

Yüksek Frekanslarda Silindirik Havalı Bobin ve Ferromagnetik Çekirdekli Bobin Hesaplanması

Yazan :
Eren H. BAŞARAN
Elek. T. Müh.
(Lefkoga)

ÖZET :

Bu yazı yükseli frekanslarda silindirik havalı bobin ve ferromagnetik çekirdekli bobin hesaplanmasının ana hatlarını anlatmaktadır.

SUMMARY:

This article is explains the main factor of design criteria of the coil with the ferromagnetic core and without core in the high frequency.

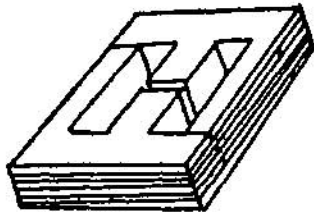
I. Tek - tabakalı silindirik havalı bobin :

H. Nagaoka ve L. Lorenz, sık sargılı tek tabakalı bobinin indüktansunu hesaplanması için şu formülü veriyor (1):

$$L = K \cdot \frac{\pi D^2 \cdot N^2}{10^3 (\mu H)} \quad (1)$$

Bu ifadede; N toplam sarım sayısı, D bobinin ortalama çapı (cm), K ise $\frac{D}{1}$ parametresi ile de-ğışen bir çarpandır. $\frac{D}{1}$ oranının çegitli değerleri için, K çarpanını» alacağı değerler Tablo (I)'de gösterilmiştir.

II. Ferromagnetik çekirdekli bobinler : Ėekil (1)'deki gibi F (veya E) levhalı magnetik çekirdek üzerine sarılmış bobinler ele alınıyor :



Ėekil ; 1

a. Hava aralıksız ferromagnetik çekirdekli bobinin indüktansını veren formül,

$$L_0 = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{AN^2}{l_p} \quad (2a)$$

Bu ifadede; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m), μ_r = Ortalama magnetik yol uzunluğu (MI), N = Sarım sayısı,

A: magnetik çekirdek kesidi (m^2), μ_r : çekirdek malzemesi izâfi permeabilitesidir.

b. Hava aralıklı ferromagnetik çekirdekli bobinin indüktansını veren formülü yazalım :

$$L_0 = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{AN^2}{l_p} \quad (2b)$$

Bu ifadede; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m), l_p ortalama magnetik yol uzunluğu (m), N sarım sayısı, A magnetik çekirdek kesidi' (m^2), ve μ_r efektif permeabilite değeridir.

a. hava aralığı uzunluğu (m) olduğuna göre μ_r şu şekilde verilmektedir.

$$\mu_r = \frac{\mu_r}{\left[1 + \left(\frac{a}{l_p} \right) \cdot \mu_r \right]} \quad (3)$$

Bobin üzerine alternatif bir gerilim uygulanırsa,

$$E = 4,44 \cdot B \cdot N \cdot f \cdot A \cdot 10^{-8} \quad (\text{Volt}) \quad (4)$$

bağıntısı yazılabilir. Bu bağıntıda, B magnetik akı (Gauss), N sarım sayısı, A saç kesidi' (cm^2), f uygulanan gerilimin frekansı (Hz), E bobin üzerine uygulanan gerilimin efektif değeri (Volt) olarak alınıyor.

Bobin hesabında tutulacak yol :

L_0 indüktans ifadesindeki μ_r , A, N ve l_p büyüklüklerini değiştirmek elimizdedir. (3) denkleminde $\frac{a}{l_p}$ oranının sabit değerleri için, $\mu_r = F(\mu_r)$ eğrisi çizilebilir. Ėekil (2)'de $\mu_r = F(\mu_r)$ eğrisi çizümiğör. (3) denkleminde görüleceği üzere,

$$\mu_r = 0 \text{ için } j \cdot \mu_r = 0, \text{ ve } \mu_r \rightarrow \infty \text{ için } \mu_r = \frac{a}{l_p}$$

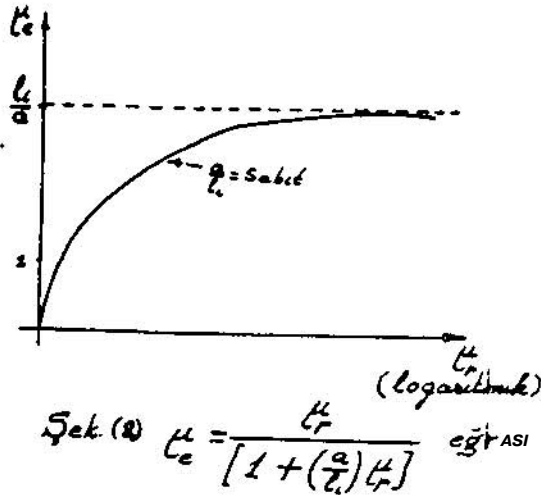
TABLO: 1

| D/l | K | D/l | K | D/l | K | D/l | K |
|------|-------|------|-------|-----|-------|------|-------|
| 0. | 1. | 0.45 | 0.834 | 0.9 | 0.711 | 3.5 | 0.394 |
| 0.05 | 0.979 | 0.5 | 0.818 | 1.0 | 0.688 | 4.0 | 0.365 |
| 0.10 | 0.959 | 0.55 | 0.803 | 1.1 | 0.667 | 4.5 | 0.341 |
| 0.15 | 0.939 | 0.6 | 0.789 | 1.2 | 0.648 | 5.0 | 0.32 |
| 0.2 | 0.92 | 0.65 | 0.775 | 1.4 | 0.611 | 6.0 | 0.285 |
| 0.25 | 0.902 | 0.7 | 0.761 | 1.6 | 0.580 | 7.0 | 0.258 |
| 0.3 | 0.884 | 0.75 | 0.748 | 2.0 | 0.526 | 8.0 | 0.237 |
| 0.35 | 0.867 | 0.8 | 0.735 | 2.5 | 0.472 | 9.0 | 0.219 |
| 0.4 | 0.850 | 0.85 | 0.723 | 3.0 | 0.429 | 10.0 | 0.203 |

değerini alacaktır. Ayrıca, $l_1 \rightarrow a$ olduğundan $\frac{l_1}{a} \gg 1$ olmaktadır. Yüksek indüktans değerlerle elde edebilmemiz için μ_{eff} efektif permeabilite değerini büyütebilmemiz gerekecektir.

Şayet çekirdek seçilmişse, \hat{a} boyu sabittir. O halde, yalnızca hava aralığını küçültebiliriz. Pratikte, a hava aralığı presizyonlu indüktans imalinde, 0.0762 mm'den daha küçük seçilmiyor. Çünkü, hava aralığı bu değerden küçük tutulursa, seri İmalât halinde, bobinlerin birbiriyle tutarlığı azalmaktadır.

Ferromagnetik malzeme imalâtçısı, malzeme permeabilitesinin değişme sınırlarını ölçerek bulmalı ve katalogunda belirtmelidir. Aksi takdirde, bu işlemler bobin imalâtında çalışan mühenslere düşecektir.



Ferromagnetik malzemenin izafi permeabilitesi $\mu_r = 8000 - 250000$ değerleri arasında değişmiş olsun. Böylece, $\hat{a} = F(\hat{a})$ grafiği, çeşitli $\frac{a}{l_1}$ sabit değerleri için çizilebilir.

Pratikte, $\frac{a}{l_1} = 0.001333, 0.0010, 0.0008, 0.000666, 0.0010, 0.0050, 0.00333, 0.0025$ ve 0.0020 alınırsa efektif permeabilite için sırayla 750, 1000, 1250, 100, 200, 300, 400 ve 500 elde edilebilecektir.

$\mu_x = F(p)$ grafiği hazırlanırken, apsis ekseninin logaritmik seçilmesi uygundur.

Ayrıca, maksimum \hat{j} 'yi üretecek B magnetik akı yoğunluğunun bilinmesi gerekiyor. Bir de B'nin değişme miktarının, \hat{a} değerini değiştireceği bilinmelidir.

Malzeme permeabilitesi frekansla da değişebilecektir. Fakat ses frekanslarında bu değişme önemli değildir. Yüksek frekanslarda (30 MHz'e kadar) permeabilitesi sabit kalan, toroidal ferromagnetik çekirdekli bobinler kullanılacaktır. «Elektromagnetik Alan Teorisi n» kitabında (8) Prof. A. Akhunlar dikdörtgen kesitli ve dairesel kesitli toroidin indüktansını, sırayla

$$L = \frac{\mu N^2 h b}{2\pi r a} \ln \frac{b}{a}$$

ve

$$L = \mu N^2 (R_o - \sqrt{R_o^2 - R^2})$$

olarak çıkarıyor. Piyasaya, Molybdenum - permalloy alaşımli ve demir - tozlu toroid çekirdekleri arzederken, İmalâtçı $N = 1000$ sanımlı toroidin

indüktansını L_o olarak belirtebilir. Bu indüktans ifadelerindeki (\hat{j} , h , i , a ve R , R_o) büyüklüklerini sabit tutarak, yani aynı tip toroid çekirdekleri için, kataloguna,

$$\frac{N^2}{L_o} = \frac{N^2}{N_o^2} \frac{L}{L_o} = 10^4 \cdot \sqrt{\frac{L}{L_o}}$$

bağıntısını yazabilir. Böylece, bobin imâl edecek elemana yalnızca sarım sayısını bulması kalıyor. Toroidal bobinleri sararken, yüksekçe iyilik derecesi elde etmek için, sargı tellerinin bir diğerini çaprazlamaması gerekir. Genellikle, yüksek Q değerleri elde etmek için elle sarım yapılır.

Bobinin Q (iyilik derecesi hesabı :

Şekil (1)'de gösterilen E (veya F) levhali ferromagnetik çekirdekli bobinlerin ses frekanslarında, 20Hz ilâ 600 Hz arasında, kullanılması uygundur. Şimdi, 20Hz + 6000Hz arasında bobinin eş değerini seri bir R_T direnci ve L_s şelfinden oluşmuş olarak gösterebiliriz, iyilik derecesi tanımından,

$$Q = \frac{L_s \cdot \omega}{R_T}$$

yazabiliriz.

R_T toplam direncinin bulunması:

I. Analitik yoldan hesaplanması :

II. Deney ile bulunması :

I. Analitik yoldan hesaplanması :

Direnç, kayıpları ifade eden bir pasif elemandır. Ferromagnetik çekirdekli böyle bir bobinde kayıpların, hangi olaylar sonucu oluştuğunu belirtelim. N herhangi bir kayıp gücü ifade ederse, ve ide geçen akımın efektif değeri ise; kayıpları ifade eden direnç,

$$R = \frac{N}{I^2}$$

bağıntısından bulunabilir.

KAYIPLAR :

A. Girdap akımı kayıpları :

1. Sargı İletkenindeki girdap akımı kayıpları,
2. Çekirdekdeki girdap akımı kayıpları,

B. Ferromagnetik çekirdeğin histerizis kayıpları,

C. Dielektrik histerizis kayıpları.

A. Girdap akımı kayıpları:

1. Sargı iletkenindeki girdap akımı kayıpları (3-4):

Bu kayıplar, yarıçapı r_0 olan silindirik uzun bir iletkendeki girdap akımı kayıplarının incelenmesinden ibarettir, diyebiliriz. Silindirik bir iletkendeki girdap akımı kayıpları ifadesinin elde edilmesi literatürde vardır. Çeşitli monogramlar ve grafiklerden de yararlanılabilir. Bu yazıda, bulunan sonuçları kullanmakla yetineceğiz. Alçak frekanslarda, iletkeninin direnci için şu ifadeyi yazabiliriz :

$$R_s = R_0 + \frac{r_0^4}{48} \cdot (\pi \chi \mu f)^2 \cdot R_0$$

Bu ifadede, $R_0 = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi r_0^2}$ doğru akım direnci, r_0 iletken yarıçapı, μ iletken permeabilitesi, f çalışma frekansı, χ özgül iletkenliktir. Yüksek frekanslarda, iletkenin direnci için şu ifadeyi yazabiliriz :

$$R_s = R_0 (\pi \cdot f \cdot \chi \cdot \mu) \cdot \frac{\frac{1}{2} r_0}{2} + \frac{R_0}{4} + \frac{3}{32} \frac{R_0}{r_0 (\pi \chi \mu f)^{1/2}}$$

Alçak ve yüksek frekanslardaki direnç ifadesini birleştirilm. Yüksek frekanslardaki direnç ifadesinde yalnız birinci terimi ele alıyoruz. Böylece, şu ifadeyi yazabiliriz :

$$R_s = R_0 + k_1 f^2 + k_2 y/f$$

Bu ifadede,

$$k_1 = \frac{r_0^4}{48} (\pi \chi \mu)^2 \dots R_0$$

$$k_2 = \frac{R_0 \cdot r_0}{2} \cdot (\pi \chi \mu)^{1/2}$$

$$R_0 = \rho \frac{l}{S} \text{ dir.}$$

A.2. Çekirdekdeki girdap akımı kayıpları :

Bir saçtaki girdap akımı kayıpları : p^{-4})

Şekil (3)'de, ferromagnetik melzemededen yapılmış bir saçta, çekirdeğin içindeki girdap akımı kayıpları için,

$$N_g = \frac{1}{24} \cdot \chi \cdot \omega^2 \cdot d = B \cdot j \cdot V \cdot F(x) \quad (\text{Watt})$$

olarak verilmektedir. Bu ifadede, V magnetik çekirdeğin hacmi (m^3), d saçın kalınlığı (m), B magnetik akı yoğunluğu (Wb/m^2), χ özgül iletkenlik $\left(\frac{1}{\Omega \cdot m} \right)$, ve

$$F(x) = \frac{3}{x} \frac{(Shx - Slnx)}{(Chx - Cosx)}$$

olarak veriliyor. Bu F(x) ifadesindeki

$$X = \beta \cdot d = \left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\omega \cdot \chi \mu} \right) \cdot d$$

olup $\beta = \sqrt{j \omega \mu}$ magnetik permeabilite değeridir Alçak frekanslarda küçük X değerleri için, F(X) e 1 alınabilir. Böylece,

$$N_g \approx \frac{1}{24} \cdot \chi \cdot \omega^2 \cdot d^2 \cdot B_m^2 \cdot V \quad (\text{Watt})$$

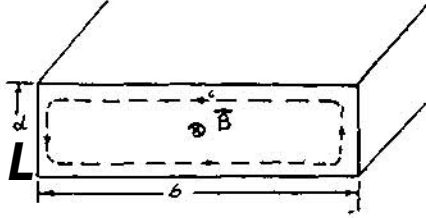
yazabiliriz. Burada, alçak frekans dediğimiz,

$$X = p \cdot d = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{V_0 \cdot \chi M} \cdot d^{\wedge 2}$$

eşitsizliğine tekabül eden, frekans değerleridir. Yani,

$$\omega \approx \frac{4}{\chi \mu d^2}$$

için yukarıdaki N_g formülü geçerlidir. Yüksek frekanslarda, büyük X değerleri için,



Şekil : 3

$$F(X) \approx \frac{3}{X}$$

olduğundan,

$$N \approx \frac{1}{24} \cdot \chi \cdot \omega^2 \cdot d \cdot B_m^2 \cdot V \cdot \frac{3}{X}$$

olmaktadır. $\chi = C \cdot OCA^{\wedge 2} \cdot \frac{d}{2}$ koyarak,

$$N_g \approx \frac{1}{4} \cdot \chi^{\frac{3}{2}} \cdot \omega \cdot d \cdot B_m^2 \cdot V \cdot \frac{1}{V_p^{\wedge 2}}$$

elde edilir.

Çekirdekdeki girdap alüni güç kaybını azaltmak :

1 Magnetik çekirdek malzemesi olarak, özgül direnci yüksek olan malzeme kullanılmalıdır. özgül direnci küçük olan malzemeler ve yüksek frekanslarda kayıpların en baskını girdap akımı kayıplarından oluyor (5) Transformatör imalatında, özgül direnci yüksek olan silisyumlu çelik kullanılıyor Zayıf akım tekniğinde kullanılan darbe transformatörü yapımında da özgül direnci yüksek olan ferrit malzemeler kullanılıyor. Nitekim, ferrit malzemelerin özgül dirençleri, HIPERSİL ve PBRMALLOY alaşımının özgül direncinden bir milyon kat büyüktür.

2. Saç kalınlığı d küçültülürse, girdap akımı güç kaybı azaltılabilecektir. Toplam saç kalınlığı d ise, ve biz bunu n parçaya bölerek ince saç levhaları (paketçikleri) halinde gerçekleştirebiliriz. Saç levhaların, birbirinden elektrikli bakımdan izole edilmesi gerekir. Böylece, girdap akımları saç paketçikleri içinden dolaştırılmış, oluyor. N_g girdap akımı güç kaybını hesaplarken, d toplam saç kalınlığı yerine; bunu n tane birbirinden elektrik! bakımdan izoleli parçaya

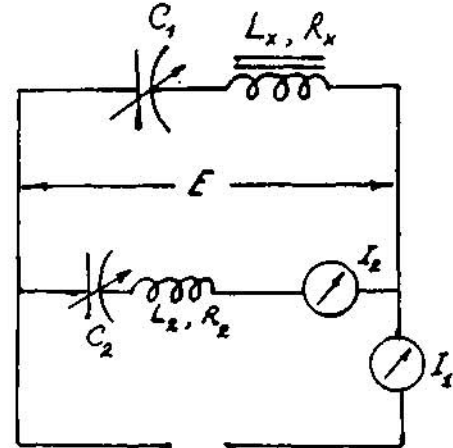
bölmüşsek $\frac{1}{n}$ yazılacaktır. Bundan dolayı, girdap akımı güç kaybı $\frac{1}{n}$ oranında azalmış olacaktır (6).

Yapılacak işler :

Ferromagnetik malzeme imalatçısında çalışan veya bobin imalatını yöneten elemanın, çeşitli aabit frekans değerleri için, B_m magnetik akı ile N_g güç kaybı eğrisini hazırlaması gerekecektir.

B. Ferromagnetik çekirdeğin histerizis kayıpları :

Histerizis olayının bir sonucu, bir ferromagnetik malzemenin histerizis çevrimini her çliğinde, malzeme içinde ısı kaybı olmaktadır.



Yüksak Frekans kaynağı

Şekil : 4

Bu ısı, malzeme içindeki magnetik domenlerin yönlerinin değişmesi esnasında oluşan bir çeşit iç sürtünme sonucudur. Her bir histerizis çevriminde, zaman birimi zarfında yayılan ısı miktarı, lusterizis çevrimi içinde kalan yüzölçümü orantılıdır Histerizis çevrimi eğrisinde, B (Wb/m²), H (Amper-sarım/m) biriminde alınırsa, ısı'nın değeri çevrim başına (Joule/m³) olarak elde edilir.

I. Histerizis kayıp gücün ün bulunması :

a) Histerizis çevrimi deneyle bulunur ve çizilir. Böylece, bir plânimetre aracılığıyla Histerizis çevrimi alanı ölçülerek, histerizis kayıp gücü bulunmuş olur,

b) Analitik yol :

Histerizis kayıp gücünün bulunması için Steinmetz şu formülü veriyor :

Birim, hacimdeki kayıp güç = „ . BT

B_m : maksimum akı değeridir. „ kullanılan malzeme için Steinmetz katsayısıdır. y çoğu malzemeler için 1.6 alınabiliyor. Yeni ferromagnetik malzemeler için $y = 1.5 \div 2.5$ değerleri arasında değişiyor. Şayet, imalâtçı bu katsayıları vermişse, histerizis kayıp gücünü hesaplamak için, bu amprik formül epeyce kullanışlı olmaktadır.

II. Direncin deneyle bulunması :

Yüksek frekanslarda direnç ölçme için çeşitli metodlar vardır (7). Çeşitli frekanslarda ölçme yaparak,

R_r as $R_p + K_j \cdot f^2 + I_c \cdot V_f$ denkleminin grafiği çizilebilir. Böylece, hangi frekans sınırları içinde, hangi terimin baskın olduğu belirir. Şekil (4)'de Çift - Rezonans metodu ile direnç ölçme devresi gösteriliyor.

Rezonans halinde,

$E = (I_1 - I_2) \cdot R_x = h \cdot n_2$
olduğundan,

$$R_x = \frac{I_2 \cdot R_2}{(I_1 - I_2)}$$

yazılabilir.

C. Dielektrik Histerizis kayıpları:

Gerek sargı teli ve gerekse saç paketlerine sürülen izolasyon maddesinin dielektriğinin oluşturduğu kayıplardır, diyebiliriz.

Kısa magnetik malzeme bilgisi :

Üç kısma ayrılırlar;

1. Dilyamagnetik : ($\mu_r < 1$ dir.)
2. Paramagnetik : ($\mu_r > 1$ dir.)
3. Ferromagnetik : ($\mu_r \gg 1$ dir.)

Tefrik edilmeleri : Bir maddenin, diyamagnetik olup olmadığını anlamak için, o maddeden yapılmış bir çubuk, kuvvetli bir mıknatısın kutupları arasına asılır. Eğer çubuk, kendiliğinden en uzun boyutu, olan doğrultusunu alacak tarzda yönelirse, o madde paramagnetik (veya ferromagnetik) tir Eğer düzgün farzedilen alana, dik bir durum alırsa, diyağmagnetiktir Tablo (II)'de çeşitli ferromagnetik malzemeler sıralanmıştır...

TABLO : II

| Başlıca ferromagnetik malzemeler | | |
|----------------------------------------------------|------------|------------|
| Ferromagnetik malzeme | μ_r | B(Gauss) |
| Kobalt | 170 | 3000 |
| Demir-kobalt alaşımı | 13000 | 8000 |
| Heusler alaşımı [Cu <%60, Mn •% 24, Al % 16] | 200 | 2000 |
| Nikel | 400-1000 | 1000~3000 |
| Permalloy [Ni, % 78,5, Fe, % 21,5] | 8000-80000 | 5000 |
| Permalloy tozu [Mo % 2, Ni % 81, Fe % 17] | 100000 | 8000 |
| Perminvar [Ni % 45, Fe % 30, Co % 25] | 2000 | 4 |
| Orthonol (= Deltamax) | 70000 | |
| [Ni •% 50, Fe % 50] | 12000 | |
| Hipesil Alaşımı | | |
| Supermu alaşımı [Mo % 5, Ni % 79] | 8000-10" | 10~10000 |
| Silikon Çeliği | 5000-101 | 6000-80000 |
| Dökme Çelik | 1500 | 7000 |
| Bessemer çeliği | 3000-7000 | 6000 |
| Ferritler : | | |
| Ferroxcube 3 [Mn - Zn - ferrit] | 2000 | 4500 |
| Nikel Ferrit [Ni O. Fe O ₃] | 1000 | 4500 |
| Magnezyum Ferrit [Mg O. Fe O ₃] | 1000 | 4500 |

Kaynaklar :

1. High Frequency Measurements, August Hunda Mc-Graw-Hill, 1963 Sayfa : 235.
2. Simplified Modern Filter Design, philip R. GEFPE, ILIFFE BOOKS, 1964 Sayfa -88
3. Elektromagnetik Alan Teorisi rt, Prof. A. AKHUNLAR, İTÜ Yayını, 1966 Sayfa: 118, 164 - 165, 183 - 190, 201 - 202.
4. Teorik Elektrotekniki giriş, K. Küpmuller, Çeviren : Ahmet Akhunlar, İTÜ. Yayını, 1951. Sayfa : 362 - - 379, 387.
5. Yarı-iletken malzemelerin özgül dirençlerinin ölçülmesi için bir mikro-dalga boşluk rezonatörü metodu, Çeviren : Eren H Başaran Elektrik Mühendisliği, Cilt 12, " Sayı 136 -137, 1968.
6. Introduction to Electromagnetic Fields, S. SEELY Mc Graw Hill, 1958 Sayfa : 225
7. «Yüksek Frekans ölçme Ders notları», Prof. Adnan Ataman, İT.Ü