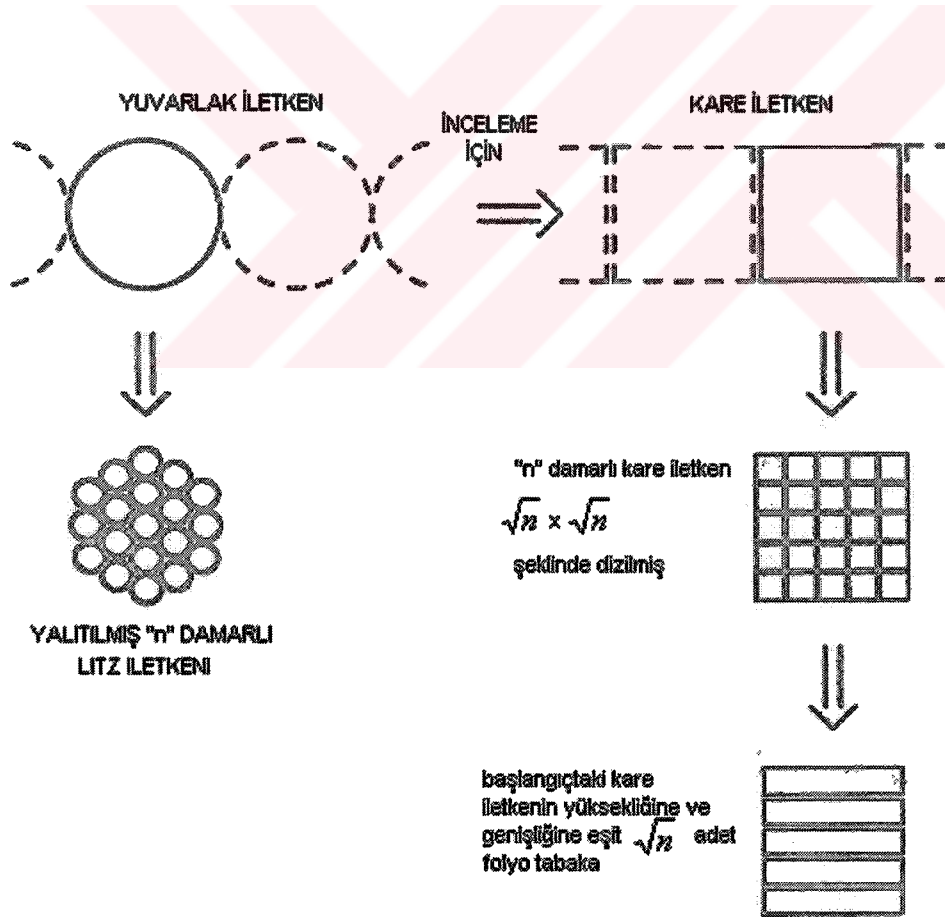
$$m h/\delta = 1.537 \sqrt{D} . \quad (4.13)$$

Çalışma oranı ile Kr değişimleri belirgin değildir. Fakat $\pm 5\%$ ten $\pm 10\%$ a kadar çalışma oranının kare kökü ile ters olarak değişir.

5. KAYIPLARIN AZALTILMASI İÇİN İLETKEN SEÇENEKLERİ

5.1 Litz İletkeni

Yüksek frekansta iletken kayıplarını düşürmenin en etkili yolu klasik Litz iletkeni kullanmaktır. Litz iletkeni kullanarak AC direnci azaltılır fakat aynı çaptaki iletkenin kullanılmasıyla DC direnci artar. Litz iletkeninde kullanılmasıyla DC direncinin artmasının nedeni, aynı çaptaki dolu iletkene göre kesit alanının azalmasıdır. Litz iletkeninin kullanılmasıyla kayıpları azaltmak için en uygun damar sayısını ve sargı yüksekliğini seçmek gerekir. [1,3,6]

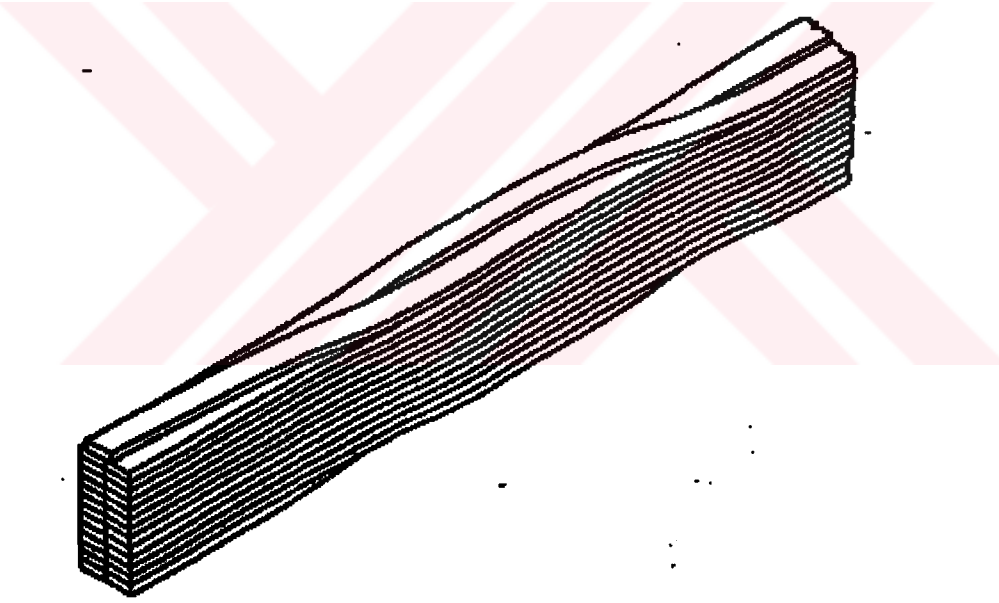


Şekil 5.1 Litz iletkeninin eşdeğer folyo tabakalarına dönüşümü

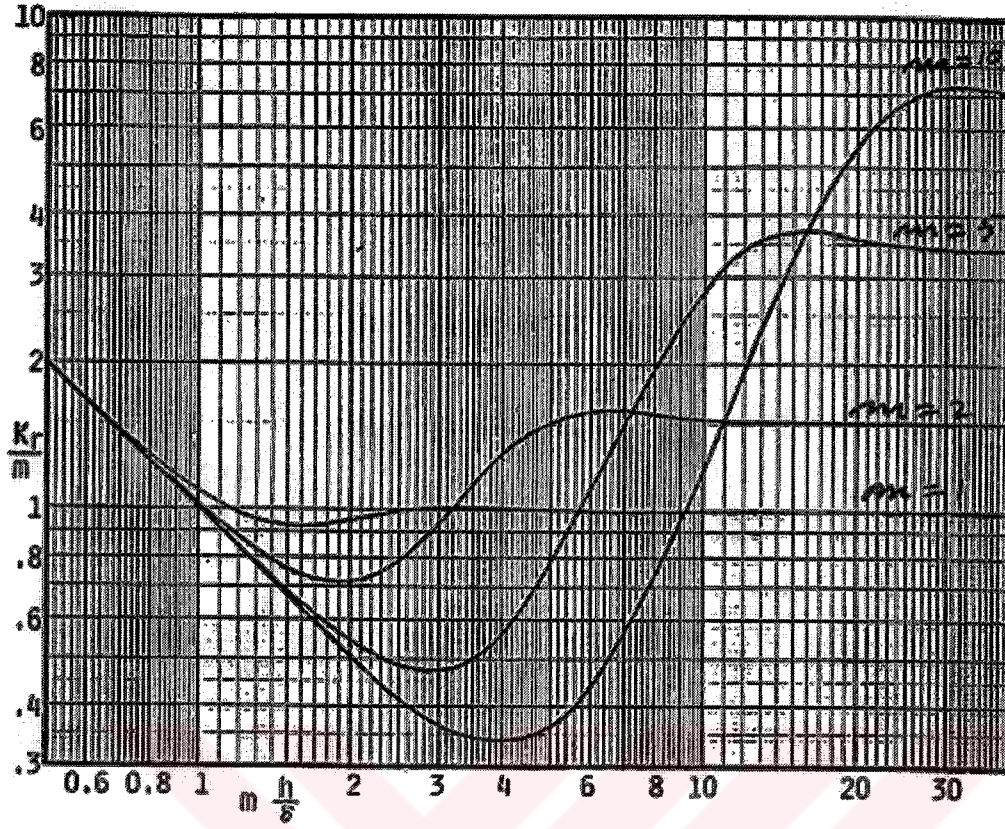
Litz iletkenini kullanmanın faydasını Şekil 5.1’ de gösterilen işlemle inceleyebiliriz. Eğer bir yuvarlak iletken, n damarlı Litz iletkeni ile yer değiştirilirse, yuvarlak iletken önce kare iletkenin bir kare dizinine bölünmüş kare iletkenle yer değiştirilir.

Dikey kesimlerin hiçbir etkisi olmadığı için, kare iletkenler $\sqrt{n}$ adet folyo yığınıyla yer değiştirir. Sonuç olarak her bir n damarlı Litz iletkeni, $\sqrt{n}$ adet folyo tabakasına eşit olur ve folyo tabakalarda $m=\sqrt{n}$ olarak analiz edilebilir.

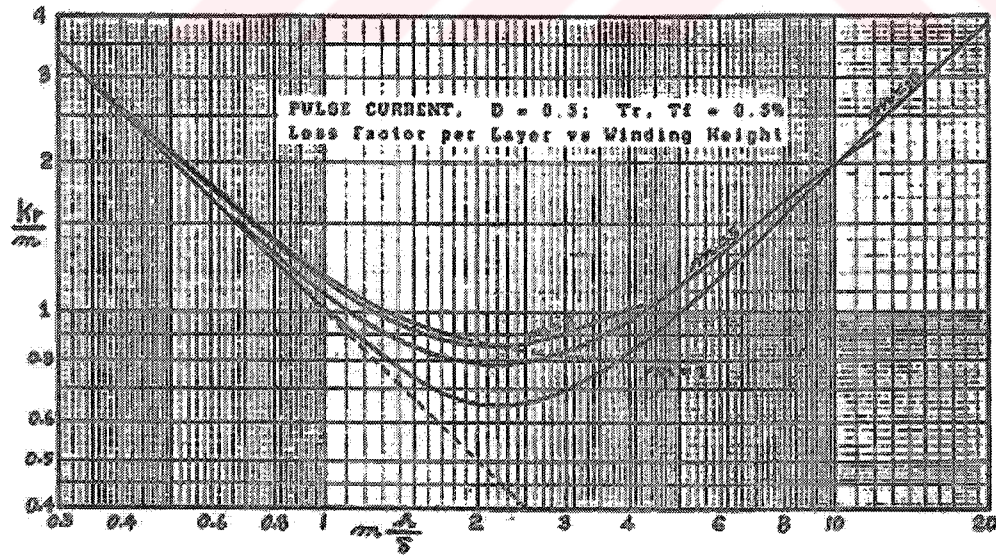
Bu üçgen dalga akımları ile 1, 4, 25, ve 100 damarlı ($m= 1, 2, 5$ ve 10 tabakalı) tek tabaka sargıları için Şekil 5.3’ te kayıp eğrileri çizilmiştir. %0.5 lik yükselme süreli kare dalga (Şekil 5.4, Şekil 5.5) ve %50 lik çalışma oranlı darbe akımları için kayıp eğrileri gösterilmiştir.



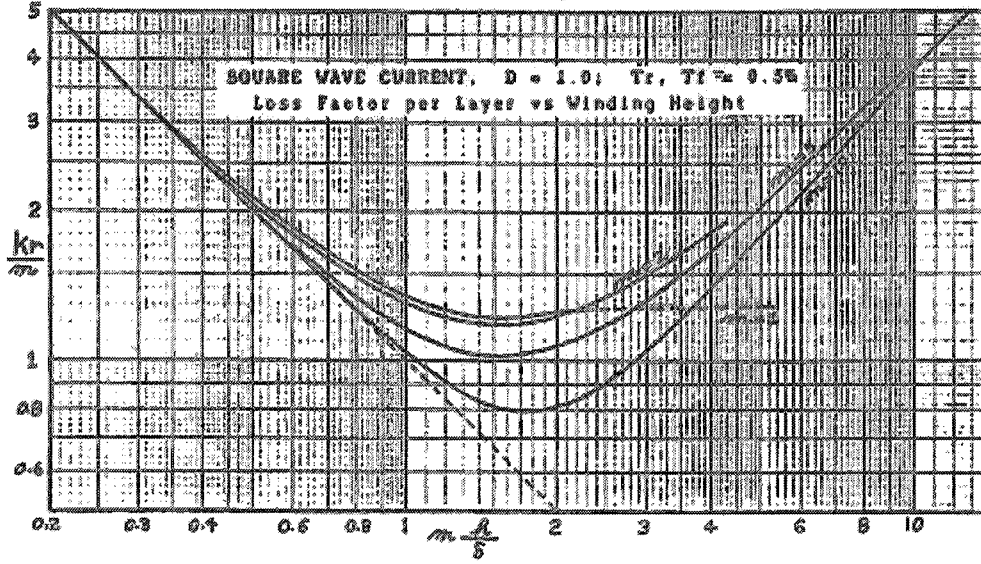
Şekil 5.2 Yüksek güçlü 50-60 Hz manyetikler için sürekli çaprazlamış çok şeritli Litz iletkeni



Şekil 5.3 Litz iletkeninde üçgen dalga akımları için kayıp faktörü eğrisi



Şekil 5.4 Litz iletkeninde darbe akımı için kayıp faktörü eğrisi



Şekil 5.5 Litz iletkeninde kare dalga akımı için kayıp faktörü eğrisi

Eğrilerden çıkarılabilecek sonuçlar;

1. Litz iletkeni zengin harmonik içermeyen akımlarda daha etkindir. 100 damarlı litz iletkeni kayıpları, üçgen dalgalar için içi dolu iletken ile sağlanan en düşük kayıpların %37 'sine, kare dalgalar için %67 'sine, darbe akımları için %81 'ine düşürür.
2. Eğer Litz iletkeninin damarları çok kalınsa, kayıp dolu iletkenlerdeki kayıplardan çok daha büyük olabilir (yaklaşım etkisi nedeniyle).
3. Genel olarak n bükümlü Litz iletkenlerinin kullanımı, $\sqrt{n}$ ile etkin tabaka sayısını artırır.

5.2 En düşük Kayıp için Diğer Sargı Biçimleri

Litz iletkeni dışında folyo sargılar, “rope-lay” iletkeni ve ayırık sargılar kullanılabilir. “Rope-lay” iletkeninin özellikleri dolu iletken ve litz iletkeni arasındadır. Ayırık birincil ve ikincil sargılar, sargı bölümlerinin sayılarını artırır. Sonuç olarak net kayıp, sargı bölümlerinin sayısı ile azaltılabilir. Bu yüksek güç seviyelerinde kayıpları düşürmenin en etkin yoludur.

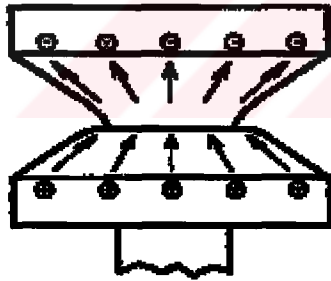
6. EN DÜŞÜK KAYIP İÇİN SARGI YAPILARI

6.1 Uygun Sargı Yapıları İle Kayıp Azaltma Yolları

Sargı kayıplarının azaltılabilmesi için aşağıdaki gibi bazı yapısal tedbirlerin alınması gereklidir;

1. Sadece tam sargı tabakaları kullanılmalıdır.
2. Yüksek akı bölgelerinde sargı giriş çıkış iletken kesiti en düşük seviyeye getirilmelidir.
3. Birbirine bakan iletkenlerde zıt yönlü akımlar için düzenlenmelidir.

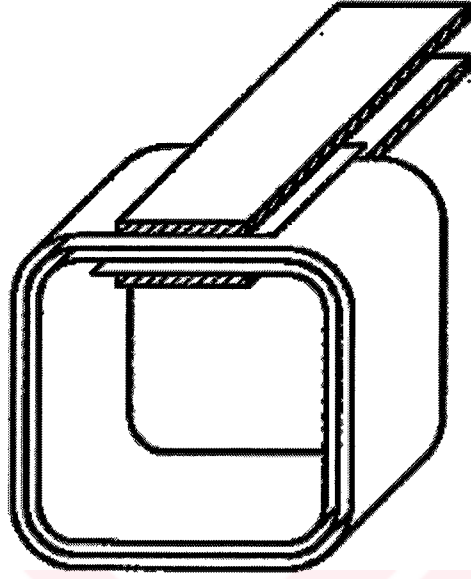
“3” sargılara olduğu kadar sargı giriş çıkış iletkenlerine de uygulanır. İdeal olarak, bir iletkenin yüzeyindeki her akım Şekil 6.1’ de gösterildiği gibi ters yönlü veya geri dönüşlü bir akım görmelidir. [1]



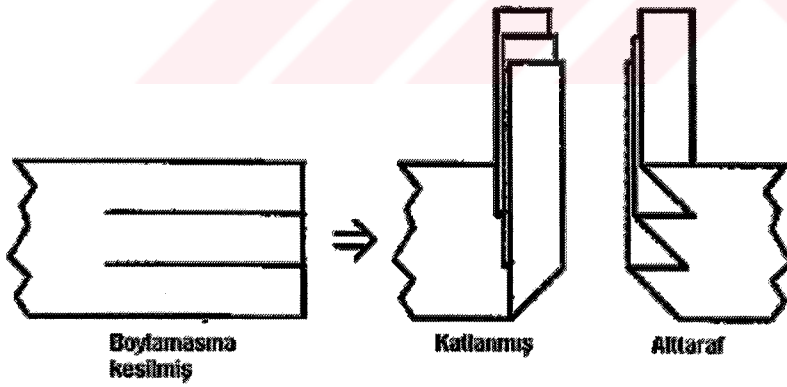
Şekil 6.1 Birbirine bakan yüzeylerde akan akımlar

Bu bir sargıdaki geri dönüş akımı veya birincil tarafından görülen ikincil akım olabilir. Pratik sonuçlar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’ te gösterildiği üzere kayıpları azaltmak için sargılara terminaller koyulmuştur.

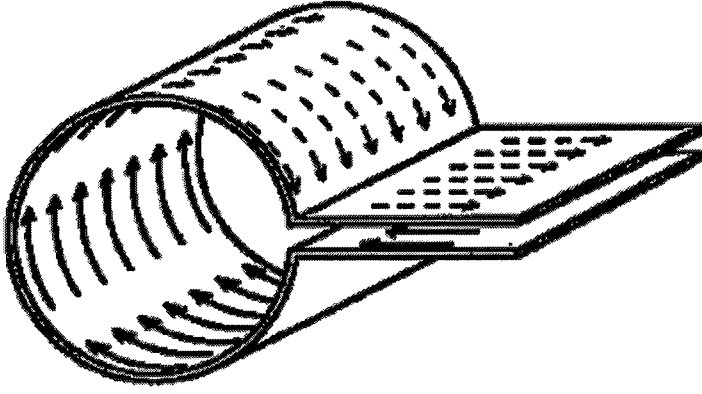


Şekil 6.2 Spiral sarılı folyo sargılarına koyulmuş terminaller

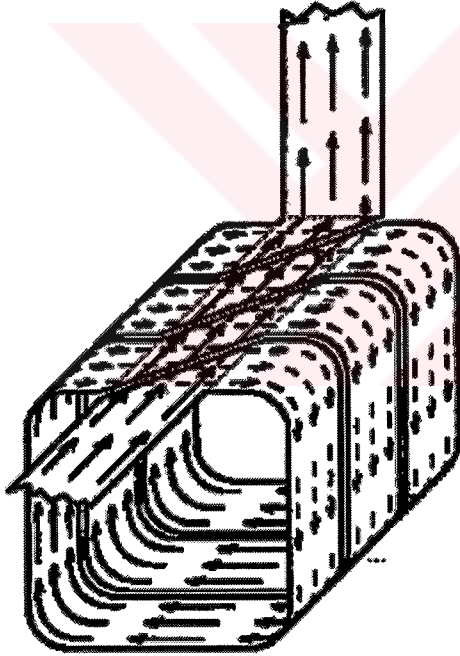


Şekil 6.3 Boylamasına kesilmiş ve katlanmış terminaller

Şekil 6.4' te tek sarımlı radyal bağlantı gösterilmiştir. Giriş çıkış akımları zıt akımlarla düzenlenmiştir.

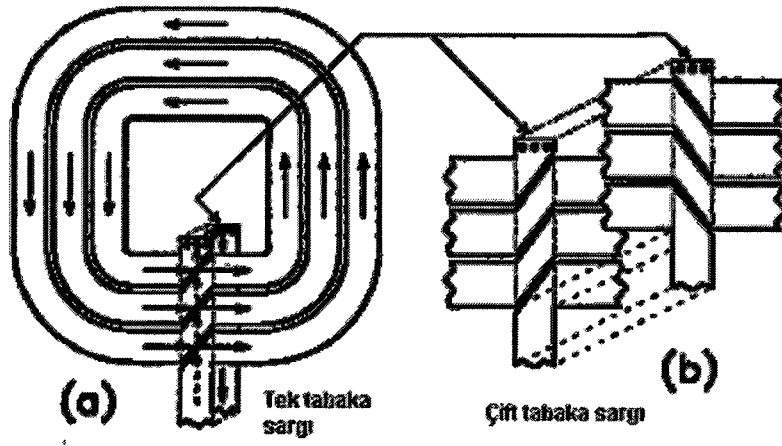


Şekil 6.4 Tek sarımlı radyal bağlantı

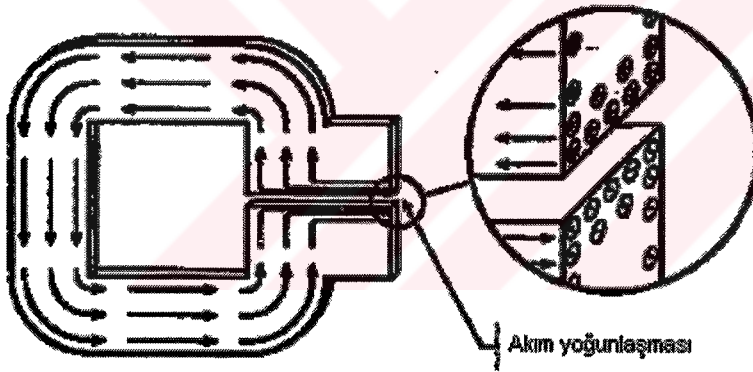


Şekil 6.5 Çok sarımlı tek tabakalı eksenel bağlantılı selenoid sargısı

Şekil 6.5' te çok sarımlı, tek tabakalı selenoidde, eksenel bağlantı yapılarak en uygun bağlantı çıkışı sağlanmıştır. Akım sargının iç yüzeyinde akmaktadır.

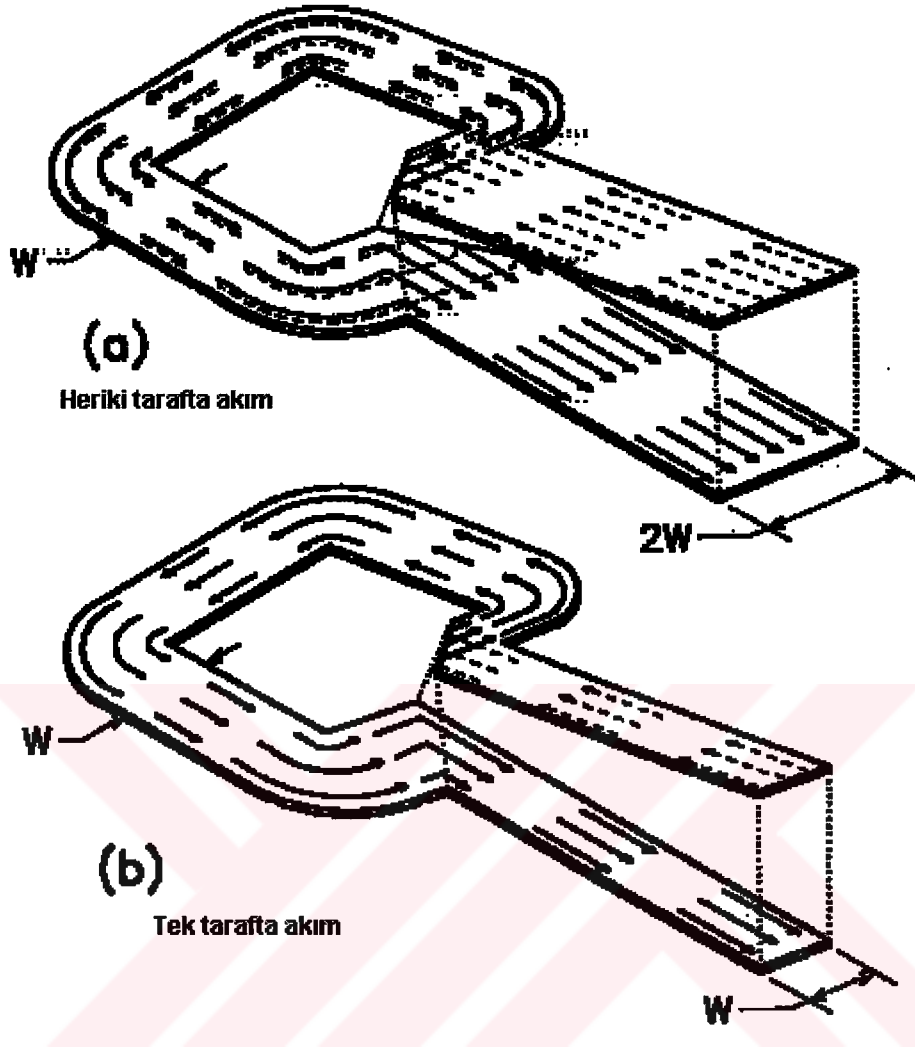


Şekil 6.6 Çok sarımlı düzlemsel sargı



Şekil 6.7 Tek sarımlı düzlemsel sargı

Şekil 6.6' da çok sarımlı tek ve çift tabakalı düzlemsel sargı bağlantıları gösterilmiştir. Şekil 6.7' de tek sarımlı tek tabakalı düzlemsel sargıda akım bağlantı giriş çıkışının iç kısımlarında yoğunlaşmıştır.

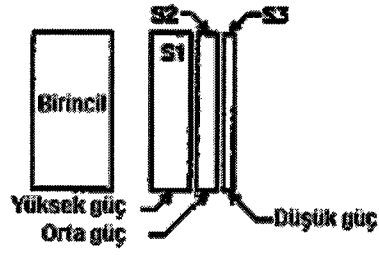


Şekil 6.8 Tek sarım düzlemsel sargılar için en uygun bağlantı

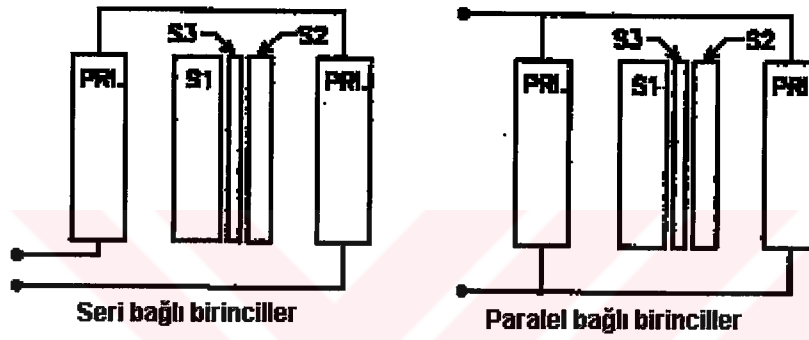
Sargı kayıplarını azaltmak için Şekil 6.8’ de düzlemsel sargı için uygun bağlantı şekilleri yapılmıştır. Giriş çıkış bağlantı ucu genişliği $2W$ olan düzlemsel sargıda akım her iki tarafta akmaktadır. Giriş çıkış bağlantı ucu genişliği W olan düzlemsel sargıda akım tek tarafta akmaktadır. Giriş çıkış bağlantı iletkenlerinde ise akım birbirine bakan yüzeylerde yoğunlaşmaktadır.

6.2 Çoklu-İkincil Sargılarda Kayıpları Azaltma

En yüksek güçlü ikincil sargı, birincile en yakın olduğu ve en düşük güçlü ikincil sargı, birincile en uzak olduğu noktalarda bulunur. Bu yapı sargı kayıplarını azalır.



Şekil 6.9 Bölünmüş ikincil sargıların birincil sargıya göre yerleştirilişi

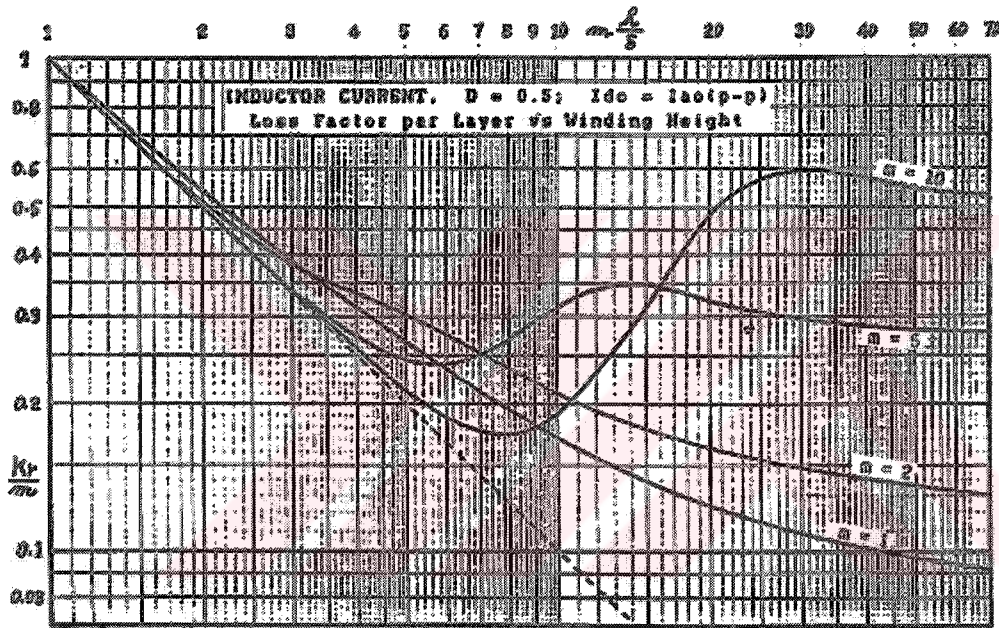


Şekil 6.10 Bölünmüş ikincil sargıların bölünmüş birincil sargıya göre yerleştirilişi

Kayıplar aynı zamanda bölünmüş birincil sargı ile de azaltılabilir. Bu düzenlemede, en yüksek güçlü ikincil sargılar ikincil sargı grubunun dışına, en düşük güçlü ikincil sargılar ise ortaya yerleştirilir.

7. AC VE DC AKIMLI İNDÜKTÖRLERDE İLETKEN KAYIPLARI

Yüksek frekanslarda filitre bobinindeki AC iletken kayıpları önemsiz olmaktan çıkar. Efektif AC akımı DC akımından az olmasına rağmen AC kayıpları DC kayıplarını gerçekte aşabilir. [1]

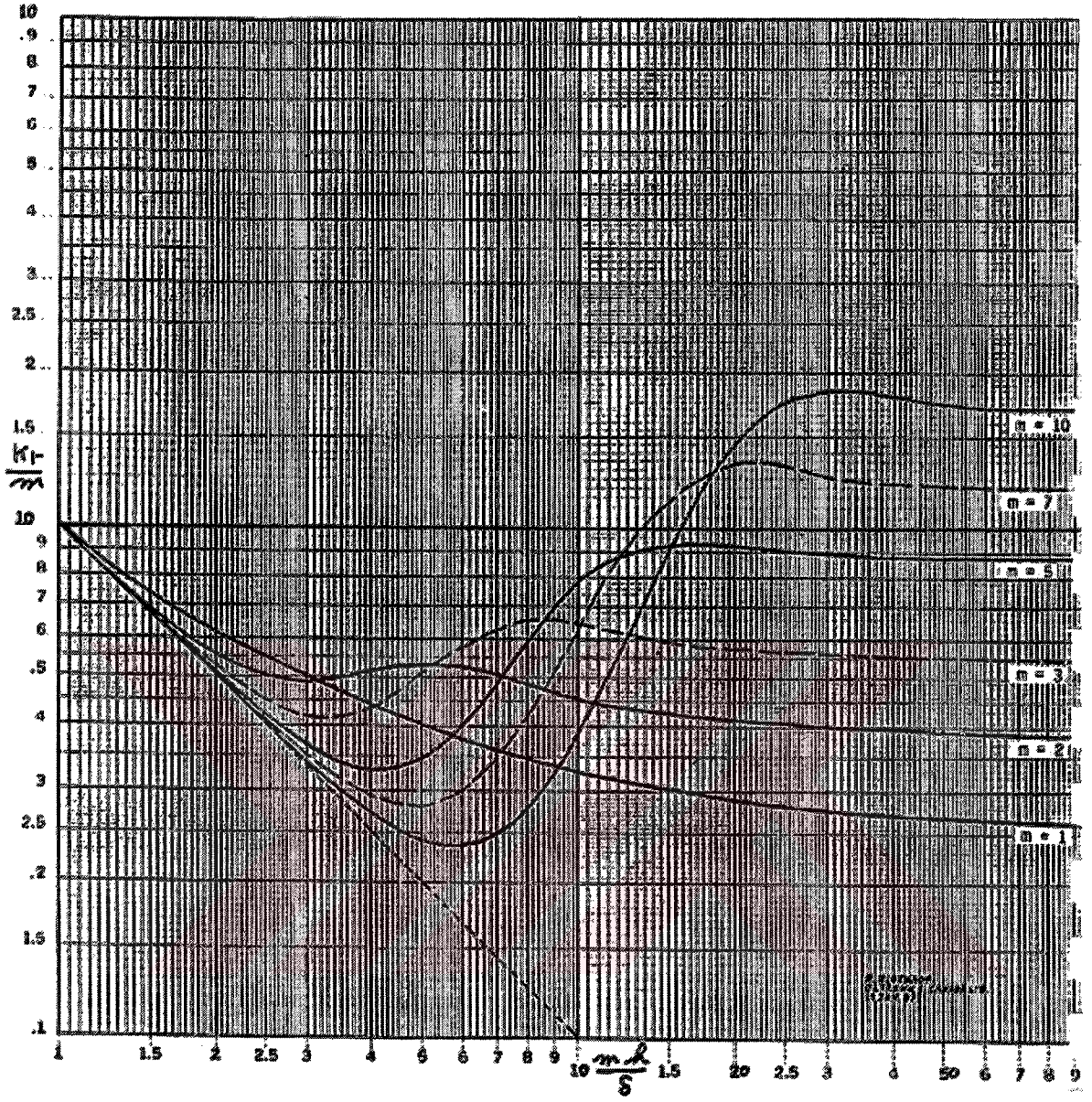


Şekil 7.1: Kritik akımın iki katında, AC+DC kayıplarında tabaka sayısının etkisi

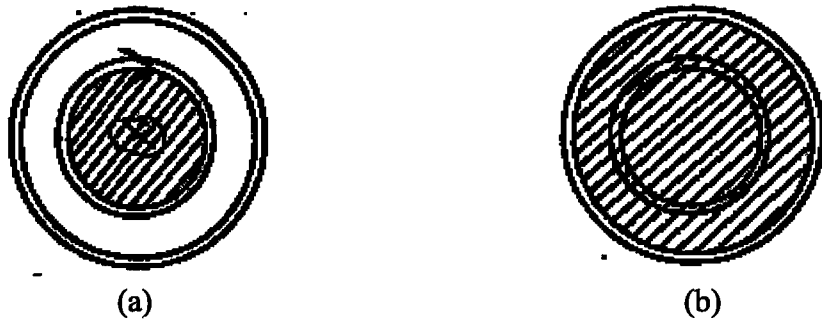
Yüksek frekanslı transformatörlerde AC kayıplarını en düşük seviyeye getirme teknikleri filitre bobinlerine uygulandığında en uygun sonuçları vermez. Şekil 7.1 ve Şekil 7.2' de kritik akımlarla ilişkili olarak kayıp faktörü eğrileri çizilmiştir.

AC ve DC iletken kayıpları, indüktörde aynı sarım sayılı iki paralel sargı kullanılarak en düşük seviyeye getirilir.

İç sargı öncelikle, AC iletken kayıplarını en düşük seviyeye getirmek için veya AC kayıplarını kabul edilebilir bir seviyede tutmak için tasarlanmıştır. Ardından kalan sargı boşluğu bir ikinci paralel sargı ile DC iletken kayıplarını en düşük seviyeye getirmek için doldurulur.



Şekil 7.2: Kritik akımında, AC+DC kayıplarında tabaka sayısının etkisi



Şekil 7.3 Sargıdaki alan dağılımı

1. Şekil 7.3 a' da gösterildiği üzere eğer bir akım iç sargıda akarsa, tüm akı dış sargıda tutulur.
2. Bununla birlikte eğer bir akım dış sargıda akarsa, Şekil 7.3 b' de gösterildiği gibi tüm akı iç sargıda saklanmaz.



8. SİNÜSOİDAL OLMAYAN DALGA ŞEKLİNİN HARMONİK BİLEŞENLERİNİN HESAPLANMASI

8.1 Harmonik Formülleri İle İlgili Notlar

Aşağıda seçilmiş dalga şekillerinin harmonik bileşenleri verilmiştir. [7]

$$y = H_0 + H_1 \cos(\theta) + H_2 \cos(2\theta) + H_3 \cos(3\theta) + \dots + H_n \cos(n\theta) \quad (8.1)$$

n: Harmonik derecesi

H₀: DC bileşen genliği

H₁: Temel bileşenin genliği

H₂: 2. harmonik genliği

H_n: n. harmonik genliği

Y: Dalga şeklinin tepe değeri

T: Dalga periyodu

t: Darbe yükselme ve düşme süresi

Ta: Darbe süresi ya da üçgenin yükselme süresi

Tb: Üçgenin düşme süresi

D: Çalışma oranı

Kare ve üçgen dalgalar gibi bazı dalga şekillerinde tek veya çift harmonikler sıfırdır. Bir bilgisayar programında H_n formülleri kullanıldığı zaman hesaba katılmasına gerek yoktur. Aksi belirtilmedikçe harmonik genlikleri kosinüs bileşenleridir. Testere dişi dalgası bunun haricindedir. Bu şekillerde belirtildiği üzere, sadece sinüs bileşene sahiptir. Diğer dalga şekilleri hem sinüs hem de kosinüs bileşenlere sahiptir.

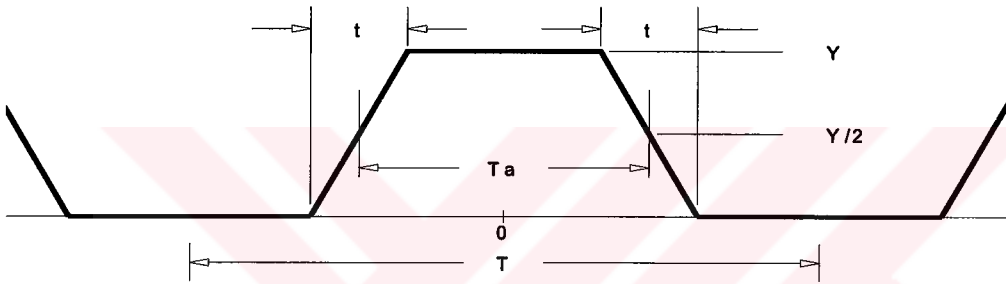
Daha sonraki durumlarda harmonik genlik formülü önce kosinüs ve sinüs bileşenlerin toplamı, daha sonra vektör toplamının genliği için verilmiştir.

Kosinüs+sinüs biçimi birden fazla dalga şekillerinin birleştirilmesi için kullanılırken, vektör toplam genliği ileten kayıplarının direk hesaplanması için kullanılır.

8.2 Seçilmiş 12 Dalga Şekli İçin Harmonik Formülleri

Şekil 8.1-12' de gösterilen dalga şekilleri için harmonik bileşeni genliklerinin hesaplanması gerekir. Bu amaçla dalga şekilleri için fourier analizi yapılmış ve sonuçlar eşitliklerde verilmiştir.

8.2.1 Genel tek kutuplu dalga şekli için harmonik formülleri



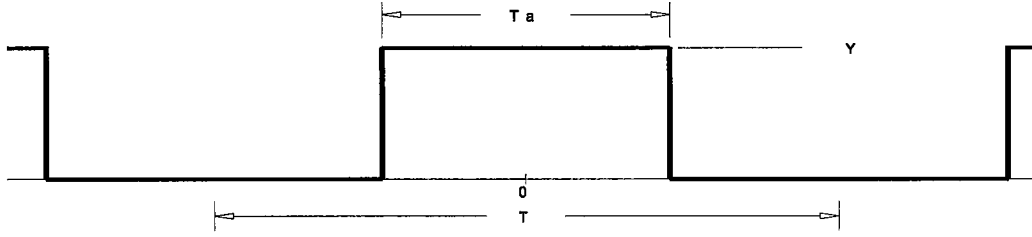
Şekil 8.1 Genel tek kutuplu dalga şekli

$$T_r = T_f = t \quad D = T_a / T \quad (8.2)$$

$$H_0 = DY \quad (8.3)$$

$$H_n = 2Y \frac{\sin(n\pi / T) \sin(n\pi D)}{(n\pi)^2 t / T} \quad (8.4)$$

8.2.2 Tek kutuplu darbe katarı için harmonik formülleri



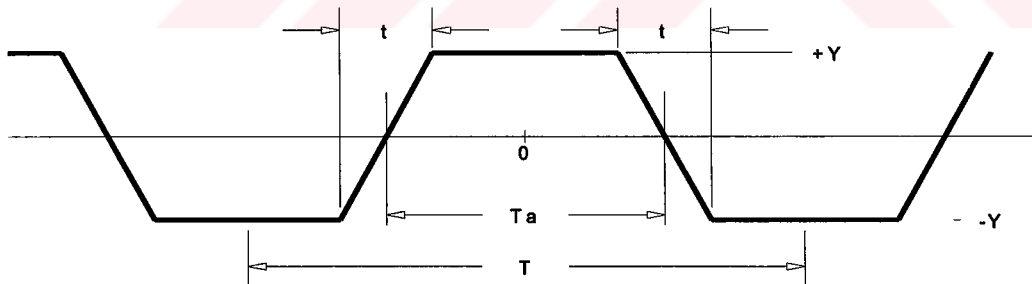
Şekil 8.2 Tek kutuplu darbe katarı

$$T_r = T_f = 0 \quad D = T_a / T \quad (8.5)$$

$$H_0 = DY \quad (8.6)$$

$$H_n = 2Y \frac{\sin(n\pi D)}{n\pi} \quad (8.7)$$

8.2.3 Trapez dalga için harmonik formülleri



Şekil 8.3 Trapez dalga

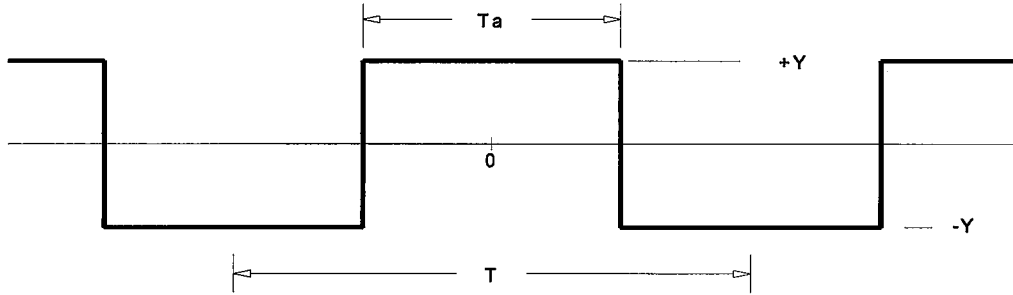
$$T_r = T_f = t \quad D = T_a / T = 0.5 \quad (8.8)$$

$$H_0 = 0 \quad (8.9)$$

$$H_n = 4Y \frac{\sin(n\pi t / T) \sin(n\pi / 2)}{(n\pi)^2 t / T} \quad (8.10)$$

Çift n 'ler için $H_n = 0$

8.2.4 Kare dalga için harmonik formülleri



Şekil 8.4 Kare dalga

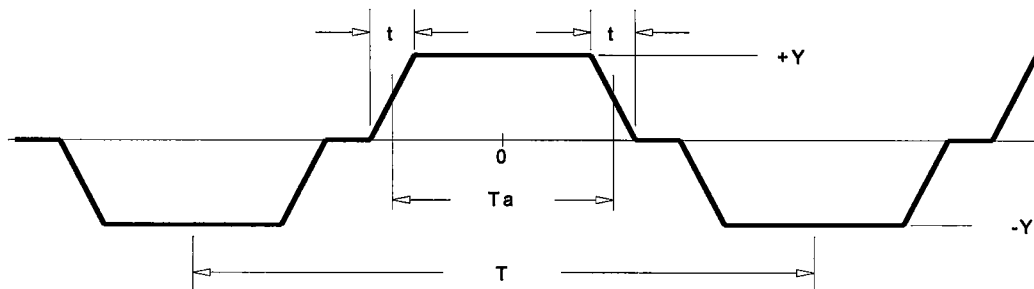
$$T_r = T_f = 0 \quad D = T_a / T = 0.5 \quad (8.11)$$

$$H_0 = 0 \quad (8.12)$$

$$H_n = 4Y \frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi} \quad (8.13)$$

Çift n 'ler için $H_n = 0$

8.2.5 Simetrik çift kutup darbe dalga şekli için harmonik formülleri



Şekil 8.5 Simetrik çift kutup darbe dalga şekli

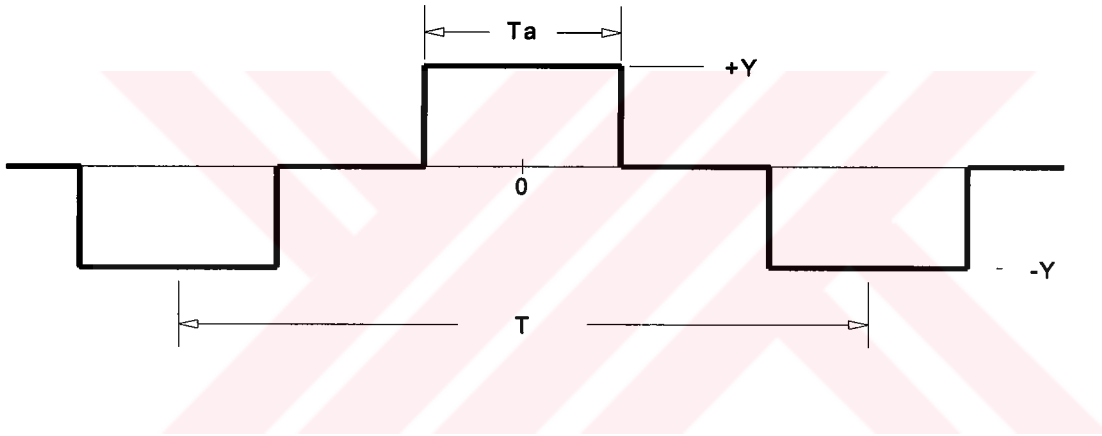
$$T_r = T_f = t \quad D = T_a / T \quad D \leq 0.5 - t / T \quad (8.14)$$

$$H_0 = 0 \quad (8.15)$$

$$H_n = 2Y \frac{(1 - \cos(n\pi)) \sin(n\pi t / T) \sin(n\pi D)}{(n\pi)^2 t / T} \quad (8.16)$$

Çift n 'ler için $H_n = 0$

8.2.6 Simetrik çift kutup darbe katarı için harmonik formülleri



Şekil 8.6 Simetrik çift kutup darbe katarı

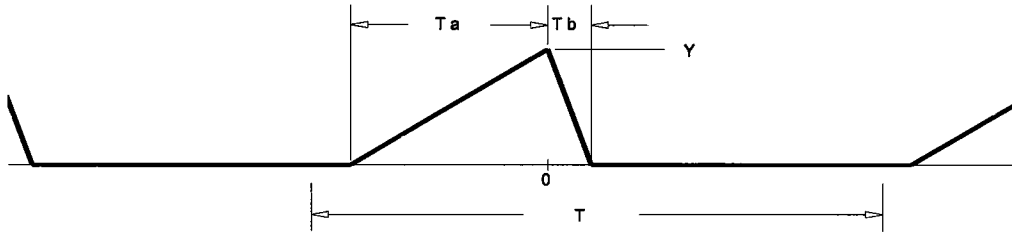
$$T_r = T_f = 0 \quad D = T_a / T \quad D \leq 0.5 \quad (8.17)$$

$$H_0 = 0 \quad (8.18)$$

$$H_n = 2Y \frac{(1 - \cos(n\pi)) \sin(n\pi D)}{n\pi} \quad (8.19)$$

Çift n 'ler için $H_n = 0$

8.2.7 Asimetrik üçgen darbe dalgası için harmonik formülleri



Şekil 8.7 Asimetrik üçgen darbe dalgası

$$H_0 = Y(Ta + Tb) / 2T \quad (8.20)$$

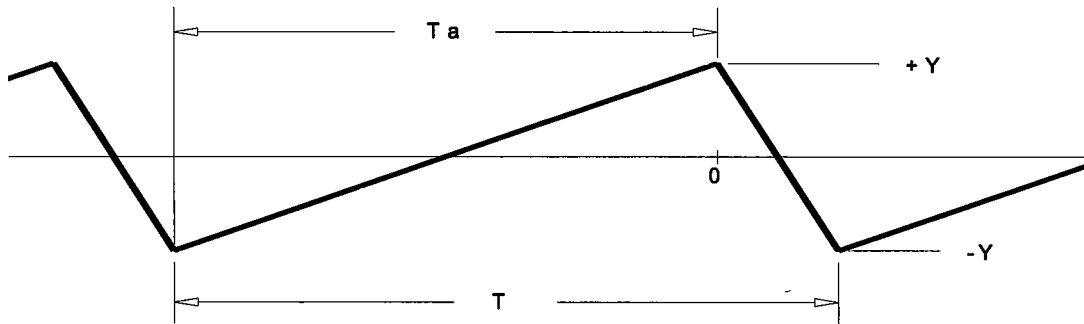
$$A = 2n\pi(Ta / T) \quad B = 2n\pi(Tb / T) \quad (8.21)$$

$$H_n = \frac{Y}{n\pi} \left(\frac{(1 - \cos A)}{A} + \frac{(1 - \cos B)}{B} \right) \cos \theta + \frac{Y}{n\pi} \left(\frac{(\sin A)}{A} - \frac{(\sin B)}{B} \right) \sin \theta \quad (8.22)$$

Direk kayıp hesabı için vektör toplam büyüklüğü

$$|H_n| = \frac{Y}{n\pi} \sqrt{2 \left(\frac{1 - \cos A}{A^2} + \frac{1 - \cos A - \cos B + \cos(A + B)}{AB} + \frac{1 - \cos B}{B^2} \right)} \quad (8.23)$$

8.2.8 Asimetrik üçgen dalga şekli için harmonik formülleri



Şekil 8.8 Asimetrik üçgen dalga şekli

$$D = Ta / T \quad H_0 = 0 \quad (8.24)$$

$$K = 2n\pi \quad (8.25)$$

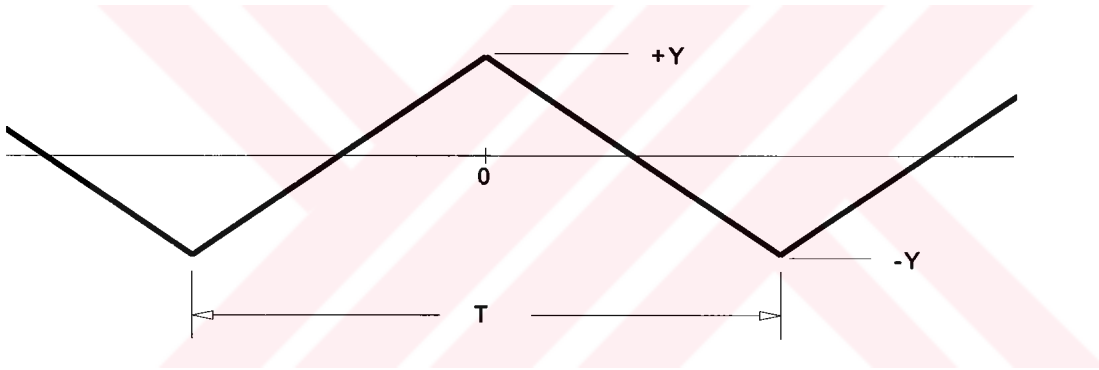
$$H_n = \frac{2Y}{K^2} \left(\frac{1 - \cos(KD)}{D} + \frac{1 - \cos(K(1-D))}{1-D} \right) \cos\theta + \frac{2Y}{K^2} \left(\frac{1 - \sin(KD)}{D} + \frac{1 - \sin(K(1-D))}{1-D} \right) \sin\theta$$

(8.26)

Direk kayıp hesabı için vektör toplam büyüklüğü

$$|H_n| = \frac{\sqrt{2}Y}{(n\pi)^2} \sqrt{\frac{1 - \cos(KD)}{D^2} + \frac{1 - \cos(KD)}{(1-D)^2} + \frac{2 - 2\cos(KD)}{D(1-D)}} \quad (8.27)$$

8.2.9 Üçgen dalga şekli için harmonik formülleri



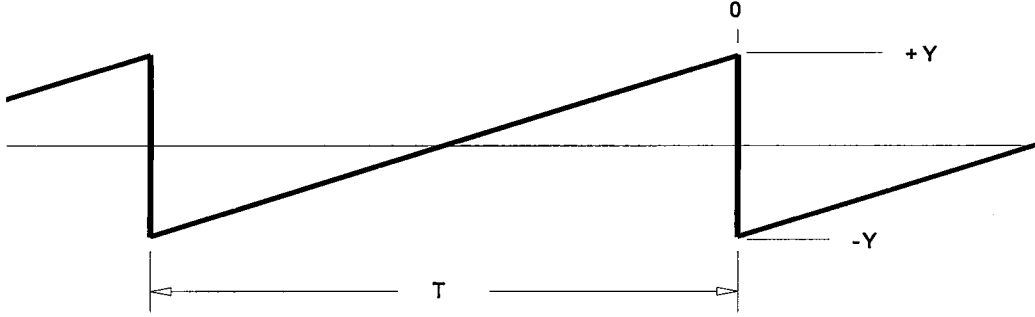
Şekil 8.9 Üçgen dalga şekli

$$H_0 = 0 \quad (8.28)$$

$$H_n = \frac{4Y}{(n\pi)^2} (1 - \cos(n\pi)) \quad (8.29)$$

Çift n 'ler için $H_n = 0$

8.2.10 Testere dişi dalga şekli için harmonik formülleri

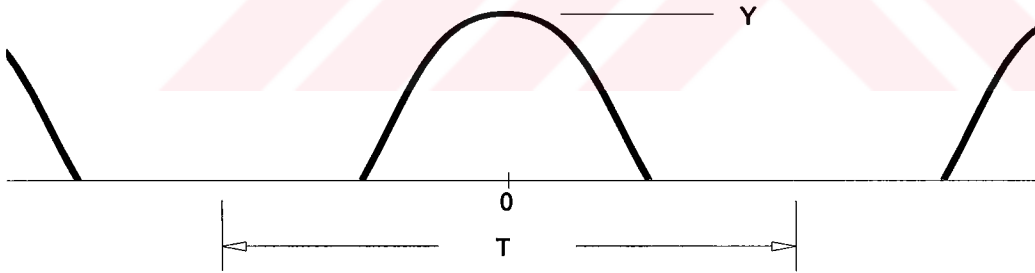


Şekil 8.10 Testere dişi dalga şekli

$$H_0 = 0 \quad (8.30)$$

$$H_n = -\frac{2Y}{n\pi} \sin \theta \quad (8.31)$$

8.2.11 Yarım dalga doğrultulmuş kosinüs dalgası için harmonik formülleri



Şekil 8.11 Yarım dalga doğrultulmuş kosinüs dalgası

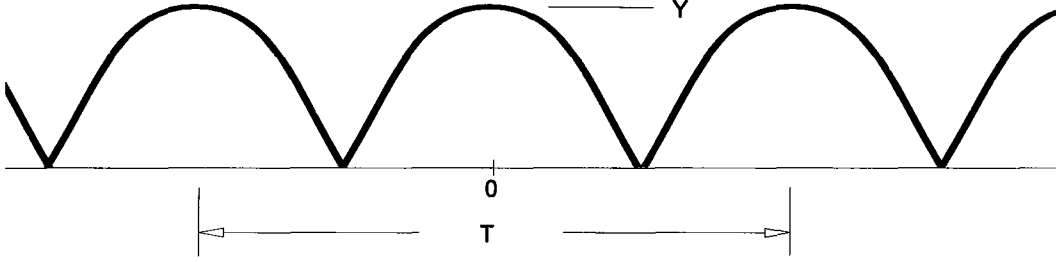
$$H_0 = Y / \pi \quad (8.32)$$

$$H_1 = Y / 2 \quad (8.33)$$

$$H_n = -\frac{2Y}{\pi} \frac{\cos(n\pi/2)}{n^2 - 1} \quad n \geq 2 \text{ için} \quad (8.34)$$

$n \geq 3$ ten büyük tek sayılar için $H_n = 0$

8.2.12 Tam dalga doğrultulmuş kosinüs dalgası için harmonik formülleri



Şekil 8.12 Tam dalga doğrultulmuş kosinüs dalgası

$$H_0 = 2Y / \pi \quad (8.35)$$

$$H_n = -\frac{4Y \cos(n\pi/2)}{\pi (n^2 - 1)} \quad (8.36)$$

Tek n 'ler için $H_n = 0$

8.3 Birleştirilmiş Dalga Şekillerinin Harmonikleri

İki yada daha fazla dalga şeklinin toplamı olan bir dalga şeklinin harmonik bileşenlerini hesaplamak için harmonikler ayrı ayrı ilave edilir. Eğer bütün harmonikler kosinüs veya sinüs ise toplanabilirler.

Asimetrik dalga şekillerinde bütün harmonikler kosinüs değildir, bununla birlikte hem kosinüs hem de sinüs bileşenlerine sahiptir.

Kosinüs ve sinüs bileşenlerinin genliklerinin ayrı ayrı toplanmasıyla vektör eklenmesinden kaçınılır. Dalganın genliği etkin değer olarak toplanan kosinüs ve sinüs genliklerinin vektörel toplamına eşittir.

$$H_n = \sqrt{(\sum \cos)^2 + (\sum \sin)^2} \quad (8.37)$$

8.3.1 Yükselme ve düşme süreleri

Sonlu yükselme süreli kare ve çeşitli dalga harmoniklerinin hesaplanması için formüller verilmekle birlikte, bazen sıfır yükselme süreli formüller için harmonik serilerinin kesilmesiyle sonlu yükselme sürelerini tahmin etmek daha pratiktir.

Bu özellikle iletken kayıplarındaki çeşitli yükselme sürelerinin etkilerinin araştırılmasında doğrudur. Her bir yükselme süresi için işletici kayıpları ve harmonik bileşenlerini tekrar hesaplama yerine, her bir harmonik için sırasıyla iletken kayıpları hesaplanır ve toplanır. Uygun sayıdaki harmonik kayıplarının hesaplanması ve toplanmasından sonra görüntü için program durdurulur veya bekletilir, ilgili eşdeğer yükselme süreleri için sonuçlar yazdırılır yada saklanır.

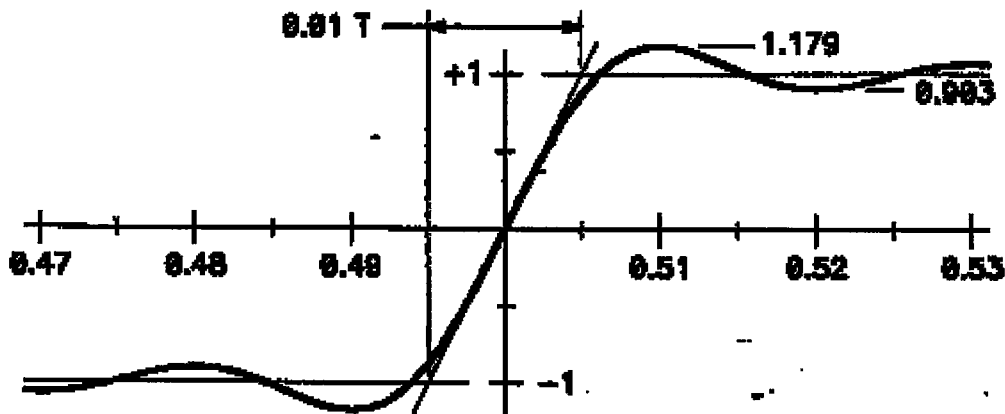
T periyodu ile ilişkili t yükselme sürelerinin tahmin etmek için harmonik sayısı:

$n = T/2t - 1$ ' den sonraki seriler bekletilir. Yükselme süresi T_r ve düşme süresi T_f eşit değilse makul olarak geometrik yaklaşım kullanılır.

$$t = \sqrt{T_r T_f} \quad (8.38)$$

Aşağıdaki dalga şekilleri için ortalama yükselme sürelerinin kullanımının sınırlandırılması gerekir.

$$0.10 \leq T_r / T_f \leq 10$$



Şekil 8.13 49. harmonikte kesilmiş kare dalga

Bu harmonik kesme işlemi aşım (tipik olarak %9) ve çınlama ile sonlu bir yükselme süresinde sonuçlanır. Şekil 9.12’ de 49. harmonikte (%1 yükselme süresi) kesilen bir kare dalga verilmiştir.

Yükselme süresi harmoniklerin sayısı fazla olduğunda, dalganın eğimiyle dalganın ilk ve son değerinin kesişimleri sonucunda oluşan sürenin %50 ‘si olarak tanımlandığı zaman, kare dalgalar için $t=T/(2(n+1))$ formülü geçerlidir.

8.3.2 Ardışık dalga şekilleri için fourier dönüşümü

Ardışık dalga şekillerinin ortalama harmonik bileşeni aşağıdaki işlem ile saptanabilir. Harmonik genlikleri daha öncekine benzer bir tarzda tanımlanır.

n: Harmonik derecesi

H_0 : DC bileşen genliği

H_{cn} : n. harmonik için kosinüs genliği

H_{sn} : n. harmonik için sinüs genliği

1. En hızlı göreceli yükselme süresi ile gerekli toplam harmoniklerin sayısının saptanması:

$$N \geq T/t$$

N: Harmonik sayısı

T: Dalga periyodu

t: En hızlı yükselme süresi

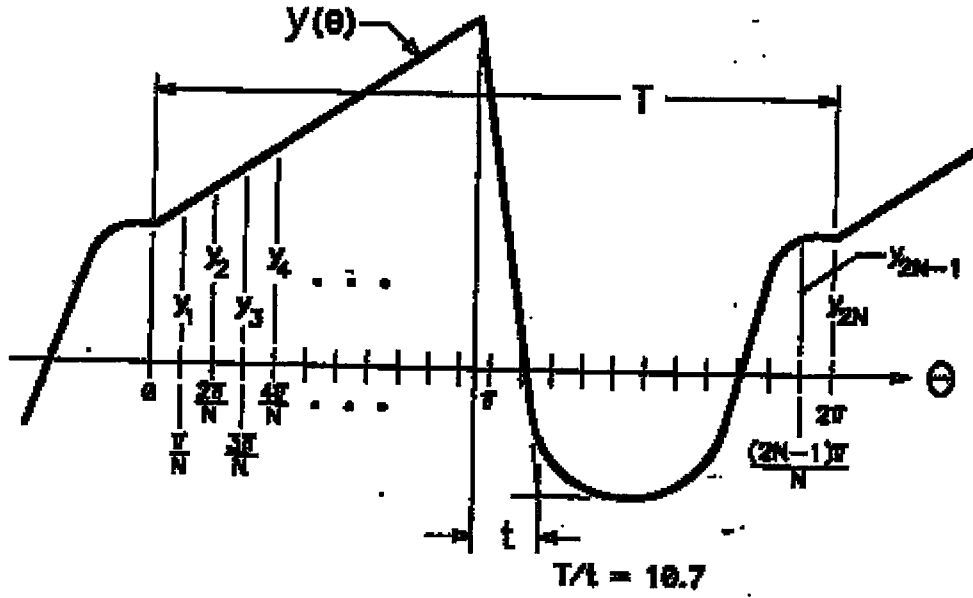
2. Dalga periyodu 2N ordinat noktasına bölünür. Eşit mesafeli bir şekilde π/N radyanları ile aralıklandırılır.

k: ordinat numarası ($1 \leq k \leq 2N$)

Şekil 8.14’ teki dalga şeklinde $T/t = 10.7$ dir. Böylece 22 ordinat noktası gerektiren 11 harmonik hesaplanmalıdır.

3. Aşağıdaki dalga şeklinde gösterildiği gibi her bir ordinat için dalga şekli değeri saptanır.

Y_k : k. ordinattaki dalga şekli değeri



Şekil 8.14 Ardışık dalga şekillerinin harmonik analizi

4. Aşağıdaki formülle DC genliği, kosinüs ve sinüs harmonik genliği hesaplanır.
5. Hcn ve Hsn 'nin vektör toplamı olarak harmonik genliği hesaplanır.

$$H_o = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^{2N} y_k \quad (8.39)$$

$$H_{cn} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{2N} y_k \cos(k\pi n / N) \quad , n < N \text{ için}$$

$$= \frac{1}{N} (y_1 \cos(\pi n / N) + y_2 \cos(2\pi n / N) + \dots + y_{2N} \cos(2\pi n)) \quad (8.40)$$

$$H_{CN} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^{2N} y_k \cos(k\pi) \quad (8.41)$$

$$H_{sn} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{2N} y_k \sin(k\pi n / N)$$

$$= \frac{1}{N} (y_1 \sin(\pi n / N) + y_2 \sin(2\pi n / N) + \dots + y_{2N} \sin(2\pi n)) \quad (8.42)$$

Bu dönüşüm, asıl dalga şeklinin tam harmonik genliğini vermez. Çünkü örnekleme noktaları arasında dalga şekillerinin değerleri ihmal edilir.

Bununla birlikte hesaplanan harmonikler toplandığında örnekleme noktasında asıl dalga şekline tam olarak benzer bir dalga şekli verir. Eğer yeterli harmonik sayısı kullanılırsa hata küçük olacaktır.

Yukarıda önerilen $N=T/t$ kriteri iletken kayıp hesapları için uygun sonuçlar verir.

Yeterli harmonik olup olmadığından şüphe edildiğinde iki çeşit kontrol yapılır.

1. Harmonik bileşenler toplanır ve orjinal dalga şekli ile sonuçlar kıyaslanır.
2. Toplanan harmoniklerin etkin değeri hesaplanır ve orjinali ile kıyaslanır. İstenen hassasiyete bağlı olarak %1-5 arasındaki değerler kabul edilir.



9. SİMÜLASYON PROGRAMININ TANITIMI VE TASARIM ÖRNEKLERİ

9.1 Filtre İndüktörü Tasarım Örneği

30 μ H, 50A DC indüktöre , 100 kHz frekansında 104 V etkin değerinde bir kare dalga uygulanmıştır. [1]

$$\Delta I = E \frac{\Delta t}{L} = (104V)(5\mu s)/(30\mu H) = 17.33A \text{ (tepeden tepeye)}$$

$$I_{rms} = I_{(p-p)} / 2\sqrt{3} = 5 A$$

Çekirdek: EE 91/64/21, TDK H7C1 Malzemesi

$$A_e = 6.2 \text{ cm}^2 \quad V_e = 101 \text{ cm}^3$$

9.1.1 Çekirdek akı kaybı veya doyma sınırının incelenmesi

Kayıp sınırının kontrolü :

Çekirdek alanı: 142 cm^2

$$\Delta T = 40 - 50 \text{ }^\circ\text{C} \quad Pd < 75 \text{ mW/cm}^2$$

$$P_{fe} \leq 10.6 \text{ W ya da } 105 \text{ mW/cm}^3$$

100 KHz de, 100 $^\circ\text{C}$; Bmax=900 G, ya da $\Delta B=1800 \text{ G}$

$$N = \frac{(E)(\Delta t)(10^8)}{A_e \Delta B} \quad E=104 \text{ V} \quad \Delta t = 5\mu s$$

$$A_e = 6.2 \text{ cm}^2 \quad \Delta B = 1800 \text{ G}$$

$$N \geq 4.66 \text{ sarım}$$

Doyma sınırının kontrolü:

$$B_{max} = 3000 \text{ G} \quad I_p = 50 + \frac{1}{2}(17.33) = 58.67 \text{ A}$$

$$L=30 \mu H \quad Ae=6.2 \text{ cm}^2$$

$$N = \frac{(10^8)(Ip)(L)}{(B \text{ max})(Ae)} = 9.46$$

Daha fazla sarım sayısı gerekir. Çekirdek doymasından kaçınmak için, çekirdek kayıplarını sınırlamak için doyma sınırı uygulanır ve N sarım sayısı 10 seçilir.

9.1.2 Sargı tasarımı

$I_{dc} = 10$ (I_{ac}) olduğundan, sargı öncelikle DC kayıpları için tasarlanır; her bir tabakaya bir sarım olacak şekilde 10 sarımlı bakır şerit kullanılırsa;

$$W=2.54 \text{ cm} \quad l_{mt}=16.5 \text{ cm}$$

$$H=0.051 \text{ cm} \quad \rho = 2.28 \times 10^{-6} (100 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Sargı DC direnci;

$$R_{dc} = \rho \frac{(l_{mt})(N)}{(W)(h)} = (2.28 \times 10^{-6}) \frac{(16.5)(10)}{(2.54)(0.051)} = 0.0029 \text{ ohm}$$

DC kayıp gücü;

$$P_{dc} = (I_{dc})^2 R_{dc} = (50)^2 (0.0029) = 7.25 \text{ W}$$

97 mW/cm² lik bir kayıp için “E” çekirdeğinin kenarlarından aralıklandırılmış bir sargının yüzey alanı 75 cm² civarındadır. Bu ΔT nin 50 ile 60 °C arası olmasına neden olur, bu da AC bakır kayıpları çok yüksek olmadığı durumda kabul edilebilirdir.

AC sargı kayıplarının kontrolü:

$$R_{ac} = K_r R_w^* \quad h=0.051 \text{ cm} \quad \delta = 7.6 \sqrt{F} = 0.024 \text{ cm}$$

$$h / \delta = 2.1 \quad K_r=58$$

$$R_w^* = \rho \frac{(l_{mt})(N)}{(W)(\delta)} = (2.28 \times 10^{-6}) \frac{(16.5)(10)}{(2.54)(0.024)} = 0.00617 \text{ ohm}$$

$$R_{ac}=58 (0.00617)=0.358 \text{ ohm}$$

$$P_{ac}=(5.0)^2(0.358)=8.95 \text{ W}$$

AC akımının DC akımına oranı 1/10 olmasına rağmen AC bakır kaybı, DC kaybindan fazladır. DC kayıpları zaten üst sınıra yakın olduğundan, AC kayıplarını düşürmek için bakır kalınlığını düşürülemez.

Geleneksel olarak, daha büyük ya da çoklu çekirdekler kullanılmalıdır. Bununla birlikte, DC sargının içinde paralel AC sargısı kullanma ilk yapılacaklar arasındadır.

Daha az kayıplı AC sargısı tasarımı:

En düşük AC direnç sargısı:

$$h/\delta = 0.4$$

$$\delta = 0.024 \text{ cm} \quad h = 0.40\delta = 0.0096 \text{ cm}$$

$$Kr = \frac{Kr}{m} m = 3.35 \quad lmt = 14 \text{ cm}$$

$$Rw^* = \rho \frac{(lmt)(N)}{(W)(\delta)} = (2.28 \times 10^{-6}) \frac{(14)(10)}{(2.54)(0.021)} = 0.006$$

$$Rac = (3.35)(0.006) = 0.02 \text{ ohm}$$

$$Pac = (5.0)^2(0.02) = 0.5 \text{ W}$$

Kayıp değeri gerektiğinden azdır ve 10 tabakalı sargının, kalan çekirdek alanına uyması güç olacaktır.

Tek tabakalı AC sargısı:

3 paralel #20 AWG iletkenin 10 sarımı sargıya uygundur ve AC kayıpları kabul edilebilir ise daha kolay olacaktır.

$$h \cong 0.069 \text{ cm}$$

Tek tabakalı sargı için $h/\delta > 1.0$, $Kr \approx 1.0$ 'dir.

$$Rac = Rw^* = \rho \frac{(lmt)(N)}{(W)(\delta)} = (2.28 \times 10^{-6}) \frac{(14)(10)}{(0.254)(0.021)} = 0.06 \text{ ohm}$$

$$Pac = (5)^2(0.06) = 1.5 \text{ W}$$

Çekirdeğin Boşluklandırılması:

Tüm parametreler tanımlandığı için sırada @ hava boşluğu hesabı vardır, hava boşluğu aşağıdaki formülden hesaplanırsa;

$$@ = \frac{1.257(N)^2(Ae)}{(10^8)(L)} = \frac{1.257(10^2)(6.2)}{(10^8)(30 \times 10^{-6})} = 0.26 \text{ cm}$$

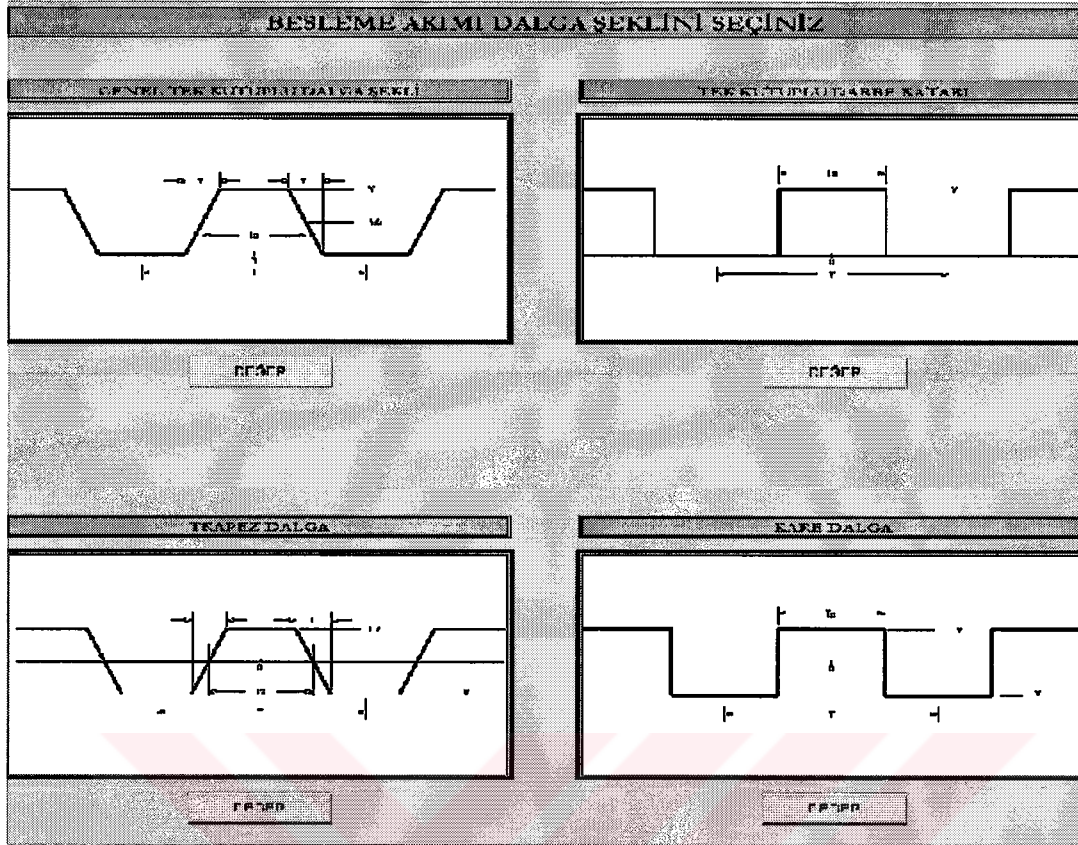
Tablo 9.1 Test sonuçları

	Hesaplanan Değer	Ölçülen Değer	Ölçüm Koşulları
Endüktans	30uH	31.8 uH	
Şerit sargının Rdc değeri	0.0029 ohm	0.0022 ohm	22°C
Şerit sargının Rac değeri	0.36 ohm	0.28 ohm	22°C
Opt. folyo sargısının Rac değeri	0.020 ohm	---	
İletken sargısının Rac değeri	0.060 ohm	0.045 ohm	22°C
Paralel sargının Rac değeri	0.060 ohm	0.045 ohm	22°C

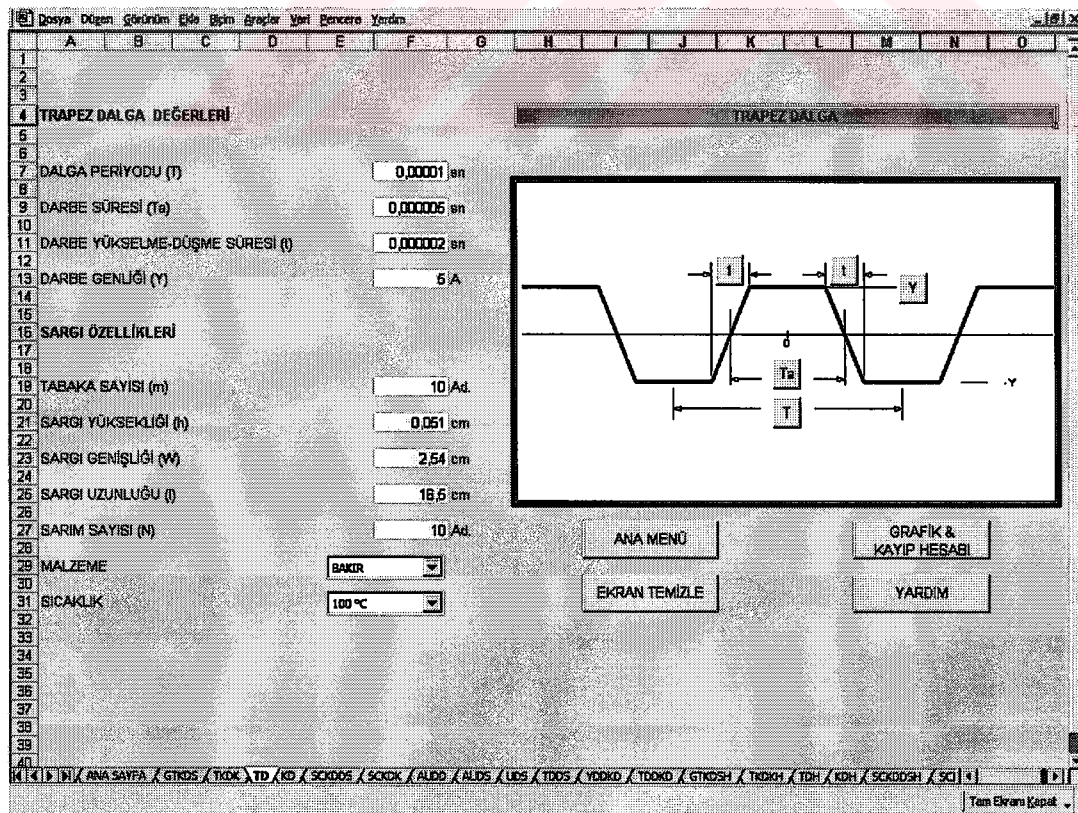
9.2 Simülasyon Programı

9.2.1 Gerçekleştirilen simülasyon programının tanıtımı

Yüksek frekanslı manyetik malzemelerde deri ve yaklaşım etkisi sonucunda akımın iletken malzemedede düzgün akmaması sonucunda AC iletken kayıpları DC iletken kayıplarına oranla daha fazla çıkar. AC iletken kayıplarını en düşük seviyede tutmak için uygun iletken kalınlığı ve sargı biçimleri kullanılmalıdır. Kayıp ayrıca kullanılan iletken malzemesine ve sargı sıcaklığına göre de değişir. Uygun iletken yüksekliği seçimi için besleme akımı dalga şekline ve sargı büyüklüklerine ihtiyaç duyulur. Tüm bu bilgilerin ışığında daha uygun iletken kesitinin seçimi ve iletken kayıplarının hesabı için Excel 'de bir simülasyon programı geliştirilmiştir.



Şekil 9.1 Simülasyon programı ana menüsü



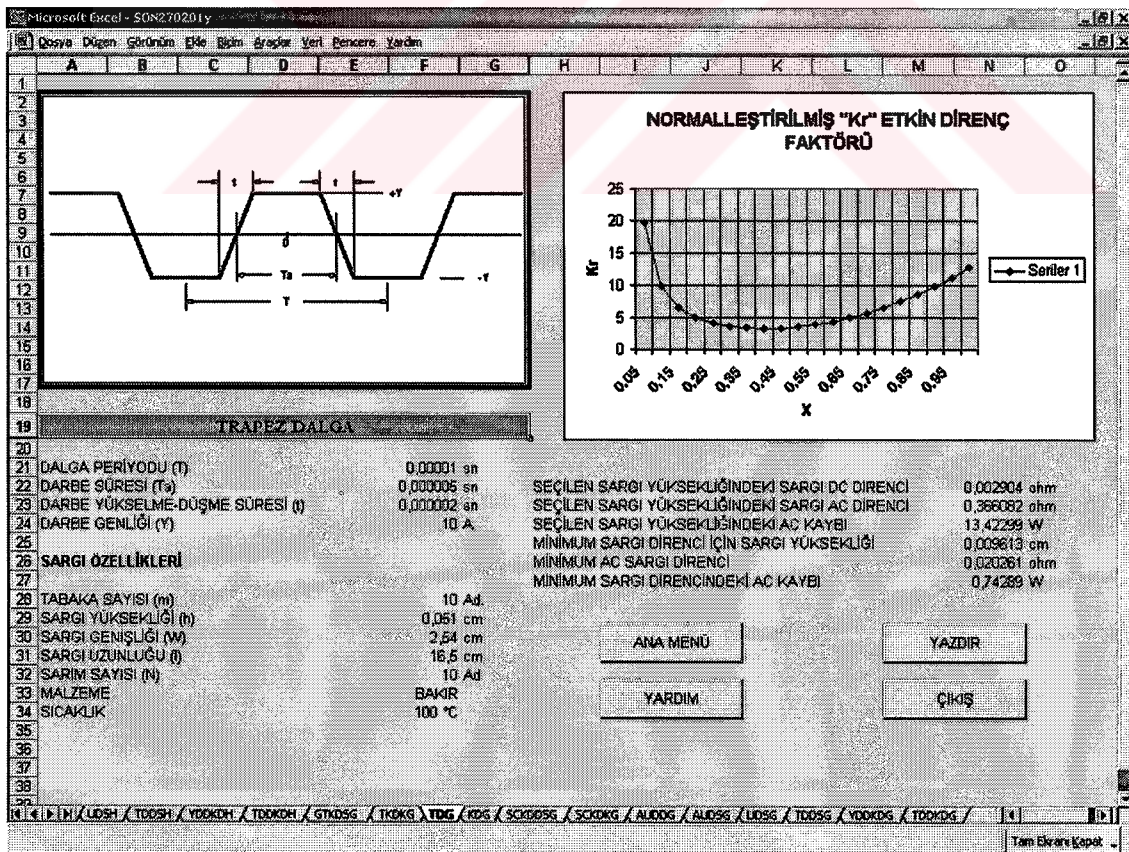
Şekil 9.2 Simülasyon programı değer giriş ekranı

Şekil 9.1' de gösterilen programın ilk ekranında (ana sayfada) sargıyı besleyen akım dalga şeklinin seçilmesi gerekmektedir.

Değer butonuna (örnek olarak trapez dalga değer butonuna) basılmasıyla birlikte akım dalga şekli ve sargı özelliklerinin girilmesi için Şekil 9.2' de gösterilen değer giriş ekranı açılır.

İlk bölümde dalga özellikleri ile ilgili dalga şeklinin tepe değeri Y, dalga periyodu T, darbe yükselme ve düşme süresi t, darbe süresi ya da üçgenin yükselme süresi Ta, üçgenin düşme süresi Tb gibi değerler girilir.

Programın ikinci veri girişi bölümünde ise sargı özellikleri için tabaka sayısı m, sargı yüksekliği h, sargı genişliği W, sargı uzunluğu l, sarım sayısı N, malzeme ve sıcaklık bilgileri girilir. Programda bakır, alüminyum ve pirinç olmak üzere üç çeşit malzeme seçilebilir. Sıcaklık için ise 20 °C, 60 °C ve 100 °C seçenekleri vardır. Değerler girildikten sonra GRAFİK & KAYIP HESABI butonuna basılmasıyla Şekil 9.3' te gösterilen üçüncü yani sonuçların bulunduğu ekran açılır.

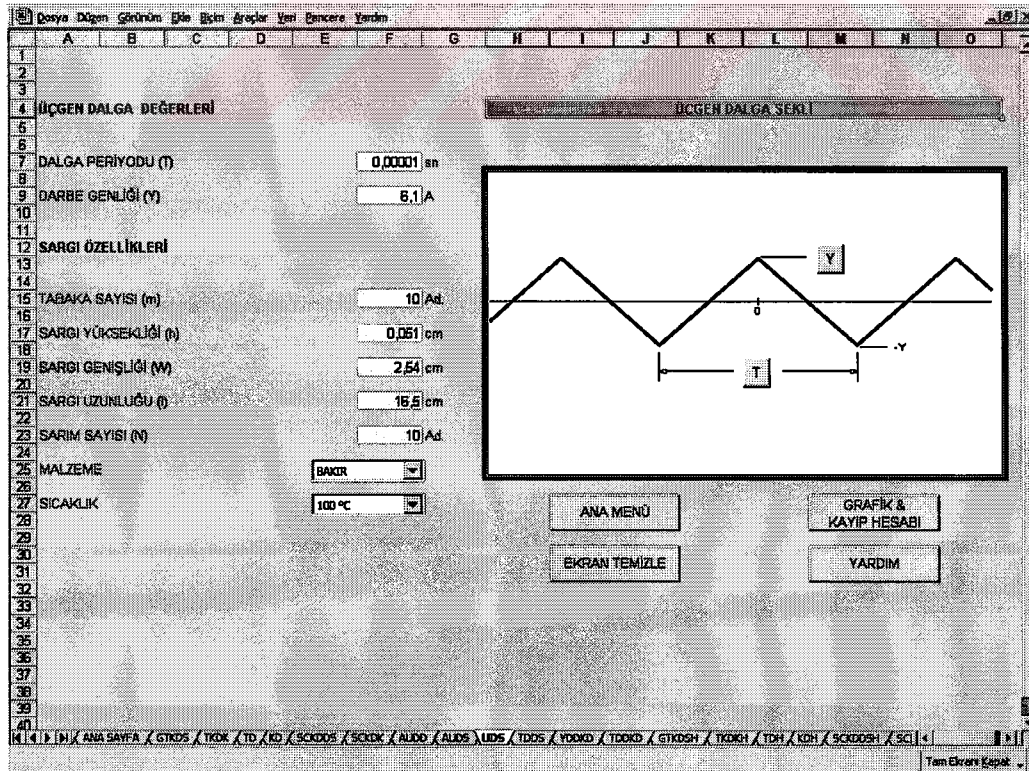


Şekil 9.3 Simülasyon programı sonuç ekranı

SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ SARGI DC DİRENCİ	0,002904 ohm
SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ SARGI AC DİRENCİ	0,366082 ohm
SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ AC KAYBI	13,42299 W
MİNİMUM SARGI DİRENCİ İÇİN SARGI YÜKSEKLİĞİ	0,009613 cm
MİNİMUM AC SARGI DİRENCİ	0,020261 ohm
MİNİMUM SARGI DİRENCİNDEKİ AC KAYBI	0,74289 W

Şekil 9.4 Simülasyon programı sonuçları

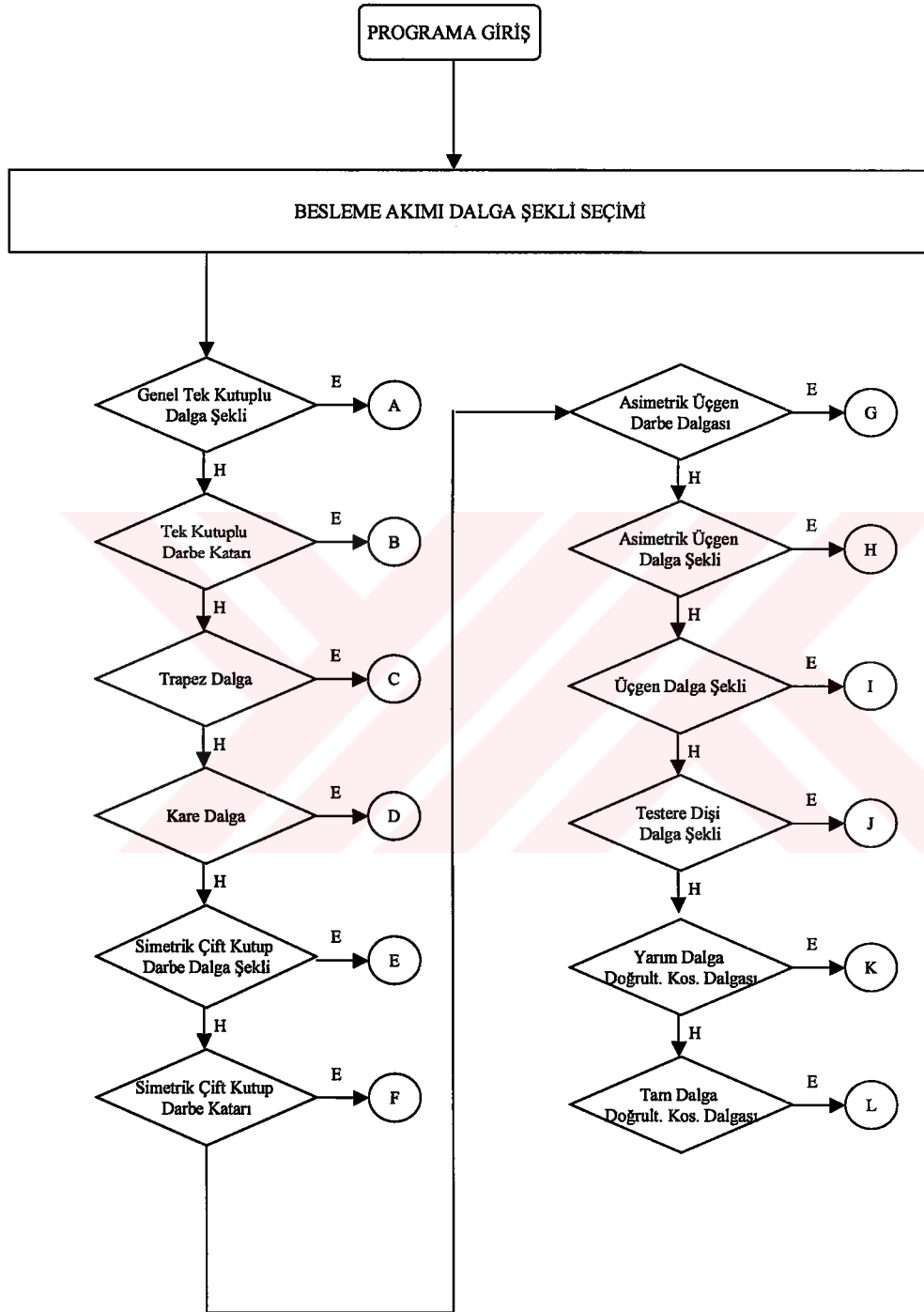
Ekranın sol tarafında girilen değerler ve akım dalga şekli, sağ tarafında ise girilen değerler sonucunda kayıp faktörü eğrisi ve sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar kısmında seçilen sargı yüksekliğindeki sargı DC direnci, seçilen sargı yüksekliğindeki sargı AC direnci, seçilen sargı yüksekliğindeki AC kaybı değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca kayıp faktörü eğrisinden en düşük kaybın olabilmesi için en uygun sargı yüksekliği bulunmuştur. En uygun sargı yüksekliğindeki en düşük AC sargı direnci, en düşük sargı direncindeki AC kaybı hesaplanmıştır ve Şekil 9.4' te gösterilmiştir.



Şekil 9.5 Simülasyon programı değer giriş ekranına örneğin uygulanması

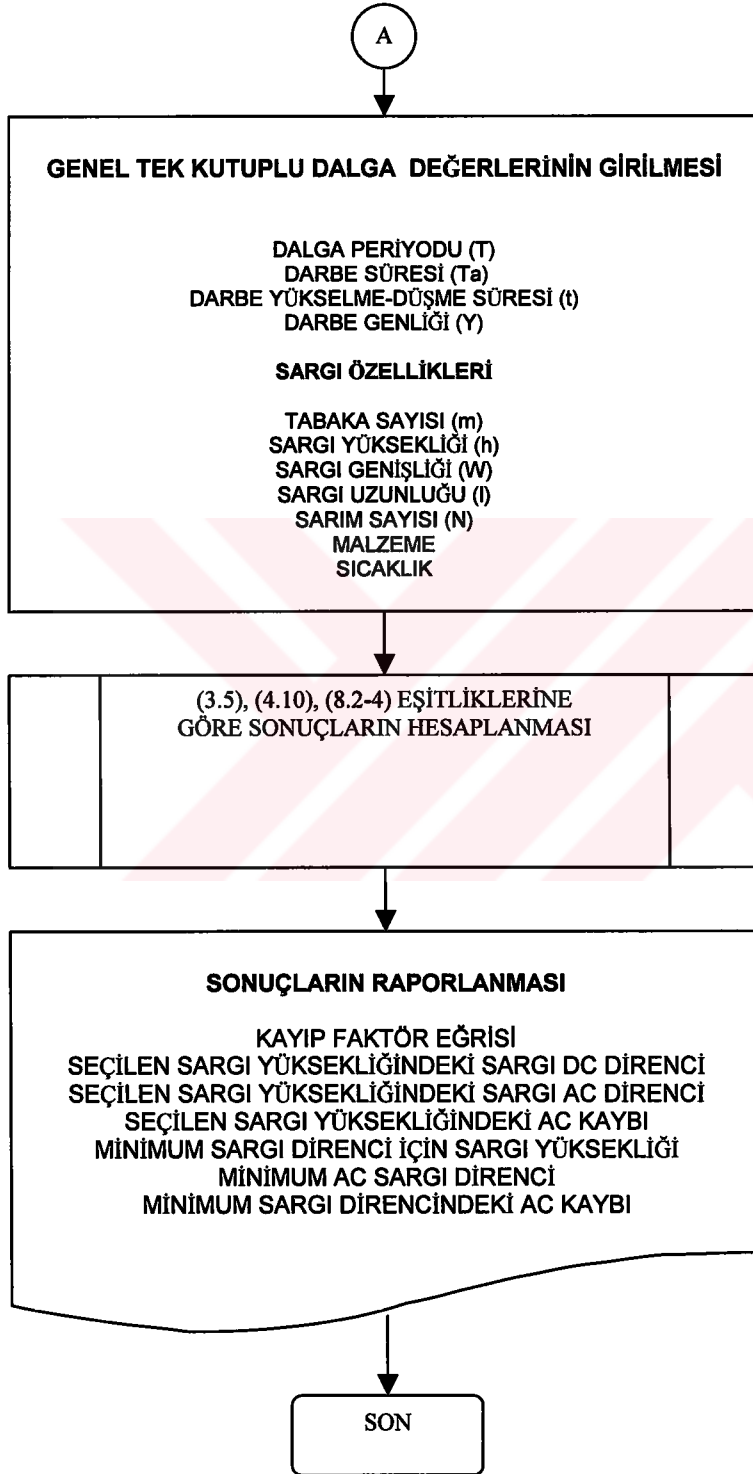
9.2.2 Program akış diyagramı

Şekil 9.6 ve Şekil 9.7' de program mantığını gösteren akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 9.6 Program Akış Diyagramı

Şekil 9.7’ deki program akış diyagramı parçası genel tek kutuplu dalga şekli için verilmiştir. Diğer 11 dalga şekli için algoritma, önceki bölümlerde detayları verilen ilgili eşitlikler kullanılarak benzer şekilde oluşturulmuştur.

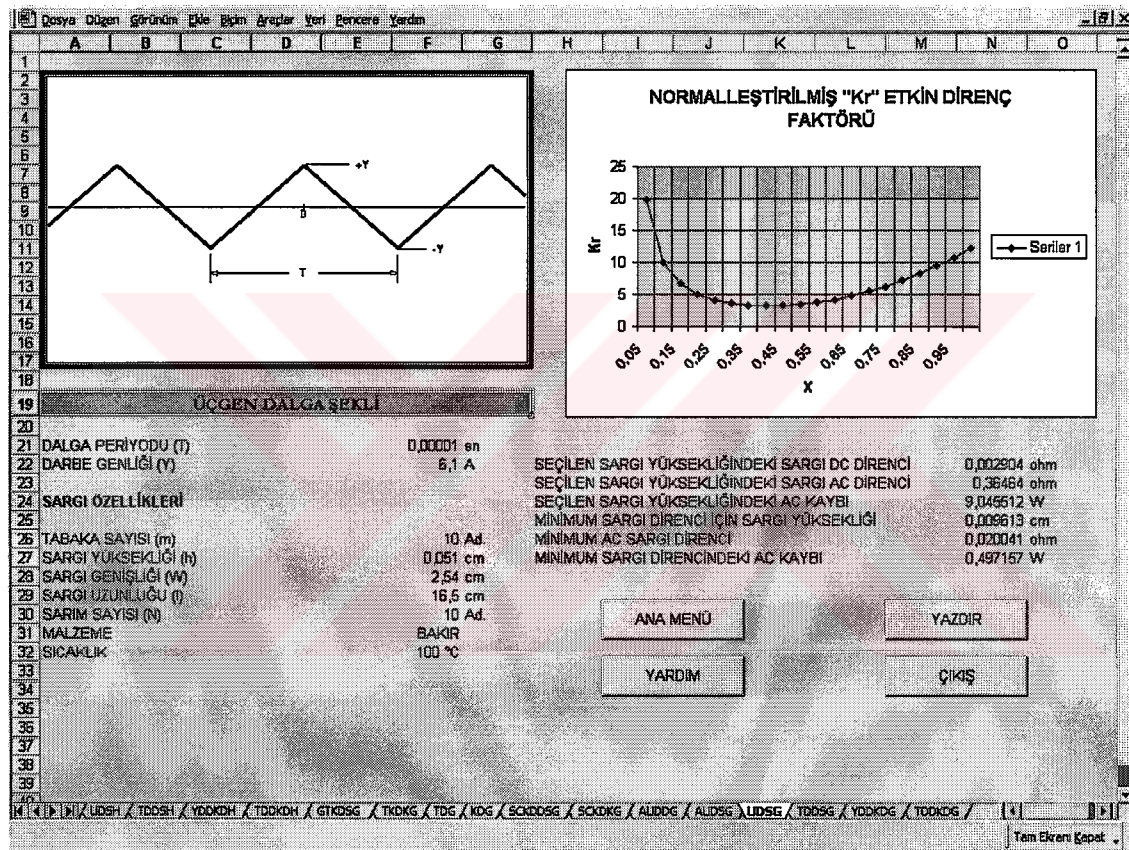


Şekil 9.7 Program Akış Diyagramı (Devam)

9.2.3 Simülasyon programına örneğin uygulanması

Yukarıda bahsedilen örnek simülasyon programına uygulamış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hata oranları verilmiştir.

Simülasyon programının ana sayfasında üçgen dalga şekli seçilir, besleme akımı ve sargı özellikleri Şekil 9.5' teki gibi girilirse Şekil 9.8' de gösterilen sonuçlar elde edilir.



Şekil 9.8 Örnek için simülasyon programı sonuç ekranı

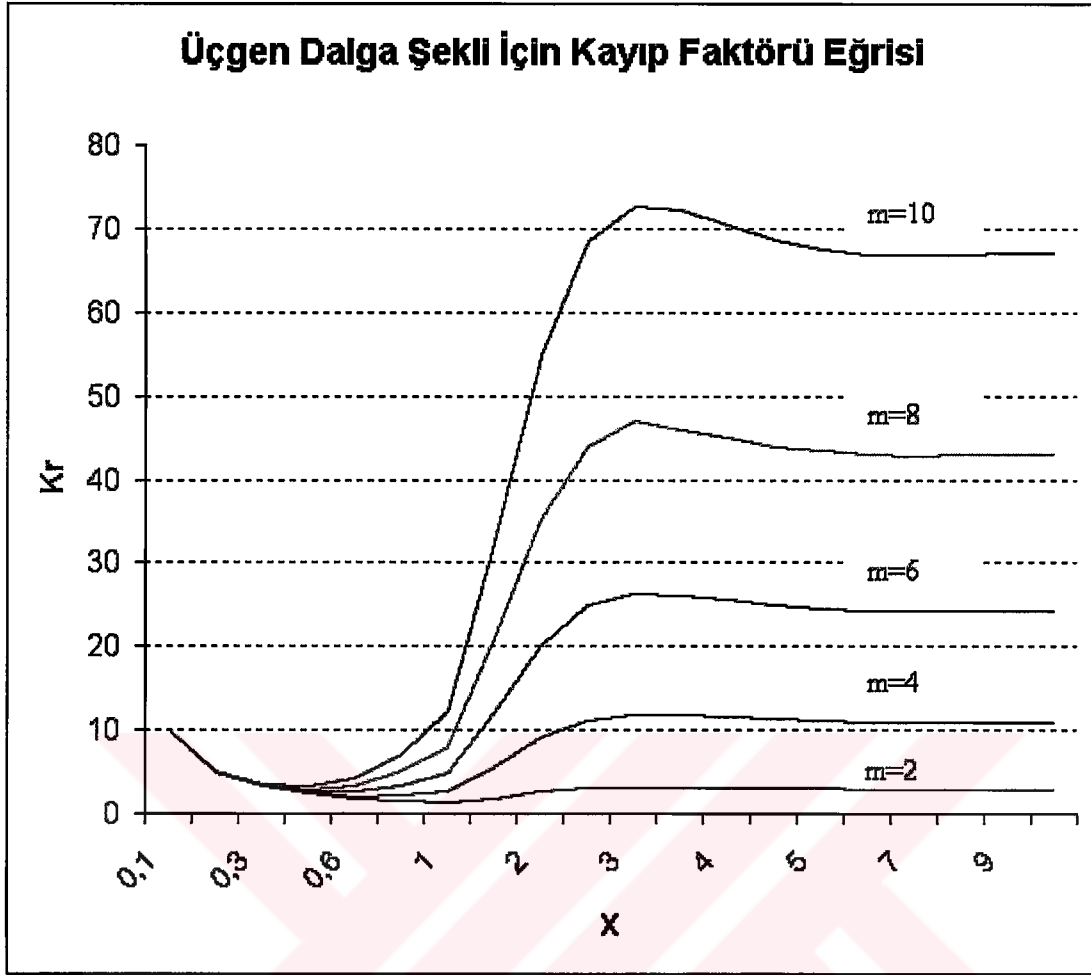
Örnekte ve simülasyon programında hesaplanan değerler Tablo 9.2 'de karşılaştırılmıştır. Simülasyon programında 10 tabakalı bir sistemde kayıp faktörü $K_r=59,17$ bulunmuştur. Örnekte üçgen dalgalar için çizilen eğrilerden (Şekil 4.2' den) kayıp faktörü $K_r=58$ olarak alınmıştır. En düşük kayıp için ise kayıp faktörü K_r örnekte 3,35 simülasyon programda ise 3,25 olarak bulunmuştur. Karşılaştırma sonucu örnekteki değerlerle simülasyon sonuçları birbirleriyle örtüşmektedir.

Tablo 9.2 Örnek sonuçlarının karşılaştırılması

	Örnek Hesaplanan Değerler	Simülasyon Programında Hesaplanan Değerler	Hata (%)
SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ SARGI DC DİRENCİ	0,0029 ohm	0,0029 ohm	0
SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ SARGI AC DİRENCİ	0,358 ohm	0,364 ohm	1,6
SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ AC KAYBI	8,95 W	9,05 W	1,1
EN DÜŞÜK SARGI DİRENCİ İÇİN SARGI YÜKSEKLİĞİ	0,0096 cm	0,0096 cm	0
EN DÜŞÜK AC SARGI DİRENCİ	0,02 ohm	0,02 ohm	0
EN DÜŞÜK SARGI DİRENCİNDEKİ AC KAYBI	0,5 W	0,497 W	0,6

9.2.4 Simülasyon programıyla çizilen kayıp faktörü eğrileri

Üçgen dalga şekli için kayıp faktörü eğrisi Şekil 9.9' da gösterilmiştir. Eğri $0.1 \leq h/\delta \leq 10$ aralığında çizilmiştir.

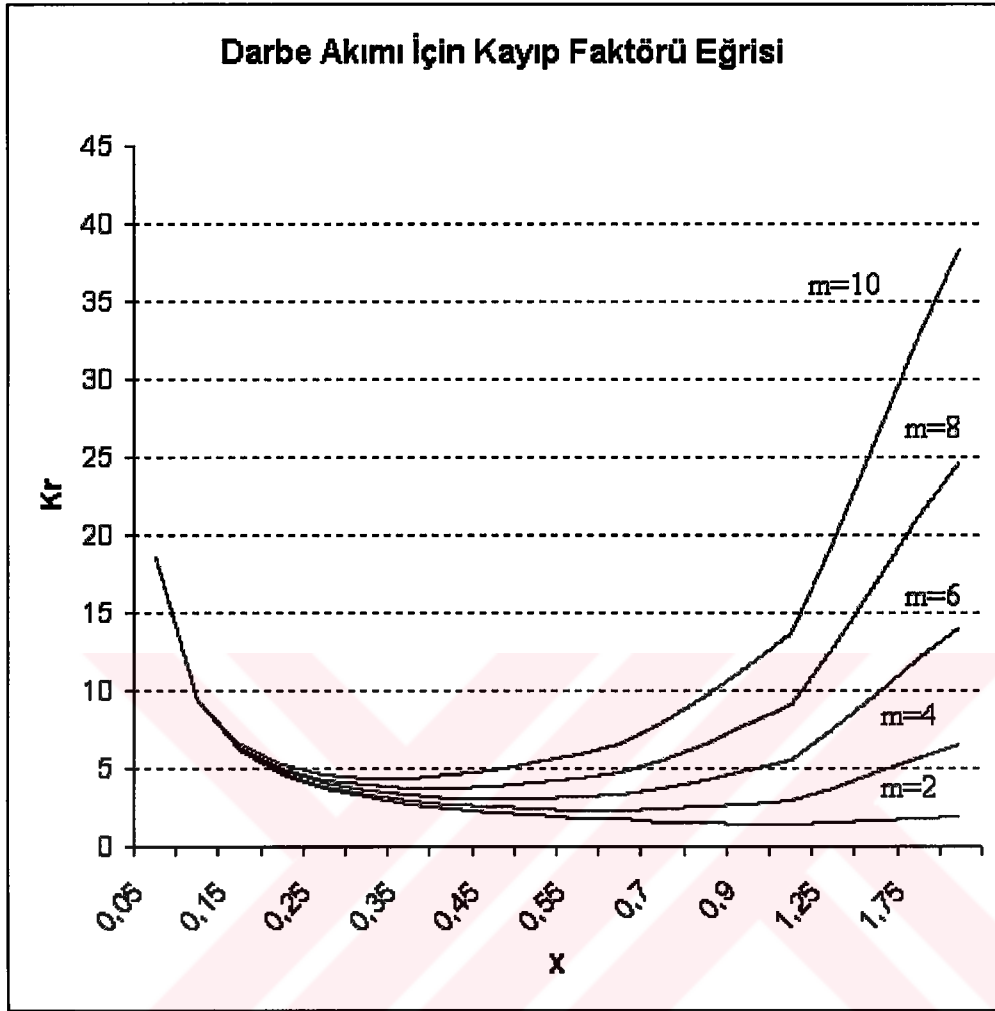


Şekil 9.9 Üçgen dalga şekli için kayıp faktörü eğrisi

Darbe akımı için kayıp faktörü eğrisi Şekil 9.10' da gösterilmiştir. Eğri $0.1 \leq h/\delta \leq 2$ aralığında çizilmiştir.

Tablo 9.3 Darbe akımı için kayıp faktörü ve en uygun sargı bölümü yükseklikleri

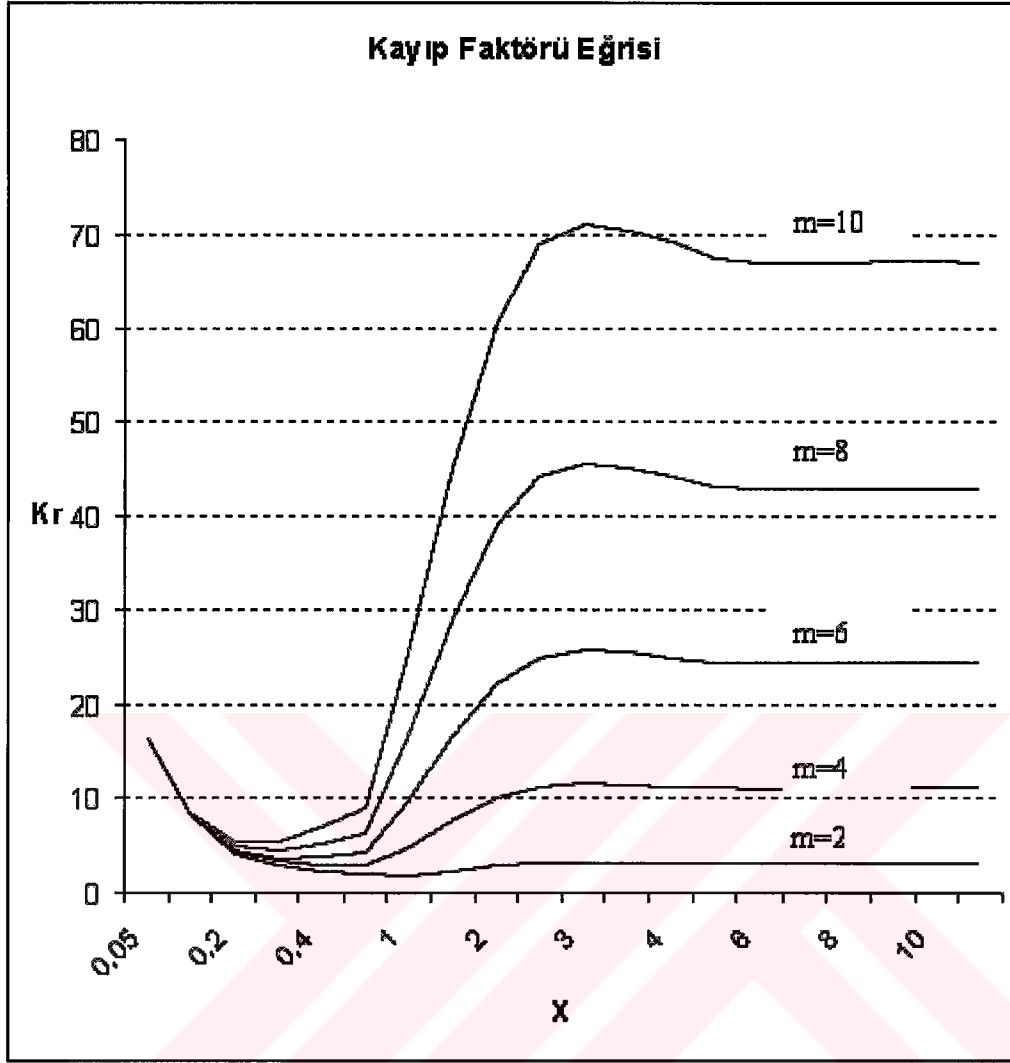
m	Kr/m	m . X
2	0,68	2
4	0,52	2,6
6	0,42	3
8	0,375	3,6
10	0,33	3,9



Şekil 9.10 Darbe akımı için kayıp faktörü eğrisi

Darbe akımına göre daha az harmonik içeren üçgen dalga akımı, aynı özellikteki sargıda daha az kayıp oluşturur. En düşük kayıplar için sargı yüksekliği, darbe akımındaki sargı yüksekliğine oranla daha büyüktür.

Tablo 9.3, $D=0,5$ çalışma oranlı ve %5 yükselme süreli darbe akımı için oluşturulmuştur. Tablodaki K_r değerleri incelenecek olursa belirli bir basit sargı için kayıp, en uygun tabaka kalınlığında en yüksek tabaka sayısı ile en düşük seviyeye getirilebileceği görülür. Tabaka sayısı arttıkça kayıplar azalma eğilimi gösterir. Tabaka sayısı arttıkça en düşük kayıp için gereken sargı bölümü kalınlığı da artar. Daha hızlı yükselme zamanlı akımlar için, sargı bölümünün en uygun kalınlığı tabaka sayısını dikkate almaksızın sabit hale gelir.



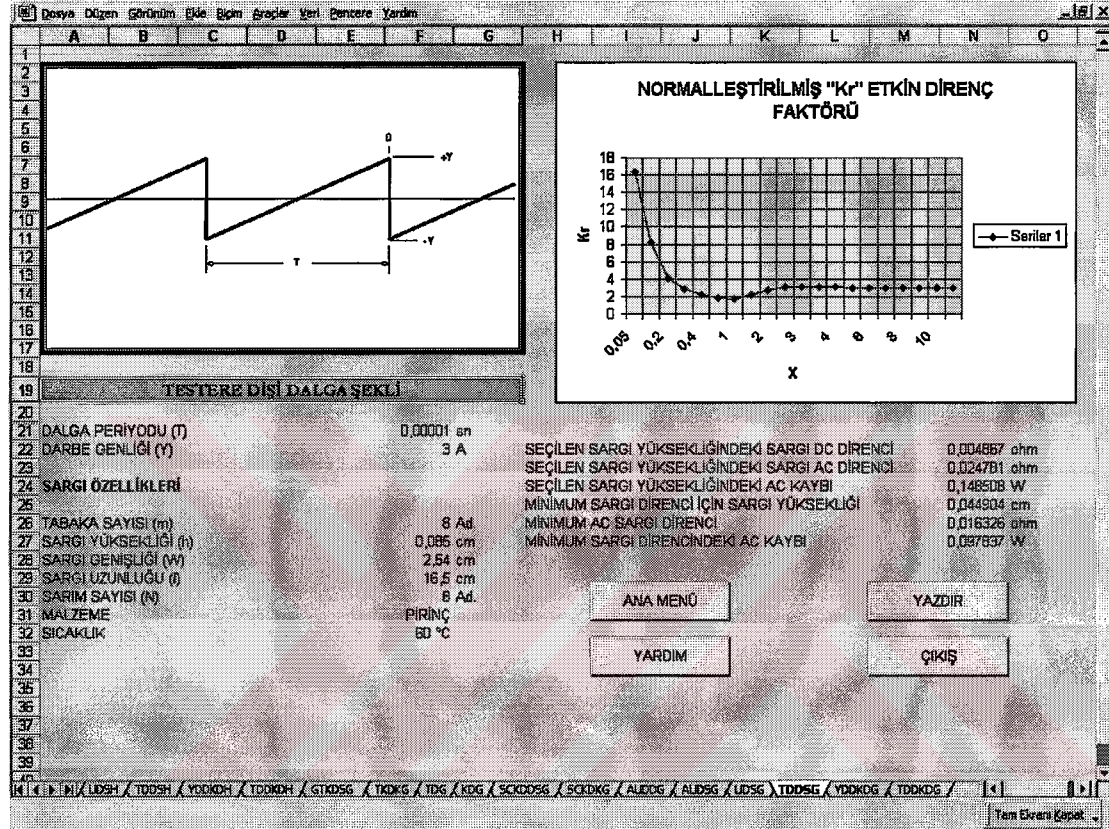
Şekil 9.11 Testere dişi dalga şekli için kayıp faktörü eğrisi

Tablo 9.4 Testere dişi dalga şekli için kayıp faktörü değerleri

	X=0,05	X=0,1	X=0,2	X=0,3	X=0,4	X=0,5	X=1	X=1,5	X=2
m=2	16,33	8,17	4,12	2,82	2,22	1,91	1,77	2,28	2,78
m=4	16,33	8,20	4,27	3,15	2,80	2,79	4,72	7,62	10
m=6	16,34	8,25	4,52	3,71	3,77	4,26	9,65	16,5	22,1
m=8	16,35	8,32	4,86	4,48	5,12	6,31	16,5	29,0	39
m=10	16,36	8,41	5,30	5,48	6,85	8,95	25,4	45,0	60,7

Şekil 9.11' de testere dişi dalga şekli için çeşitli tabaka sayılarında, sargı yüksekliğine göre değişen kayıp faktörü eğrisi çizilmiştir. Tablo 9.4 'den görüldüğü üzere tabaka sayısı arttıkça en düşük kayıp daha küçük sargı yüksekliklerinde elde edilmektedir.

9.2.5 Simülasyon programı ile tasarım örnekleri



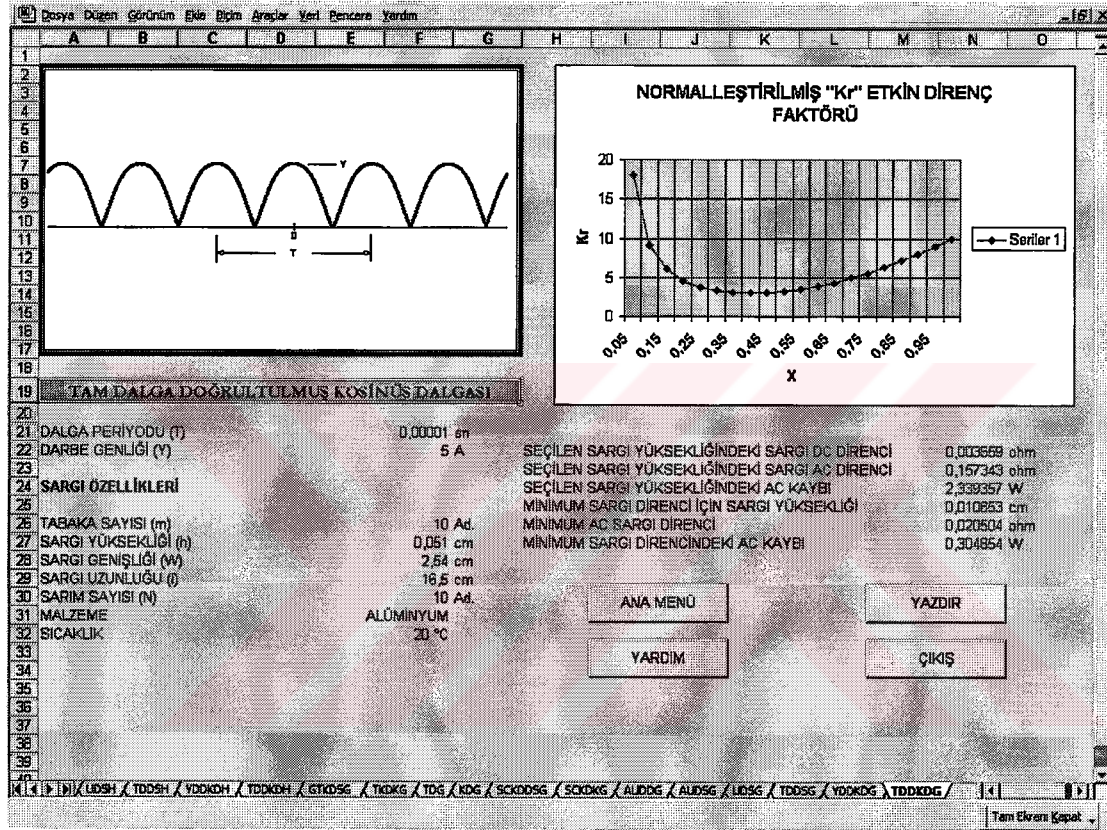
Şekil 9.12 Testere dişi dalga şekilli akım için simülasyon programı sonuç ekranı

Sargı özellikleri ve testere dişi dalga şekilli akım için değerler Şekil 9.12' deki gibi girilmiştir.

SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ SARGI DC DİRENCİ	0,004867 Ohm
SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ SARGI AC DİRENCİ	0,024781 Ohm
SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ AC KAYBI	0,148508 W
MİNİMUM SARGI DİRENCİ İÇİN SARGI YÜKSEKLİĞİ	0,044904 Cm
MİNİMUM AC SARGI DİRENCİ	0,016326 Ohm
MİNİMUM SARGI DİRENCİNDEKİ AC KAYBI	0,097837 W

Şekil 9.13 Simülasyon programı sonuçları

Şekil 9.13' te gösterildiği gibi 100 kHz, 3 A genlikli testere dişi dalga şekilli akım için deri ve yaklaşım etkisi sonucunda sargının AC direnci, DC direncine oranla 5-6 kat daha fazla çıkmıştır. Uygun bir sargı yüksekliğinde AC direnci ve bunun sonucunda da AC kaybı minimuma çekilmiştir. Sargı malzemesi olarak pirinç kullanılmıştır. Sargı sıcaklığı 60 °C olarak düşünülmüştür.



Şekil 9.14 Tam dalga doğrultulmuş kosinüs dalgalı akım için simülasyon programı sonuç ekranı

SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ SARGI DC DİRENCİ	0,003659 ohm
SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ SARGI AC DİRENCİ	0,157343 ohm
SEÇİLEN SARGI YÜKSEKLİĞİNDEKİ AC KAYBI	2,339357 W
MINIMUM SARGI DİRENCİ İÇİN SARGI YÜKSEKLİĞİ	0,010853 cm
MINIMUM AC SARGI DİRENCİ	0,020504 ohm
MINIMUM SARGI DİRENCİNDEKİ AC KAYBI	0,304854 W

Şekil 9.15 Simülasyon programı sonuçları

Sargı özellikleri ve tam dalga doğrultulmuş kosinüs dalgalı akım için değerler Şekil 9.14' teki gibi girilmiştir.

100 kHz, 5 A genlikli tam dalga doğrultulmuş kosinüs dalgalı akım için deri ve yaklaşım etkisi sonucunda kayıp incelenmiştir. Sargı malzemesi olarak alüminyum kullanılmıştır. Sargı sıcaklığı 20 °C olarak düşünülmüştür.

Şekil 9.15' te simülasyon programı sonuçlarından da açıkça görüleceği üzere deri ve yaklaşım etkisi sonucunda AC direnci, DC direncinin 40-50 katı daha fazla çıkmıştır. Uygun bir sargı yüksekliğinin seçilmesiyle AC direnci seçilen sargı yüksekliğindeki AC direncine oranla 8 kat daha düşük yapılabilir.



10. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek frekanslı transformatör ve indüktör sargılarında, deri ve yaklaşım etkisi sonucunda oluşan kayıplar hesaplanmıştır. Bilindiği gibi yüksek frekanslı bir akımla beslenen sargıda akım iletkenin içine girmez, doğrudan frekansla orantılı olarak iletkenin yüzeyinde yoğunlaşır. Bu deri etkisinin yanında, bir de komşu iletkenlerin oluşturduğu manyetik alanlar nedeniyle akım iletkenin kesitine eşit yoğunluklarda yayılmaz. Deri ve yaklaşım etkisi sonucunda sargının DC direnci AC direncine oranla çok daha büyük olur. Bu ise sargı da aşırı güç kaybına ve sargı sıcaklığının artmasına neden olur.

Yüksek frekanslarda sargı kayıplarının incelenmesi için Dowell 'ın sargı dönüşümü ve denklemleri kullanılarak sargı kayıp faktörü eğrisi çizilmiştir. Daha sonra bu denklemler sinüsoidal olmayan akım dalga şekillerine uygulanmıştır. Transformatör ve indüktör sargılarındaki kayıpları azaltmanın yolu, sargı kayıp faktör eğrisinden görüleceği üzere uygun bir sargı yüksekliği seçmekle mümkün olur. Bir diğer önlem ise sargı yapıları ve iletken çeşitleridir. Yüksek frekanslı uygulamalarda litz iletkeninin kullanımı çok yaygındır.

Sinüsoidal olmayan akımla beslenen sargı için en uygun sargı yüksekliği sadece dalgaının temel frekansı ile belirlenemez. Dalgaının birçok harmonik frekansı hesaba katılarak sargı yüksekliğinin seçilmesi gerekir. Sinüsoidal olmayan akım dalgalarıyla beslenen sargıların AC direncini, DC direncini, en uygun kayıp için gerekli sargı yüksekliği gibi sonuçları elde edebilmek ve kayıp faktörü eğrisini çizdirebilmek için bir simülasyon programı yapılmıştır. Çeşitli örneklerle harmoniğin, deri ve yaklaşım etkisinin sargı kaybı için önemi anlatılmıştır. Örnekle simülasyon programı sonuçları karşılaştırılmış farkın % 0-1,6 arasında olduğu görülmüştür. Sonuçlardaki bu farkın büyük bir kısmı sayı yuvarlamalarından kaynaklanmıştır.

Belirli bir basit sargı için kayıp, en uygun sargı yüksekliğinde en yüksek tabaka sayısı ile en düşük seviyeye getirilebileceği görülmüştür. Tabaka sayısı arttıkça kayıplar azalma eğilimi göstermiştir. Tabaka sayısı arttıkça en düşük kayıp için gereken sargı bölümü kalınlığı da artmıştır. Hızlı yükselme süreli akımlar için, sargı

bölümünün en uygun kalınlığı tabaka sayısını dikkate almaksızın sabit hale gelmiştir. Yüksek harmonik bileşeni içeren dalgalar için çizilen kayıp faktörü eğrisinin değerleri diğerlerine oranla daha yüksek çıkmıştır. Harmonik bakımından zengin olan dalgalarla beslenen sargılarda en düşük kayıplar için daha ince sargı tabakaları kullanılması gerekmiştir. Uygun bir sargı yüksekliği seçilemediği zaman AC kayıpları DC kayıplarına oranla 10 ila 100 kat daha fazla çıkmasına neden olmuştur.



KAYNAKLAR

- [1] **Carsten, B.**, 1998. Calculating and controlling skin and proximity effect conductor losses in switchmode magnetics, *PCIM International Conference*, USA, 25 Mayıs.
- [2] **Billings, Keith H.**, 1989. Handbook of Switchmode Power Supplies, McGraw-Hill, Newyork.
- [3] **KO Systems**, 1998. Proxy :A Proximity and Skin Effect Analyzer, KO Systems, USA.
- [4] **Dowell, P. L.**, 1966. Effects of eddy currents in transformer windings, *Proc IEE*, Vol 113 No. 8.
- [5] **Perry, M.**, 1979. Multiple layer series connected winding design for minimum losses, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 1, 116-123.
- [6] **Sullivan, C.R.**, 1999. Optimal choice for number of strands in a litz-wire transformer winding, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, no. 2.
- [7] **N.Y.**, 1977. Electronics Designers' Handbook, McGraw-Hill, Newyork.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin EMANET, 1976 yılında Trabzon 'da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini 1982 ile 1990 yılları arasında İstanbul'un Bahçelievler semtindeki Kazım Karabekir İlköğretim okulunda tamamlayarak , 1990 yılında Ataköy Lisesinde lise öğrenimine başladı.

1993 yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümündeki üniversite öğrenimine ingilizce dili eğitimiyle başladı. 1998 yılında üniversiteden mezun olan Hüseyin EMANET, yine aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programına başladı.

