

**FREKANS BAĞIMLI TRANSFORMATÖR**

**Salih ERŞAHAN**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği**

**Anabilim Dalı**

**Ocak 2001**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Salih ERŞAHAN 'ın 'Frekans Bağımlı Transformatör' başlıklı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi ~~07.02.2001~~ tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye(1.Tez Danışmanı): Yrd. Doç. Dr. Gökhan ECE

Üye(2.Tez Danışmanı): Doç. Dr. Hüseyin AKÇAY

Üye : Doç. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer N.GEREK

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun

~~07.02.2001~~ tarih ve ...5/8..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## TRANSFORMATÖRÜN YÜKSEK FREKANS MODELİ

SALİH ERŞAHAN

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç.Dr. Gökhan ECE

Danışman : Doç. Dr. Hüseyin AKÇAY

2001

Bu çalışmada enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde önemli bir yeri olan güç transformatörlerindeki arızaların tanımlanması ve bulunması için kullanılan frekans analizi testi için bir transformatör modeli oluşturulmuştur. Modelin PSPICE ve MATLAB da simülasyonu yapılarak frekans cevabı alınmıştır. Bu frekans cevabı ve modelin admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonları kullanılarak model parametreleri belirlenmiştir. Model parametreleri değiştiğinde frekans cevabındaki değişiklikler incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Yüksek Frekans Transformatör Modeli , Transformatörün Frekans Cevabı

# **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

## **TRANSFORMER DEPENDENT ON FREQUENCY**

**SALİH ERŞAHAN**

**Anadolu Universtiy**

**Graduate School of Natural and Applied Science**

**Electrical and Electronics Engineering Program**

**1. Supervisor : Assist. Prof. Gökhan ECE**

**2. Supervisor : Assoc. Prof. Hüseyin AKÇAY**

**In this study, a transformer model is developed to test the frequency analysis used to define and locate faults in power transformers, which have a particular significance in power transmission and distribution systems. The simulation of the model is done via MATLAB and PSPICE and the frequency response is obtained. By using the frequency response, the admittance and the input-output transfer functions, the parameters of the model is determined. The changes in frequency response is observed and studied when the model parameters are changed.**

**Key words : High frequency transformer model, transformer frequency response**

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımnda beni yönlendiren ve benden yardımlarımı esirgemeyen hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Gökhan ECE ve Sayın Doç.Dr. Hüseyin AKÇAY ' a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	v
1. GİRİŞ .....	1
2. DOĞRUSAL TRANSFORMATÖR MODELİ .....	3
3. FREKANS BAĞIMLI TRANSFORMATÖR.....	6
4. TRANSFORMATÖRÜN FREKANS BAĞIMLI ANALİZİ .....	14
4.1. Pspice Similasyonu .....	16
4.2. Matlab Similasyonu .....	24
4.2.1. Transformatörün Frekans Cevabı .....	24
4.2.2. Transformatör Modelinin Parametrelerinin Belirlenmesi .....	28
4.2.3. Parametrelerin Değişmesi Durumunda Frekans Cevabı .....	32
4.2.3.a. C1'in Etkisi .....	33
4.2.3.b. C2'in Etkisi .....	34
4.2.3.c. C3'in Etkisi .....	35
4.2.3.d. L'in Etkisi .....	37
4.2.3.e. R'in Etkisi .....	38
5. SONUÇ .....	39
6. KAYNAKLAR .....	40
7. EKLER .....	41

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1	İdeal transformatör modeli	3
2.2	Steinmetz transformatör modeli	4
2.3	İkincil sargı büyüklükleri birincil sargıya göre indirgenmiş transformatör modeli	4
2.4	Yaklaşık eşdeğer devre	5
3.1	Genel transformatör modeli	6
3.2	Düşük frekans transformatör modeli	7
3.3	Orta frekans transformatör modeli	7
3.4	Yüksek frekans transformatör modeli	8
3.5	$L_h$ , $R_h$ ve $C_p$ nin bulunması için kullanılan model	9
3.6	$L$ ve $R$ nin belirlenmesi için kullanılan model	10
3.7	$C_p$ nin belirlenmesi için kullanılan model	10
3.8	$C_s$ nin belirlenmesi için kullanılan model	11
3.9	Kaskat bağlı $\pi$ devresi	12
4.1	Transformatör modeli	14
4.2	Transformatör modelinin giriş çıkış gerilimi	17
4.3	Giriş akımı genliği	18
4.4	Çıkış gerilimi genliği	18
4.5	Yüksüz transformatöre modeli	19
4.6	Transformatörün 50 Hz deki transient cevabı	20
4.7	Transformatörün 1MHz deki transient cevabı	20
4.8	İndirgenmiş transformatör modeli	21
4.9	Giriş akımı frekans genliği	23
4.10	Çıkış gerilimi frekans genliği	23
4.11	İndirgenmiş transformatör modeli	24
4.12	Admitans fonksiyonu frekans cevabı	27
4.13	Giriş çıkış gerilimi transfer fonksiyonu	27
4.14	$C_1$ değiştiğinde frekans cevabı	33
4.15	$C_2$ değiştiğinde frekans cevabı	34
4.16	$C_3$ değiştiğinde frekans cevabı	35
4.17	$C_3$ değiştiğinde frekans cevabı	36
4.18	$L$ değiştiğinde frekans cevabı	37
4.19	$R$ değiştiğinde frekans cevabı	38
		39
		40

## 1.GİRİŞ

Güç transformatörlerinin enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde önemli bir yeri vardır. Transformatörlerdeki arızalar uzun süreli enerji kesintilerine sebep olur ve onarımları ekonomik olarak oldukça pahalıdır. Transformatörler istenmeyen bir hata akımı ile karşılaştığı zaman (kısa devre akımı gibi) sargılar arasındaki manyetik kuvvetin büyük olmasından dolayı sargılar mekanik zorlanma ile karşılaşır ve sargı diskleri yer değiştirebilir.

Transformatördeki arızaların tanımlanması ve bulunması için transformatörün frekans cevabından yararlanır. Bu ancak söz konusu transformatör üzerinde transformatör arızasız iken bir impulse yada frekans cevabı testleri ile mümkündür. Transformatörün frekans cevabından yararlanarak sistemin matematiksel modeli elde edilir. Ve de bu matematiksel modelin parametreleri belirlenir.

Bu parametreler birincil ve ikincil sargılarının kaçak akı reaktansı, birincil sargısının toprağa göre kapasitesi, ikincil sargısının toprağa göre kapasitesi, birincil ve ikincil sargıları arasındaki kapasiteden oluşur. Bu kapasiteler parasitik kapasitelerdir.

Bu parasitik kapasitelerin küçük olmalarından dolayı (nF , pF mertebelerinde) düşük frekanslarda etkileri yoktur; buna karşılık yüksek frekanslarda etkileri oldukça fazladır. Parasitik kapasitelerdeki değişikliklerin saptanması için transformatörün yüksek frekansta türetilmiş matematiksel modeline ihtiyaç vardır.

Bu çalışmanın ilk bölümünde doğrusal transformatör modeli incelenmiştir. Parasitik kapasiteler bu modelde yer almamaktadır ve bu model sadece 50 ve 60 Hz frekans değerlerinde güç dağıtım ve iletim sistemlerinin modellenmesinde kullanılan doğrusal modeldir.

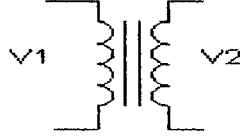
Çalışmanın ikinci bölümünde transformatörler için frekans cevabından yararlanarak oluşturulan modeller incelenmiştir. Kullanılan modellerin parametrelerinin bulunması hakkında bilgi verilmiştir.



Çalışmanın amacı transformatördeki arızaların tanımlanması ve bulunması için kullanılabilir bir metot olan frekans cevabı için bir baz oluşturmaktır. Bu amaçla tezin üçüncü bölümde transformatör için bir model gerçekleştirilmiştir ve bu modelin PSPICE ve MATLAB yazılımlarında frekans cevapları incelenmiştir. Bu bölümde ayrıca modelin frekans cevabından yararlanarak devre parametrelerinin bulunması hakkında bilgi verilmiştir. Model parametrelerine bağlı olarak frekans cevabındaki değişimler incelenmiştir.

## 2. DOĞRUSAL TRANSFORMATÖR MODELİ :

Transformatör elektrik enerjisinin yalnızca gerilim ve akım bileşenlerini değiştiren bir elektrik makinasıdır. İdeal transformatör sadece ortak akısı bulunan, kaçak akısı, sargı direnci ve kayıpları ihmal edilen hayali bir transformatördür. İdeal transformatör modeli Şekil 2.1 de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. İdeal transformatör modeli

Bu modeldeki parametreler aşağıda tanımlanmıştır.

V1 : birincil sargısı gerilimi

V2 : ikincil sargısı gerilimi

I1 : birincil sargı akımı

I2 : ikincil sargı akımı

N1 : birincil sargı sayısı

N2 : ikincil sargı sayısı

$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

a : dönüştürme oranı

Birincil ve ikincil sargılarının gerilimi ve akımları arasında aşağıdaki ilişki vardır .

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = a$$

Şekil 2.2 de gösterilen ve kayıpları içeren model Steinmetz transformatör modeli olarak bilinmektedir. Şekildeki parametreler aşağıdaki gibi tanımlanır.

R1 : birincil sargı direnci

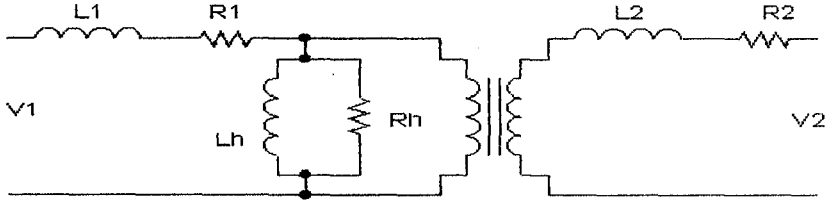
L1 : birincil sargı kaçak endüktansı

R2 : ikincil sargı direnci

L2 : ikincil sargı kaçak endüktansı

Rh : demir kayıpları direnci

Lh : manyetizasyon endüktansı.



Şekil 2.2. Steinmetz transformator modeli

Şekil 2.3 de Steinmetz transformator modelinin ikincil sargı büyüklüklerinin birincil sargıya göre indirgenmiş hali gösterilmiştir. İndirgenme işleminde aşağıdaki bağıntılar göz önüne alınmıştır.

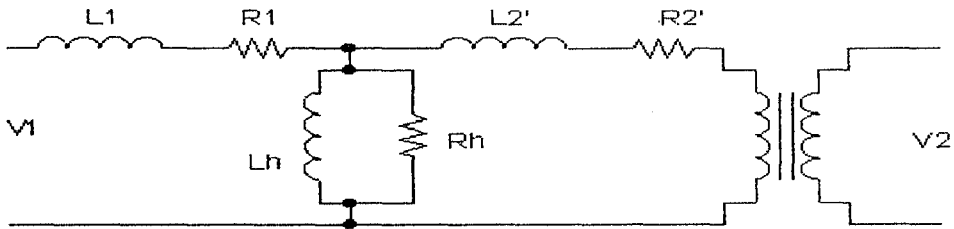
Burada ;

$$R_2' = a^2 R_2$$

$$L_2' = a^2 L_2$$

R2' : indirgenmiş ikincil sargı direnci

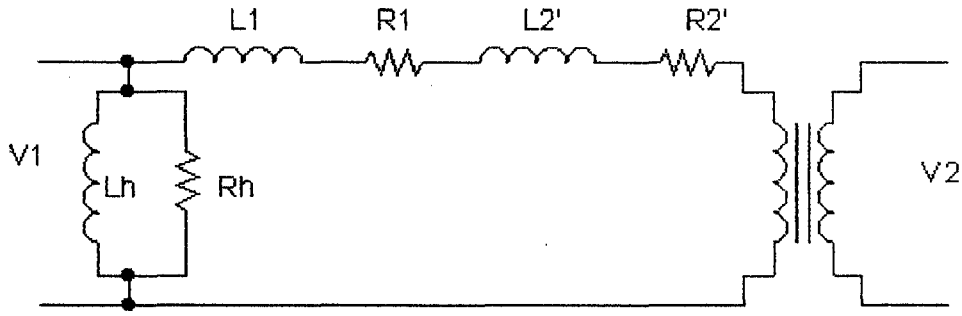
L2' : indirgenmiş ikincil sargı kaçak endüktansı.



Şekil 2.3. İkincil sargının büyüklüklerinin birincil sargıya göre indirgenmiş modeli

Steinmetz modeli 50 Hz ve 60Hz de gerçek transformatörü oldukça iyi bir şekilde temsil eder. Fakat içerdiği ideal transformator ve altı devre elemanı nedeni ile uygulamalarda hesaplaması çok zaman alır. Hesaplamaı sadeleştirmek için paralel kol eşdeğer devrenin giriş uçlarına bağlanmıştır (Şekil 2.3). Güç transformatorlerinin boşa akımı anma akımına göre çok küçük olduğundan nispeten küçük olan birincil

direnç ve kaçak endüktanstan akımın geçmemesi pratikte önemli bir hata oluşturmaz. Bu model yaklaşık eşdeğer devre modeli olarak adlandırılır.



Şekil 2.4. Yaklaşık eşdeğer devre

Yaklaşık eşdeğer devrenin admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilebilir :

$R_3$  : yük direnci

$R_3'$  : birincil kısma indirgenmiş yük direnci

$$R_3' = a^2 R_3$$

$$R = R_1 + R_2'$$

$$L = L_1 + L_2'$$

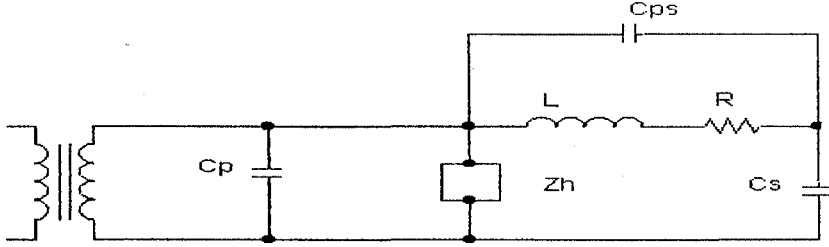
$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{R_3'}{R + R_3' + sL}$$

$$Y(s) = \frac{s^2 LL_h + s(RL_h + R_3' L_h + LR_h + R_h L_h) + RR_h + R_3' R_h}{s^2 LR_h L_h + s(RR_h L_h + R_3' R_h L_h)}$$

Steinmetz modelin parametreleri boşa çalışma ve kısa devre deneyleri yapılmak suretiyle belirlenir. Bu model giriş bölümünde bahsedilen parasitik kapasiteleri içermemektedir.

### 3. FREKANS BAĞIMLI TRANSFORMATÖR

Giriş bölümünde bahsedilen parazitik kapasiteleri kapsayan genel bir transformatör modeli Douglass [1] tarafından önerilmiştir. Bu model şekil 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.1. Genel transformatör modeli

Modeldeki parametreler aşağıdaki gibidir.

İdeal transformatör

L : birincil ve ikincil sargı eşdeğer kaçak endüktansı

R : birincil ve ikincil sargı eşdeğer direnci

Zh : demir kayıpları empedansı

Parazitik kapasiteler :

Cp : birincil sargının toprağa göre kapasitesi

Cs : ikincil sargının toprağa göre kapasitesi

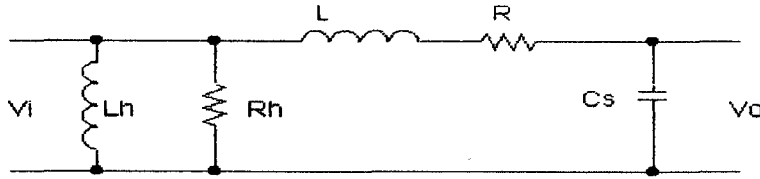
Cps : birincil ve ikincil sargıların arasındaki kapasite

Douglass tarafından şekil 3.1 deki transformatörün parametrelerinin bulunması için dört deney yapılmıştır :

1. Geniş bir voltaj aralığında nominal frekansın üzerinde açık devre deneyi.
2. Geniş bir frekans aralığında açık devrede voltaj dönüştürme oranı ölçümü.
3. Geniş bir frekans aralığında kısa devre deneyi.
4. Üç değişik yük ile geniş bir frekans aralığında voltaj dönüştürme oranı ölçümü.

Islam, Coates ve ark[2] şekil 3.1 deki modelin parametrelerini bulmak amacıyla modeli düşük, orta ve yüksek frekans modeli olarak üç bölüm halinde incelemiştir.

Cps küçük bir kapasite (5 – 10 nF) olduğu için 500 Hz – 2kHz frekans aralığında frekans ve kapasitenin çarpımı (f.Cps) oldukça küçüktür fakat kapasitif reaktans (XCps) frekans ve kapasitenin çarpımı ile ters orantılı olduğu için oldukça büyüktür ve açık devre gibi davranır. Cps ihmal edilerek 500Hz - 2 KHz frekans aralığında geçerli olan düşük frekans modeli şekil 3.2 de gösterilmiştir.

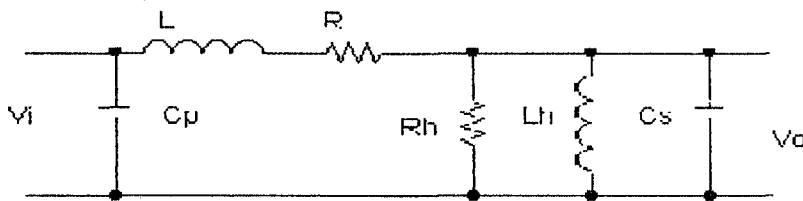


Şekil 3.2. Düşük frekans transformatör modeli

Düşük frekans modeli için transformatörün giriş-çıkış transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilmiştir :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{C_s \cdot L_w}}$$

2 KHz – 80 KHz arasında şekil 3.3 de gösterilen orta frekans modeli kullanılır.



Şekil 3.3. Orta frekans transformatör modeli

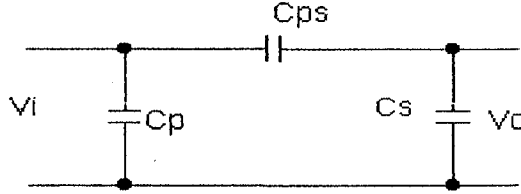
Orta frekans modeli transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s \cdot \frac{1}{C_s \cdot L_w}}{s^3 + s^2 \cdot \left( \frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{C_s \cdot R_h} \right) + s \cdot \left( \frac{1}{C_s \cdot L_w} + \frac{R_w}{C_s \cdot R_h \cdot L_w} + \frac{1}{L_h \cdot C_s} \right) + \left( \frac{R_w}{C_s \cdot L_w \cdot L_h} \right)}$$

Yüksek frekans modeli şekil 3.4 da gösterilmiştir. Frekansın yüksek olmasından dolayı (80 kHz den fazla) parasitik kapasiteler devrededir. Aşağıdaki formül ile tanımlanan endüktif reaktans :

$$X_L = 2\pi fL$$

frekans yüksek olduğu için oldukça büyüktür. Bundan dolayı endüktif reaktans açık devre gibi davranır:



Şekil 3.4. Yüksek frekans transformatör modeli

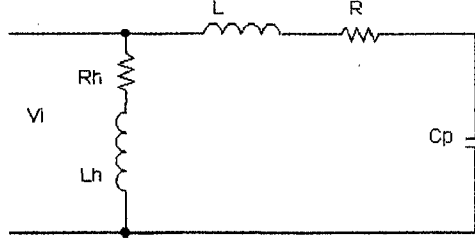
80 kHz üzeri için tanımlanan yüksek frekans modelinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{C_{ps}}{C_s + C_{ps}}$$

Genel modelin bu şekilde üç bölüme ayrılmasıyla matematiksel işlemler kolaylaşmaktadır buna karşılık ihmallerden dolayı tam bir frekans cevabı alınamaz. Bu modelin Matlab da simülasyonu yapıldığında bir tek frekans değerinde tepe yapmıştır. Bu modelin bir diğer dezavantajı da bir frekans aralığından bir sonraki frekans aralığına geçtiğimizde örneğin orta frekans aralığından yüksek frekans aralığına geçildiğinde genellikle farklılıkları vardır ve sıçrama yapabilir.

Jensen, Mikkesen ve ark. [3] transformatörün geniş bir frekans aralığında giriş çıkış transfer fonksiyonu ( $V_{out}/V_{in}$ ) ve giriş çıkış empedansları ( $V_{in}/I_{in}$ ,  $V_{out}/I_{out}$ ) ölçülerek şekil 3.1 deki modelin parametrelerinin bulunabileceğini açıklamışlardır.

500 Hz altında açık devre deneyi yapılarak admitans belirlenip  $L_h$ ,  $R_h$ ,  $C_p$  bulunur. Matematiksel model olarak Şekil 3.5 deki devre kullanılır.  $C_p$  ve  $C_s$  nin 500 Hz altında etkilerinin az olmasından dolayı ihmal edilirler.



Şekil 3.5.  $L_h$ ,  $R_h$  ve  $C_p$  nin belirlenmesi için kullanılan model

Şekil 3.5 deki model için admitans fonksiyonu aşağıdaki gibi bulunur :

$$Y(s) = \frac{s^2.(L_h C_p + L \sigma.C_p) + s.(R_h C_p + C_p.R) + 1}{s^3.L \sigma.C_p.L_h + s^2.(L \sigma.C_p.R_h + C_p.R.R_h + L_h) + R_h}$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$L = L_1 + L_2$$

$$R_h.C_p.R \ll L_h$$

$$L \ll L_h$$

$$R \ll R_h$$

Yukarıda kullanılan ‘ $\ll$ ’ işaret soldaki terimin sağdaki terimden çok küçük olduğu anlamına gelir.

İhmaller göz önüne alınarak admitans fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir:

$$Y(s) = \frac{s^2.L_h C_p + s.R_h C_p + 1}{s^3.L_h.L + s^2.(R_h.C_p.L + L_h.R.C_p) + s.L_h + R_h}$$

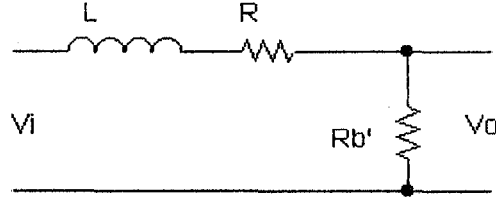
$L_h$  ve  $R_h$  paydadaki son iki terimden doğrudan doğruya hesaplanabilir.  $C_p$  de  $L_h.C_p$  çarpımından hesaplanır.  $L_h$  ve  $R_h$  ise frekans bağımlılığı değişik frekanslarda incelenmek suretiyle bulunabilir.



1250 Hz'in altında ve 15 kΩ luk bir direnç ile L (L1+L2) ve R (R1+R2) bulunur. Dirence göre Lh ve Rh etkilerinin az olmasından dolayı ihmal edilirler.

$|R+j.w.L\sigma| \ll 1/w.Cps$  ve  $Rb' \ll 1/w.Cp$  bağıntılarından ötürü Cps ve Cp yüksek frekanslarda ihmal edilirler. Böylece şekil 3.6 deki model elde edilir.

Rb' : yük direnci



Şekil 3.6. L ve R nin belirlenmesi için kullanılan devre modeli

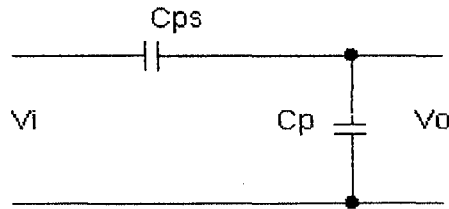
Şekil 3.6 daki model için admitans fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir :

$$Y(s) = \frac{I_{in}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{s.L + Rb' + R}$$

Aynı model için giriş çıkış transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{Rb'}{sL + Rb' + R}$$

500 kHz üzerinde açık devre deneyi yapılarak ve giriş çıkış transfer fonksiyonu hesaplanarak Cps bulunur. Yüksek frekans için kullanılan eşdeğer devre modeli şekil 3.7 de gösterilmektedir. Yüksek frekanslarda kapasitif etki endüktif etkiden fazladır.



Şekil 3.7. Cps nin belirlenmesi için kullanılan devre modeli

500 kHz üzerindeki açık devrede giriş çıkış transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir

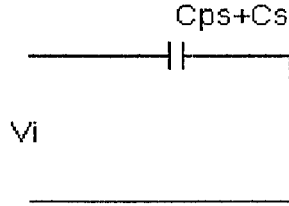
$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{Cps}{Cp + Cps}$$

Genellikle Cps, Cp ' e göre çok küçük olduğundan bu transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$H(s) = \frac{Cps}{Cp}$$

Transfer fonksiyonu görüldüğü gibi frekansa bağlı değildir ve böylece Cp bilindiği zaman Cps kolayca hesaplanabilir.

500 kHz üzerinde transformatör kısa devre yapılarak Cs hesaplanabilir. Şekil 3.8 de eşdeğer devre gösterilmiştir. Kapasitelerin etkilerine dikkat ediniz.



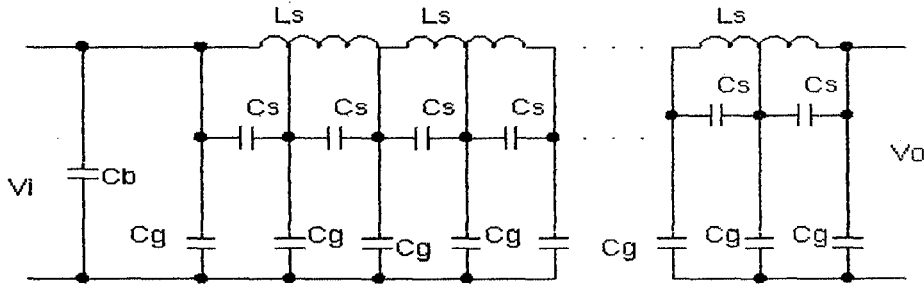
Şekil 3.8. Cs nin belirlenmesi için kullanılan devre modeli

Şekil 3.8 deki modelin empedansı aşağıdaki gibi elde edilir :

$$Z(s) = \frac{V_{in}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{1}{s.(Cs + Cps)}$$

Deneyler sonucunda bulunan sonuçlar z domanindedir ve bunların s domanine çevrilmesi gerekir. Bu da pole – zero mapping yöntemi ile yapılır. Bu çalışmada ayrıca  $(20/\sqrt{3})kV/(110/\sqrt{3})V$  dönüşüm oranlı transformatörün parametreleri gerekli deneyleri yaparak belirlenmiştir.

D. Member ve E. Member [4] transformatörün sargılarındaki deformasyonların transformatörün frekans cevabı analizi (Frequency Responce Analysis - FRA) testi ile yapılabileceğine dikkat etmiştir. Bu çalışmada 8 MVA , 110/22 kV luk üç fazlı transformatörün FRA testi yapılmıştır. Transformatör modeli olarak şekil 3.9 daki kaskat bağlı  $\pi$  devresi kullanılmıştır. Bu model sargı sayısı kadar bölümden oluşur. Düşük frekans, orta ve yüksek frekans cevaplarına göre modelin parametreleri belirlenir.



Şekil 3.9. Kaskat bağlı  $\pi$  devresi

Düşük frekans cevabında Cs ve Cg ihmal edilerek modelin giriş çıkış transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir :

n : sargı sayısı,

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_o}{R_o + j.2.\pi.f.n.L_s}$$

Düşük frekans aralığındaki herhangi bir frekans değerindeki Vo/Vi değerinden Ls hesaplanabilir.

Orta frekans bölgesinde Cs ihmal edilip rezonansa girilen frekans değerinden yararlanılarak Cg hesaplanabilir.

$\beta$  : Rezonans açısı (rad.)

$$\beta = 2.\pi.f.\sqrt{L_s.C_g}$$

Yüksek frekans cevabında Ls ihmal edilir. Model, sargı sayısı kadar kapasiteden oluşur. Giriş-çıkış transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{V_o}{V_i} = \gamma.n$$

$\gamma$  : her bölüm için kayıp,  $C_s$  ile  $C_g$  arasında  $\gamma$  ile bağlantılı aşağıdaki yaklaşık bağıntı vardır.

$$C_s \approx C_g \cdot \frac{\gamma^2}{(1-\gamma)^2}$$

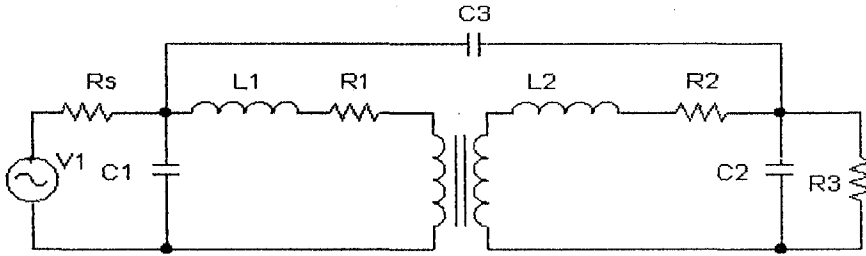
$\gamma$  FRA testi sonucundaki yüksek frekans aralığındaki bir noktadan hesaplanır ve  $C_s$  bulunur.

D. Member ve E. Member çalışmalarında ayrıca kullandıkları transformatörün birincil sargısının 40. ve 41. sargıları arasına üç farklı kapasite bağlayarak FRA testini tekrar yapmışlardır ve frekans cevabındaki değişiklikleri incelemişlerdir.

Islam [5] değişik yıllarda üretilmiş ve yüksek gerilim sargılarındaki arızalardan dolayı servise gelmiş olan üç fazlı dört transformatörün frekans analizi cevabını yapmıştır. Transformatörler arızasız iken yapılmış frekans analizi cevabı olmamasına karşılık her transformatörün faz sargılarının frekans cevaplarını karşılaştırarak arızaların bulunması ve tanımlanması konusunda bir yorum yapmıştır.

#### 4. TRANSFORMATÖRÜN FREKANS BAĞIMLI ANALİZİ

Bu bölümde şekil 4.1 de gösterilen ve parazitik kapasiteleri içeren transformatör modelinin Pspice yazılımında similasyonu yapılarak modelin frekans cevabı alınmıştır. Bu transformatör modelinde, doğrusal transformatör modeli bölümünde bahsedilen indirgenme şartları göz önüne alınarak ikincil sargı büyüklükleri birincil sargıya göre indirgenmiştir. İndirgenmiş transformatör modeli Pspice ve Matlab da similasyonları yapılarak modelin frekans cevabı alınmıştır. İndirgenmiş transformatör modelinin Matlab da similasyonu yapılarak alınan frekans cevabından yararlanarak modelin parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca bu bölümde indirgenmiş transformatör modelinin parametreleri değiştirilerek Matlab da similasyonu yapılmıştır ve parametreleri değiştirilmeden önceki frekans cevabı ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1. Transformator modeli

Şekil 4.1 deki transformatör modelinin elemanları aşağıdaki gibidir.

- V1 : değişken frekanslı kaynak
- Rs : kaynak iç direnci
- R1 : birincil sargı direnci
- L1 : birincil sargı kaçak endüktansı
- R2 : ikincil sargı direnci
- L2 : ikincil sargı kaçak endüktansı
- Parazitik kapasiteler :
  - C1 : birincil sargının toprağa göre kapasitesi
  - C2 : ikincil sargının toprağa göre kapasitesi
  - C3 : birincil ve ikincil sargılar arasındaki kapasite

a : transformatörün dönüştürme oranı (a=1 seçilmiştir)

R3 : yük direnci

Matlab ve Pspice da simülasyonlar yapılırken R3 yük direnci omik ve transformatörün açık devre gibi davranması için büyük değerli seçilmiştir. Fakat gerçek hayatta transformatörün yükü sadece omik olmaz ve endüktif yük olur.

Douglass [1] simülasyonlar için kullanmış olduğumuz modelden farklı olarak demir kayıpları bileşenlerini de eklemiştir. (Rh ve Lh)

Transformatörde iki çeşit kayıp vardır. Birincisi bakır kayıpları yani birincil ve ikincil sargı dirençleri üzerinde meydana gelen kayıplardır. Diğer kayıp ise demir kayıplarıdır. Demir kayıpları (Pc) , Histeresiz kayıpları (Ph) ve Eddy akımı kayıplarının (Pe) toplamıdır, yani

$$P_c = P_h + P_e$$

Histeresiz kayıpları transformatöre uygulanan gerilimin frekansı ve Eddy akımı kayıpları da frekansın karesi ile orantılıdır. Bundan dolayı yüksek frekanslarda demir kayıpları oldukça fazladır. Demir kayıpları direnci demir kayıpları gücü ile orantılı olduğu için yüksek frekanslarda çok büyüktür ve üzerinden akım akmaz bunun için simülasyonlar yapılırken bu bileşen ihmal edilmiştir.

#### 4.1. PSPICE SİMİLASYONU

Aşağıdaki değerlere göre şekil 4.1 deki devrenin Pspice simülasyonu yapılmıştır. Bu değerler bundan önce yapılan çalışmalardaki parametre değerlerine yakın değerler seçilmiştir.

$$R_s = 1 \Omega$$

$$R_1 = 2.16 \Omega$$

$$L_1 = 0.1 \text{ mH}$$

$$R_2 = 2.16 \Omega$$

$$L_2 = 0.1 \text{ mH}$$

$$C_1 = 0.1 \text{ pF}$$

$$C_2 = 0.1 \text{ pF}$$

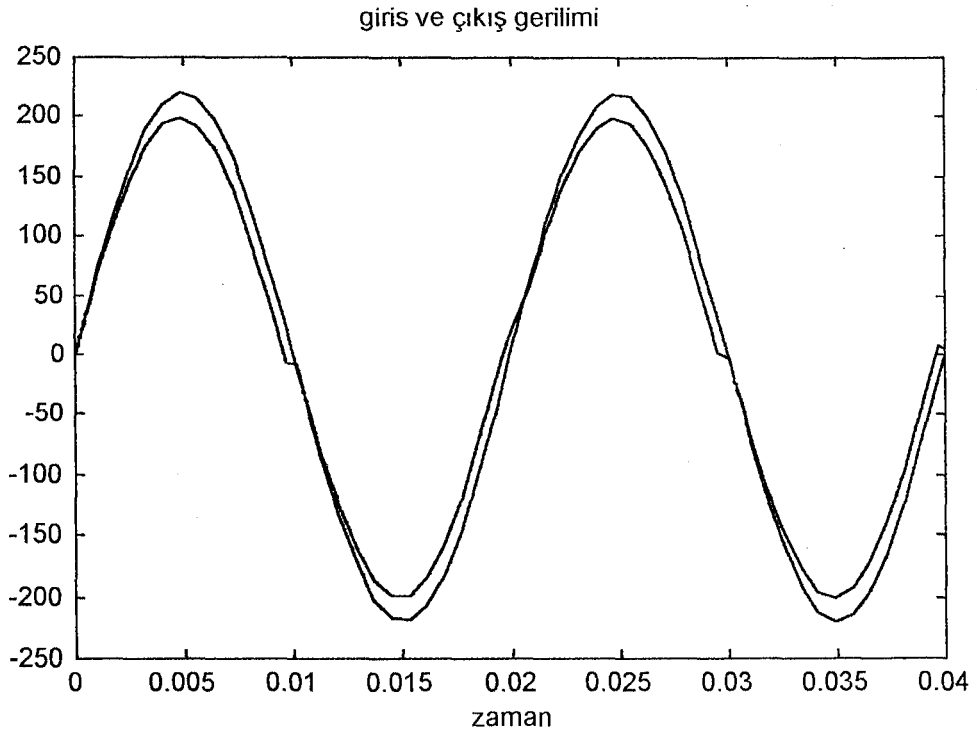
$$C_3 = 5 \text{ nF}$$

$$R_3 = 100 \text{ M} \Omega$$

Şekil 4.1 deki devrenin girişine 220 V da 50 Hz lik ac gerilim uygulanmıştır. Transformatörün dönüştürme oranını bir seçmemizden ve yük direncinin ( $R_3$ ) çok büyük olmasından dolayı uyguladığımız giriş gerilimini aynen çıkışta görmemiz gerekir. Şekil 4.2 de giriş çıkış gerilimleri gösterilmiştir. Beklenen sonuç elde edilmiştir.

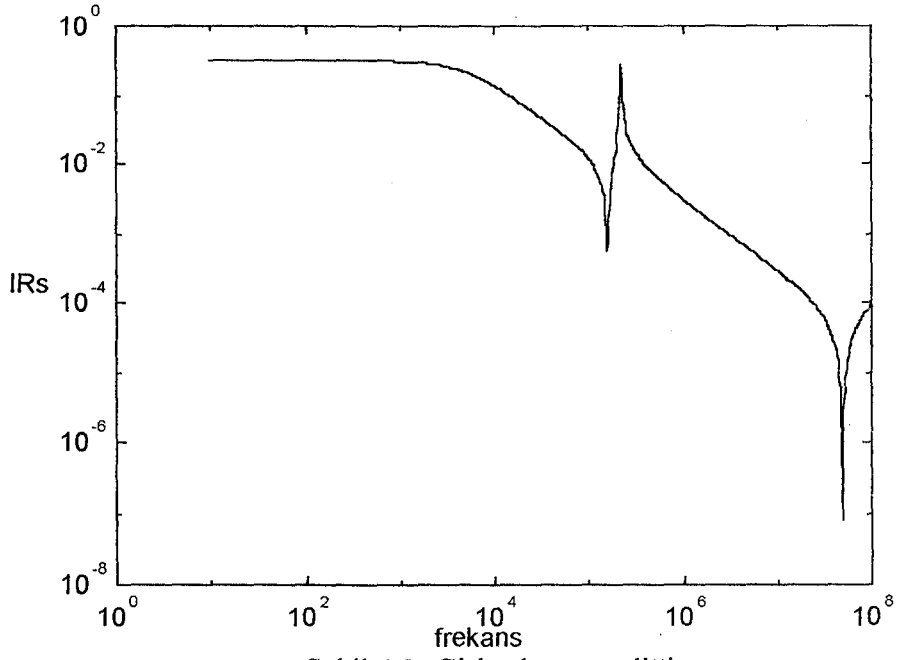
Transformatör modelinin Pspice da frekans cevabını almak için değişken frekanslı kaynak kullanılmıştır. Kaynağın frekansı 10 Hz den 1 GHz kadar değiştirilmiştir. Şekil 4.1'deki transformatör modelindeki  $R_s$  direnci üzerinden akan akım ( $I_{R_s}$ ) çizdirilmiştir (şekil 4.3). Kaynağımızın birim kaynak olmasından ve  $R_s$  direncini 1  $\Omega$  seçmemizden dolayı  $I_{R_s}$  aynı zamanda devrenin admitansıdır. Şekil 4.3 de görüldüğü gibi yaklaşık olarak model 157 kHz , 222 kHz ve 49 MHz frekans değerlerinde tepe yapmıştır.

Şekil 4.4 de 10 Hz 1 GHz frekans aralığında gerilim transfer fonksiyonu ( $V_o/V_i$ ) değişimi verilmiştir. Burada simülasyon yapılırken giriş gerilimi ( $V_i$ ) 1 V seçildi ve çıkış gerilimi ( $V_o$ ) çizdirildi.

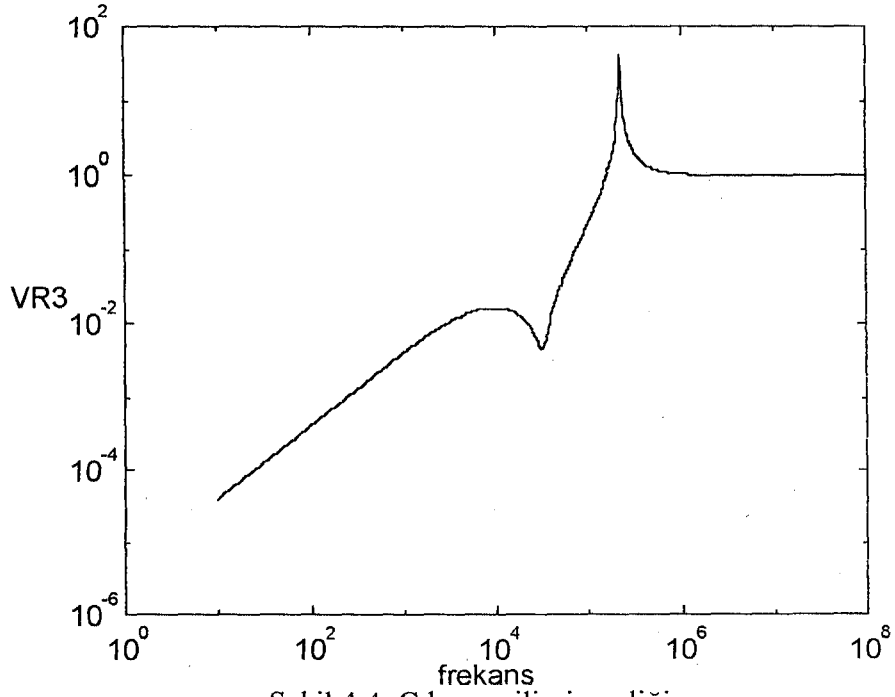


Şekil 4.2. Transformator modelinin giriş-çıkış gerilimi





Şekil 4.3. Giriş akımı genliği



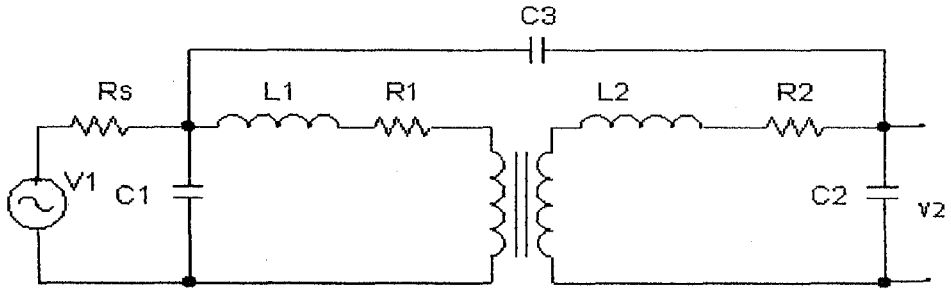
Şekil 4.4. Çıkış gerilimi genliği

Kullanmış olduğumuz modeldeki birincil ve ikincil sargıları arasındaki  $C_3$  kapasitesinin etkisini görmek için şekil 4.5 deki yüksüz modelin 50 Hz deki ve 1 MHz deki transient analizleri (şekil 4.6 ) karşılaştırıldığında  $C_2$  kapasitesinden 50 Hz de nA mertebesinde akım akarken 1 MHz de  $\mu\text{A}$  mertebesinde bir akım akmaktadır.

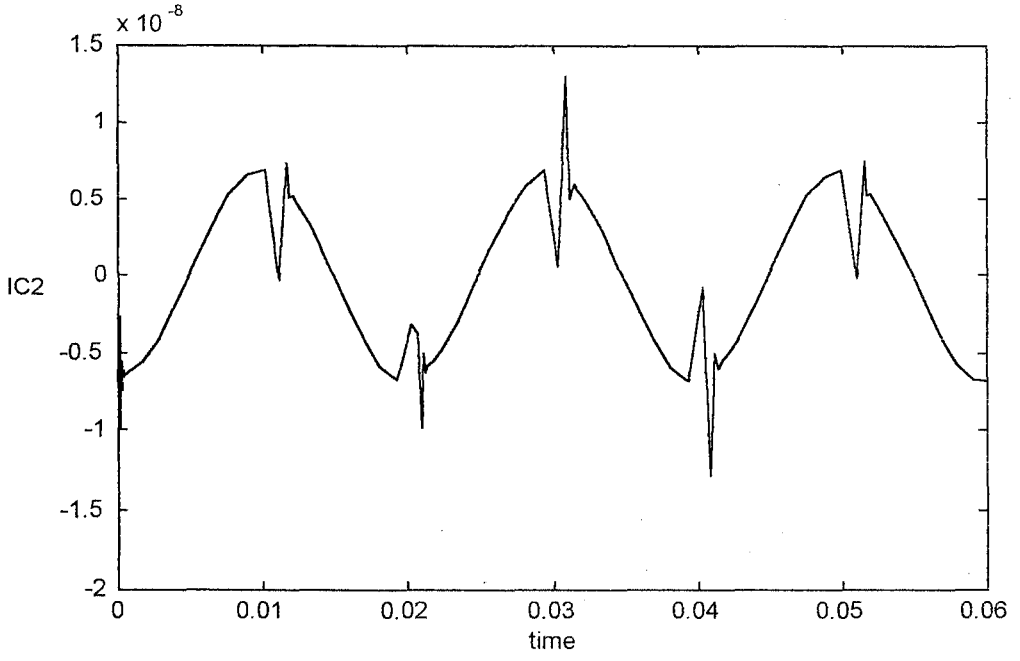
$C_3$  küçük değerli bir kapasitesidir (nF). Frekans düşük olduğu zaman frekans ve  $C_3$  kapasitesinin çarpımı oldukça küçüktür.

Kapasitif reaktans , kapasite ve frekansın çarpımı ile ters orantılı olduğu için düşük frekanslarda oldukça büyüktür ve açık devre gibi davranır.

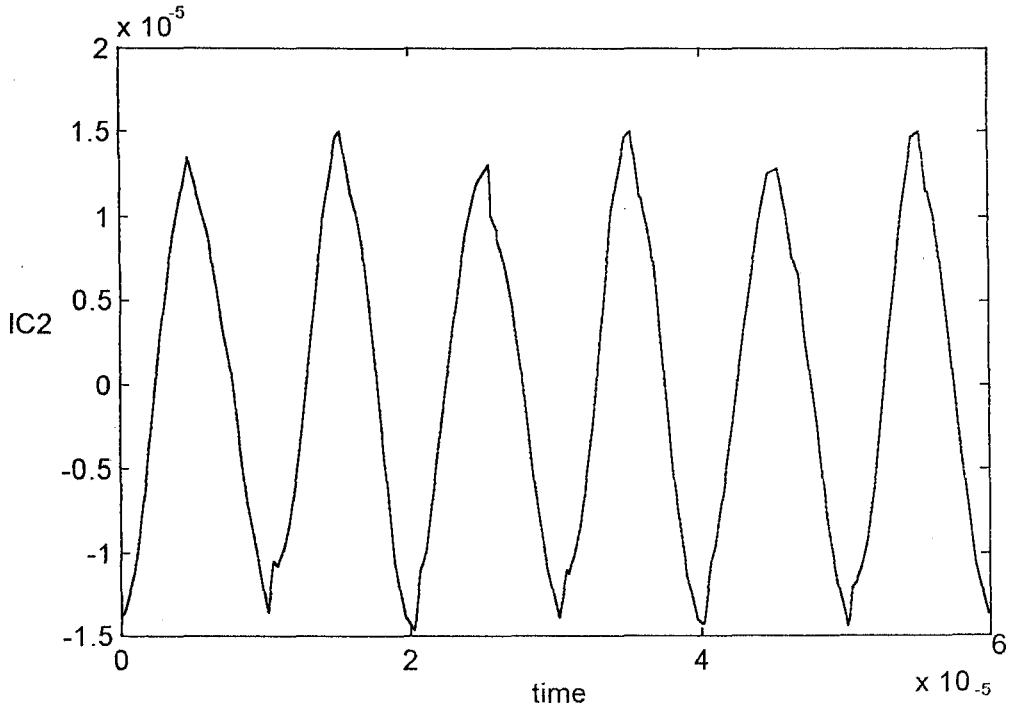
$C_2$  küçük değerli bir kapasitesidir ve düşük frekanslarda aynı şekilde açık devre gibi davranır ve üzerinden çok düşük değerli akımlar akar (nA). Yüksek frekanslarda  $C_2$  ve  $C_3$  kapasitelerinin kapasitif reaktansı küçüktür.



Şekil 4.5. Yüksüz transformör modeli



Şekil 4.6. Transformator modelinin 50 Hz deki transient cevabı



Şekil 4.7. Transformator modelinin 1 MHz deki transient cevabı

Şekil 4.1 deki transformatör modelinin ikincil kısmını birincil kısma indirgeyip ve ideal transformatör kısmı ihmal edilip şekil 4.8 deki indirgenmiş transformatör modeli elde edilmiştir. Bu modeli kullanarak Pspice ve Matlab simülasyonları yapılmıştır. Burada transformatörün dönüştürme oranı ,  $a^2$  çarpanından kurtulmak ve matematiksel işlemlerin kolay olması açısından bir ( $a=1$ ) seçilmiştir.

Transformatör modelinin ikincil kısmı birincil kısma indirgenirken aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır :

$N_1$  : primer sargı sayısı

$N_2$  : sekonder sargı sayısı

$a$  : dönüştürme oranı

$R_2'$  : birincil kısma indirgenmiş ikincil sargı direnci

$L_2'$  : birincil kısma indirgenmiş ikincil sargı kaçak endüktansı

$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

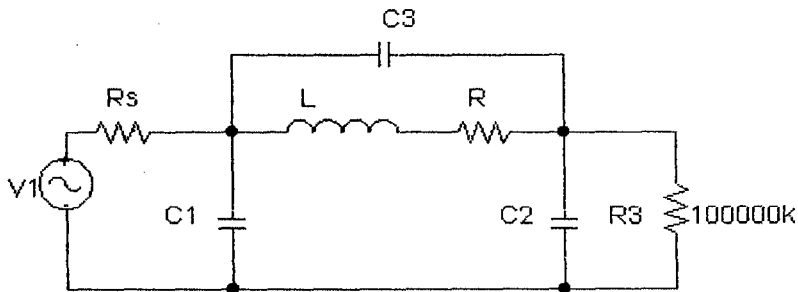
$$R_2' = a^2 \cdot R_2$$

$$L_2' = a^2 \cdot L_2$$

$$R_3' = a^2 \cdot R_3$$

$$R = R_1 + R_2'$$

$$L = L_1 + L_2'$$

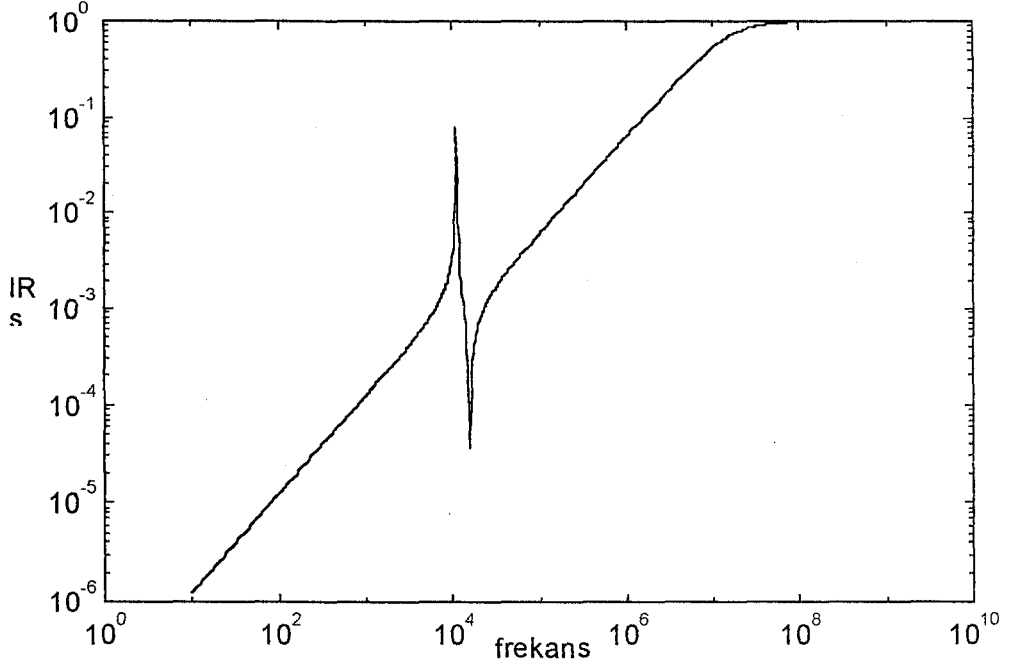


Şekil 4.8. İndirgenmiş transformatör modeli

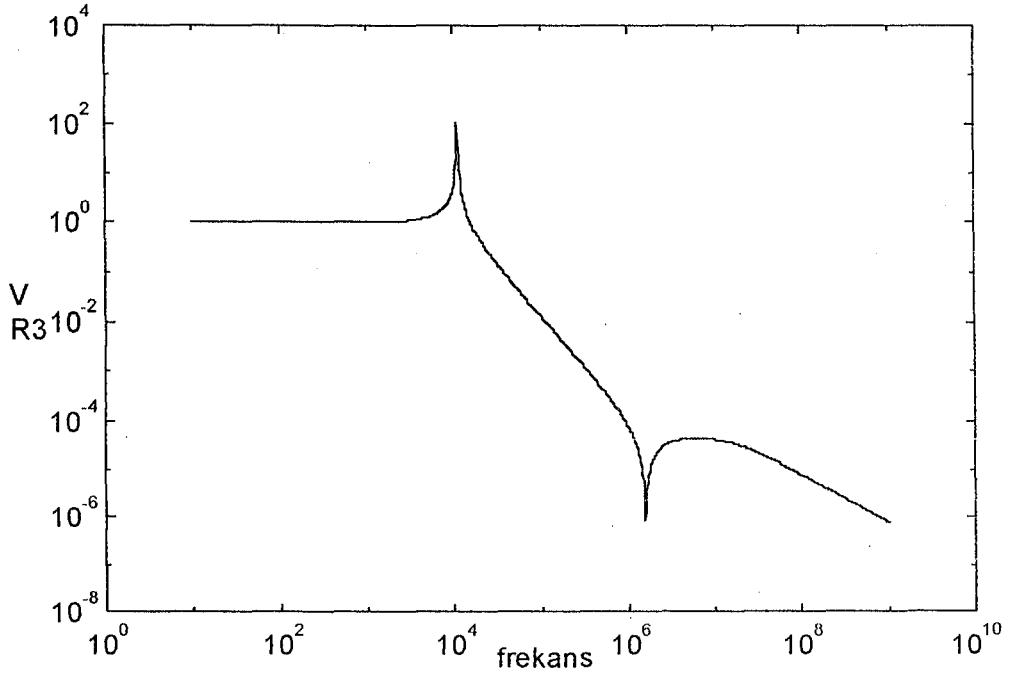
İndirgenmiş transformatör modelinin giriş akımının ( $I_{Rs}$ ) 10 Hz - 1GHz frekans aralığındaki frekans cevabı şekil 4.9 da verilmiştir. Aynı frekans aralığında çıkış geriliminin ( $V_{R3}$ ) frekans cevabı şekil 4.10 da verilmiştir.

Şekil 4.1 deki transformatör modelinin giriş akımı ( $I_{Rs}$ ) 49 MHz frekans değerinde tepe yapmıştır aynı parametre değerleri alınarak şekil 4.8 deki indirgenmiş transformatör modelinin giriş akımı ( $I_{Rs}$ ) bu frekans değerinde tepe yapmamıştır. İndirgenmiş transformatör modeli transformatör modelinde olduğu gibi 157 kHz ve 222 kHz frekans değerlerinde tepe yapmıştır.

İndirgenmiş transformatör modelinin 10 Hz - 1 GHz frekans aralığındaki giriş akımı ve çıkış geriliminin değişimleri aynı frekans aralığındaki transformatör modelinin frekans cevabının tersidir.



Şekil 4.9. Giriş akımı genliği



Şekil 4.10. Çıkış gerilimi genliği

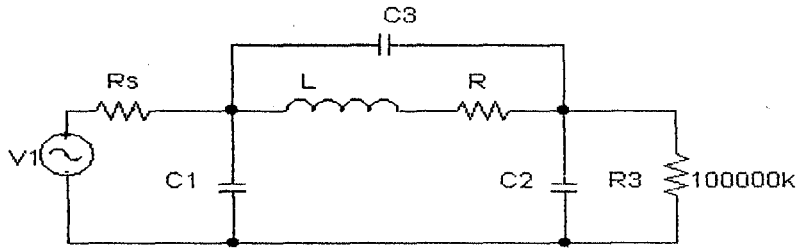
## 4.2. MATLAB SİMİLASYONU

Bu bölümde indirgenmiş transformatör modelinin Matlab da similasyonu yapılarak modelin frekans cevabı alınmıştır. Daha sonra elde edilen bu frekans cevapları kullanılarak indirgenmiş transformatör modelin parametreleri belirlenmiştir. Bu bölümde ayrıca indirgenmiş transformatör modelinin parametreleri değiştirilerek Matlab da similasyonu yapılarak frekans cevabı alınmıştır ve parametreleri değişmeden önceki frekans cevabı ile karşılaştırılmıştır.

### 4.2.1 Transformatörün Frekans Cevabı :

Şekil 4.1 deki transformatör modelinin ikincil kısmını birincil kısma indirgeyip ideal transformatör kısmı ihmal edildikten sonra şekil 4.11 deki model elde edilmiştir.

Şekil 4.11 deki modelin Matlab da similasyonunu yapmak için devrenin admitans ( $Y(s)$ ) ve giriş çıkış transfer fonksiyonu ( $V_o(s)/V_{in}(s)$ ) hesaplanmıştır.



Şekil 4.11. İndirgenmiş transformatör modeli

Admitans fonksiyonu aşağıdaki gibi türetilmiştir :

$$Y(s) = \frac{b_{1a}s^3 + b_{2a}s^2 + b_{3a}s + b_{4a}}{a_{1a}s^3 + a_{2a}s^2 + a_{3a}s + a_{4a}}$$

$$b_{1a} = C_1R_3LC_3 + LR_3C_1C_2 + R_3C_2LC_3$$

$$b_{2a} = C_1R_3RC_3 + C_1RR_3C_2 + C_1L + LC_3 + RC_3R_3C_2$$

$$b_{3a} = C_1R_3 + C_1R + RC_3 + R_3C_2$$

$$b_{4a} = 1$$

$$a_{1a} = R_1C_1R_3LC_3 + R_1C_1LR_3C_2 + R_1R_3C_2LC_3$$

$$a_{2a} = R_3LC_3 + LR_3C_2 + R_1C_1R_3RC_3 + R_1C_1RR_3C_2 + R_1C_1L + R_1LC_3 + R_1RC_3R_3C_2$$

$$a_{3a} = R_3RC_3 + RR_3C_2 + L + R_1C_1R_3 + R_1C_1R + R_1RC_3 + R_1R_3C_2$$

$$a_{4a} = R_3 + R + R_1$$

Giriş - çıkış transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilmiştir :

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{b_{1v}s^2 + b_{2v}s + b_{3v}}{a_{1v}s^3 + a_{2v}s^2 + a_{3v}s + a_{4v}}$$

$$b_{1v} = LR_3C_3$$

$$b_{2v} = RR_3C_3$$

$$b_{3v} = R_3$$

$$a_{1v} = R_1C_1R_3LC_3 + R_1C_1LR_3C_2 + R_1R_3C_2LC_3$$

$$a_{2v} = R_3LC_3 + LR_3C_2 + R_1C_1R_3RC_3 + R_1C_1RR_3C_2 + R_1C_1L + R_1LC_3 + R_1RC_3R_3C_2$$

$$a_{3v} = R_3RC_3 + RR_3C_2 + L + R_1C_1R_3 + R_1C_1R + R_1RC_3 + R_1R_3C_2$$

$$a_{4v} = R_3 + R + R_1$$



Matlab daki 'freqs' komutu yardımı ile elde etmiş olduğumuz admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonlarının frekans cevapları elde edilmiştir. Aşağıdaki komut kullanılır.

$$[H,P]=\text{freqs}(b,a,W)$$

komut satırındaki ifadeler :

f : frekans

$$W=2.\pi.f$$

b : payda

a : pay

$$H(s) = \frac{b(s)}{a(s)}$$

Aşağıdaki parametre değerleri göz önüne alınarak admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonlarının 'freqs' komutu ile frekans cevapları elde edilmiştir. Admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonlarının frekans cevapları sırasıyla şekil 4.12 ve şekil 4.13 verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi model yaklaşık olarak 4600 Hz ve 4700 Hz frekans değerlerinde tepe yapmıştır.

$$R_s=1 \Omega$$

$$L=L_1+L_2=20.10e-3 \text{ H}$$

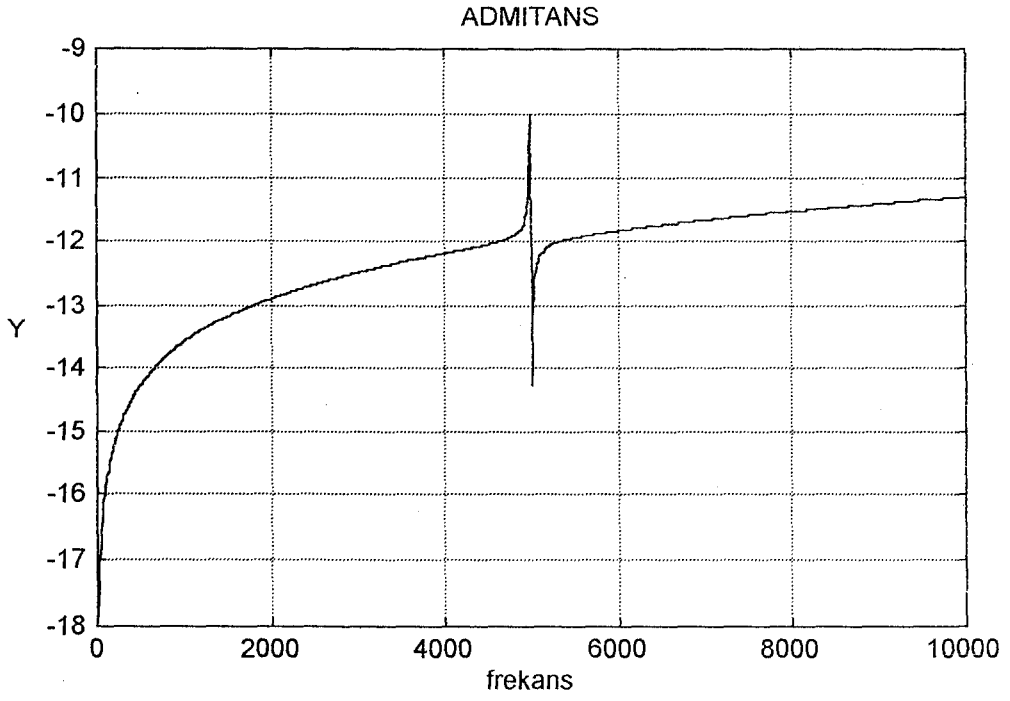
$$R=R_1+R_2=4.32 \Omega$$

$$C_1=10.10e-12 \text{ F}$$

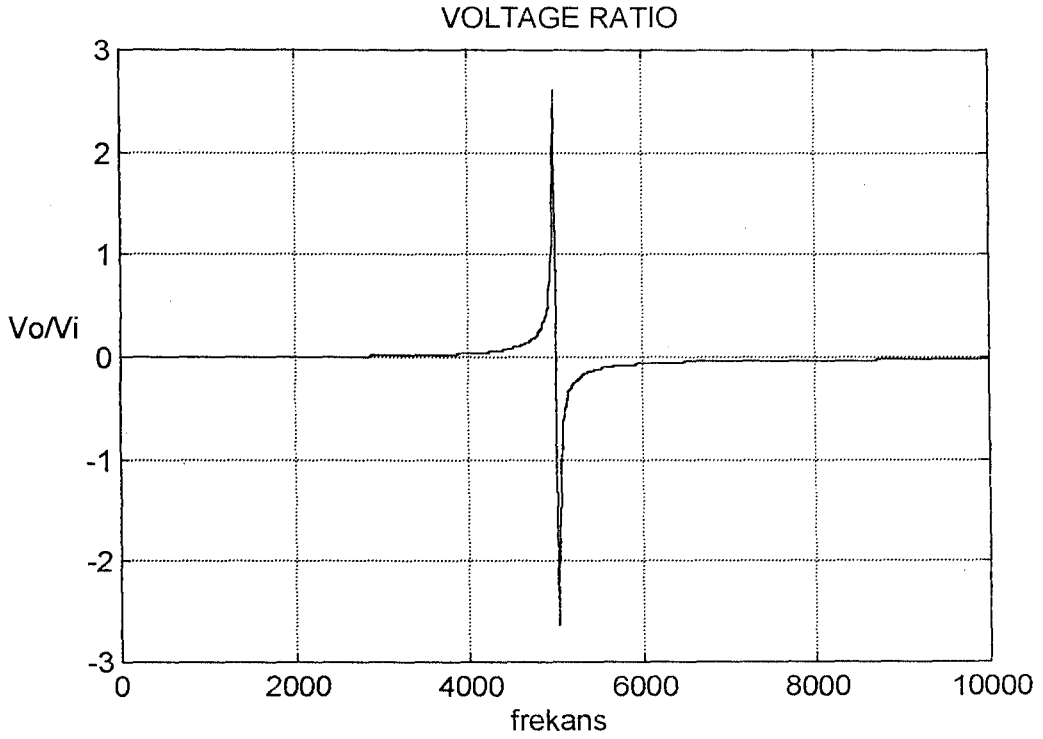
$$C_2=10.10e-12 \text{ F}$$

$$C_3=0.5.10e-9 \text{ F}$$

$$R_3=10000.10e3 \Omega$$



Şekil 4.12. Admitans fonksiyonu frekans cevabı



Şekil 4.13. Giriş çıkış transfer fonksiyonu frekans cevabı

#### 4.2.2 Transformatör Modeli Parametrelerinin Belirlenmesi :

Bu kısımda şekil 4.11 deki indirgenmiş transformatör modelinin parametreleri transformatörün admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonlarını kullanarak belirlenmiştir.

Bu bölümde Matlab daki 'invfreqs' komutu kullanılmıştır. İnvfreqs komutu frekans cevabını model parametrelerine dönüştüren bir komuttur. Bu komut aşağıdaki gibidir :

$$[b,a] = \text{invfreqs}(H,W,nb,na,[],200)$$

na : payın derecesi

nb: paydanın derecesi

H : admitans (Y) veya transfer fonksiyonu (Vo/Vi)

$$H = \frac{b(s)}{a(s)}$$

Önceki bölümde indirgenmiş transformatör modelinin Matlab da simülasyonu yapılarak elde edilen admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonlarının frekans cevabı invfreqs komutu ile frekans bölgesinden transformatör modelinin parametrelerine dönüştürülür.

Admitans fonksiyonunu bir önceki bölümde türetmiştik. Buna göre admitans fonksiyonu aşağıdaki gibidir :

$$Y(s) = \frac{b_{1a}s^3 + b_{2a}s^2 + b_{3a}s + b_{4a}}{a_{1a}s^3 + a_{2a}s^2 + a_{3a}s + a_{4a}}$$

$$b_{1a} = C_1 R_3 L C_3 + L R_3 C_1 C_2 + R_3 C_2 L C_3$$

$$b_{2a} = C_1 R_3 R C_3 + C_1 R R_3 C_2 + C_1 L + L C_3 + R C_3 R_3 C_2$$

$$b_{3a} = C_1 R_3 + C_1 R + R C_3 + R_3 C_2$$

$$b_{4a} = 1$$

$$a_{1a} = R_1 C_1 R_3 L C_3 + R_1 C_1 L R_3 C_2 + R_1 R_3 C_2 L C_3$$

$$a_{2a} = R_3 L C_3 + L R_3 C_2 + R_1 C_1 R_3 R C_3 + R_1 C_1 R R_3 C_2 + R_1 C_1 L + R_1 L C_3 + R_1 R C_3 R_3 C_2$$

$$a_{3a} = R_3 R C_3 + R R_3 C_2 + L + R_1 C_1 R_3 + R_1 C_1 R + R_1 R C_3 + R_1 R_3 C_2$$

$$a_{4a} = R_3 + R + R_1$$

İnvfreqs komutunu frekans domanindeki admitans fonksiyonuna uyguladığımızda bulacağımız  $H_a(s)$  fonksiyonu aşağıdaki gibi olacaktır :

$$H_a = \frac{b_i(s)}{a_i(s)}$$

$$b_i = [b_{1i} \ b_{2i} \ b_{3i} \ b_{4i}]$$

$$a_i = [a_{1i} \ a_{2i} \ a_{3i} \ a_{4i}]$$

Admitans fonksiyonunda paydaki  $b_4$  bire eşittir. Bu yüzden invfreqs komutu ile bulduğumuz  $H_a(s)$  fonksiyonundaki payın 's' katsayısını ( $b_{4i}$ ) 1 e eşitlemek gerekir. Bunun için  $b_i$  ve  $a_i$  matrisini  $1/b_{4i}$  ile çarpmak gerekir. Böylece admitans fonksiyonun katsayıları ile invfreqs komutu ile bulunan  $H_a(s)$  fonksiyonunun katsayıları eşitlenmiştir.

Dışarıdan kolayca ölçülebilecek olan kaynak iç direnci ( $R_1$ ) ve yük direncini ( $R_3$ ) biliyoruz. Admitans fonksiyonundaki paydanın 's' katsayısı aşağıdaki gibidir :

$$a_4 = R_3 + R + R_1$$

buradan ;

$$R = a_4 - R_1 - R_3$$

elde edilir. Böylece birincil ve ikincil sargılarının direnci ( $R$ ) bulunur.

Bir önceki bölümde türetilmiş olan giriş çıkış transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir :

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{b_{1v}s^2 + b_{2v}s + b_{3v}}{a_{1v}s^3 + a_{2v}s^2 + a_{3v}s + a_{4v}}$$

$$b_{1v} = LR_3C_3$$

$$b_{2v} = RR_3C_3$$

$$b_{3v} = R_3$$

$$a_{1v} = R_1C_1R_3LC_3 + R_1C_1LR_3C_2 + R_1R_3C_2LC_3$$

$$a_{2v} = R_3LC_3 + LR_3C_2 + R_1C_1R_3RC_3 + R_1C_1RR_3C_2 + R_1C_1L + R_1LC_3 + R_1RC_3R_3C_2$$

$$a_{3v} = R_3RC_3 + RR_3C_2 + L + R_1C_1R_3 + R_1C_1R + R_1RC_3 + R_1R_3C_2$$

$$a_{4v} = R_3 + R + R_1$$

İnvfreqs komutunu Matlab similasyonu sonucu elde edilen giriş çıkış transfer fonksiyonun frekans cevabına uyguladığımızda bulacağımız  $H_v(s)$  fonksiyonu aşağıdaki gibidir :

$$H_v = \frac{b_{iv}(s)}{a_{iv}(s)}$$

$$b_{iv} = [b_{1iv} \ b_{2iv} \ b_{3iv}]$$

$$a_{iv} = [a_{1iv} \ a_{2iv} \ a_{3iv} \ a_{4iv}]$$

Transfer fonksiyonunda paydaki 's' katsayısı  $b_{3v} = R_3$  dür. İnvfreqs komutu ile bulunan  $H_v(s)$  fonksiyonunun katsayılarını transfer fonksiyonun katsayılarına eşitlemek için paydaki 's' katsayısını ( $b_{3iv}$ )  $R_3$  eşitlemek gerekir. Bunun için  $b_{iv}$  ve  $a_{iv}$  matrislerini  $1/R_3$  ile çarpmak gerekir. Katsayılar eşitlendikten sonra paydaki 's<sup>2</sup>' katsayısı ( $b_{2v}$ ) aşağıdaki gibidir :

$$b_{2v} = RR_3C_3$$

Birincil ve ikincil sargıları direnci (R) ve yük direncini ( $R_3$ ) bilmemizden dolayı :

$$C_3 = \frac{b_{2v}}{RR_3}$$

Birincil ve ikincil sargıları arasındaki parasitik ( $C_3$ ) kapasitesi hesaplanmıştır.

Giriş çıkış transfer fonksiyonundaki paydaki 's<sup>3</sup>' katsayısı (b<sub>1v</sub>) aşağıdaki gibidir :

$$b_{1v} = LR_3C_3$$

Burada yük direnci (R<sub>3</sub>) birincil ve ikincil sargıları arasındaki parasitik kapasitenin (C<sub>3</sub>) bilinmesinden dolayı :

$$L = \frac{b_{1v}}{LC_3}$$

birincil ve ikincil sargıları endüktansı (L) bulunmuştur.

Tekrar admitans fonksiyonuna dönersek paydaki 's' in katsayısı (b<sub>3a</sub>) ve paydadaki 's' katsayısı (a<sub>3a</sub>) aşağıdaki gibidir :

$$b_{3a} = C_1R_3 + C_1R + RC_3 + R_3C_2$$

$$a_{3a} = R_3RC_3 + RR_3C_2 + L + R_1C_1R_3 + R_1C_1R + R_1RC_3 + R_1R_3C_2$$

Bu iki ifadede sadece parasitik kapasiteler birincil sargının toprağa göre kapasitesi (C<sub>1</sub>) ve ikincil sargının toprağa göre kapasitesi (C<sub>2</sub>) bilinmemektedir. Bu iki denklem çözülerek bu parasitik kapasitelerin değerleri hesaplanmıştır. Matlab da yazılan program ekte verilmiştir.

Bulunan sonuçlar	Parametre değerleri
R=4.32 Ω	R=4.32 Ω
L=2e-1 H	L=2e-1 H
C1= 9.9994e-11 F	C1= 9.9994e-11 F
C2=9.9999e-11 F	C2=9.9999e-11 F
C3=5e-9 F	C3=5e-9 F

Sonuçlardan görüldüğü gibi birincil sargının toprağa göre kapasitesi %0.06 lık bir hata oranı ile ve ikincil sargının toprağa göre kapasiteside %0.01 lik bir hata oranı ile bulunmuştur.

### 4.2.3. Parametrelerin Değişmesi Durumunda Frekans Cevabı :

Yapılan çalışmalar sonucu transformatördeki arızaların tipine göre transformatör modelindeki parametrelerde değişmeler gözlenmiştir[5]. Bunlar :

Transformatördeki disk bozulmaları , bölgesel kırılmalar ve sargı kısa devreleri arızalarında transformatörün endüktansında (L) değişmelerdir.

Nem oranının artması ve hata akımlarının meydana getirdiği büyük mekanik kuvvetler sonucu sargılardaki bozulmalar birincil ve ikincil sargılarının toprağa göre kapasitesinde (C1 , C2) değişmelere sebep olmuştur.

Birincil ve ikincil sargıları arasındaki kapasitedeki (C3) değişmeler sargılar arasındaki izolasyon arızalarından dolayı kaynaklanmıştır.

Birincil ve ikincil sargıları direncindeki (R) değişmeler sargı kısa devrelerinden ve disk bozulmalarından meydana geldiği gözlenmiştir.

Bu bölümde şekil 4.1 deki indirgenmiş transformatör modelinin parametreleri değiştirilerek admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonundaki değişmeler incelenmiştir.

Burada parasitik kapasitelerden birinin değişmesi durumunda veya sargı endüktansının değişmesi durumunda rezonans frekanslarında değişmeler gözlenmiştir. Bir 'RLC' devresinin frekans cevabı alındığında rezonans frekansında tepe yapar ve rezonans frekansı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır :

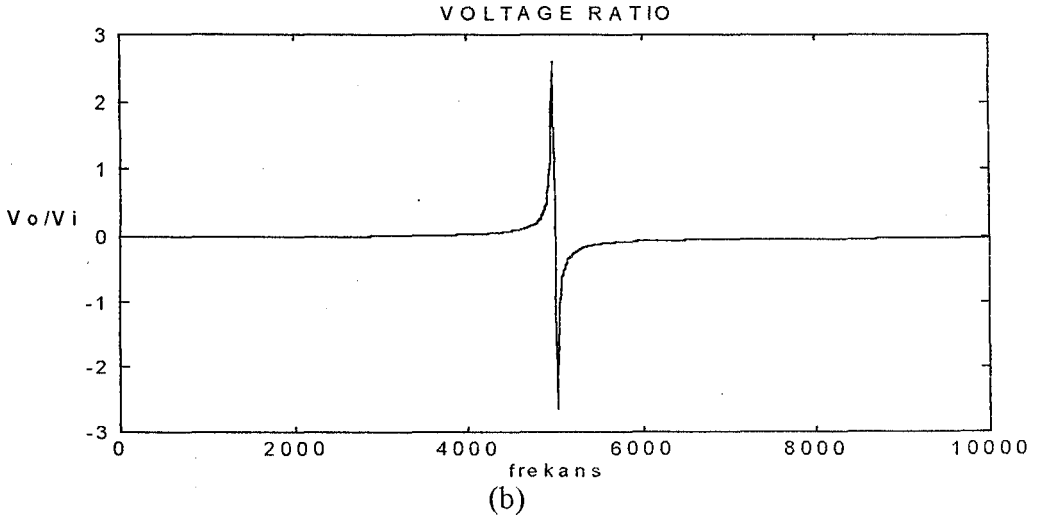
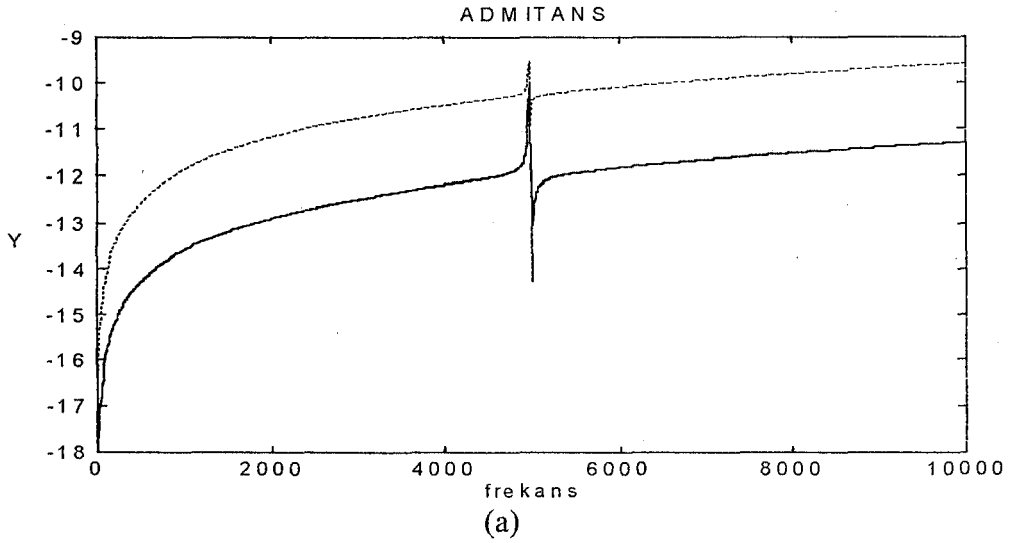
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Yukarıdaki bağıntıdan da görüldüğü gibi rezonans frekansı endüktans (L) ve kapasiteye (C) bağlıdır. Dirençten (R) bağımsızdır.

İndirgenmiş transformatör modelinde sargı direnci (R) değişmesi durumunda sadece genlikte değişme gözlenmiştir. Diğer elemanların değişmesinde ise tepe yapılan frekans değerinde değişme gözlenmiştir.

### 4.2.3.a C1'in Etkisi

Birincil sargının toprağa göre kapasitesi (C1) 10 kat artırıldığında ilk tepe frekansında değişiklik olmamıştır fakat ikinci tepe frekansında çok küçük bir kayma olmuştur. İkinci tepe frekansı 5010 Hz den 4990 Hz'e kaymıştır. Ayrıca admitans fonksiyonu genliğinde yaklaşık olarak % 13,92 lik bir artış olmuştur. Buna karşılık giriş çıkış transfer fonksiyonunda değişme gözlenmemiştir. (Şekil 4.14)

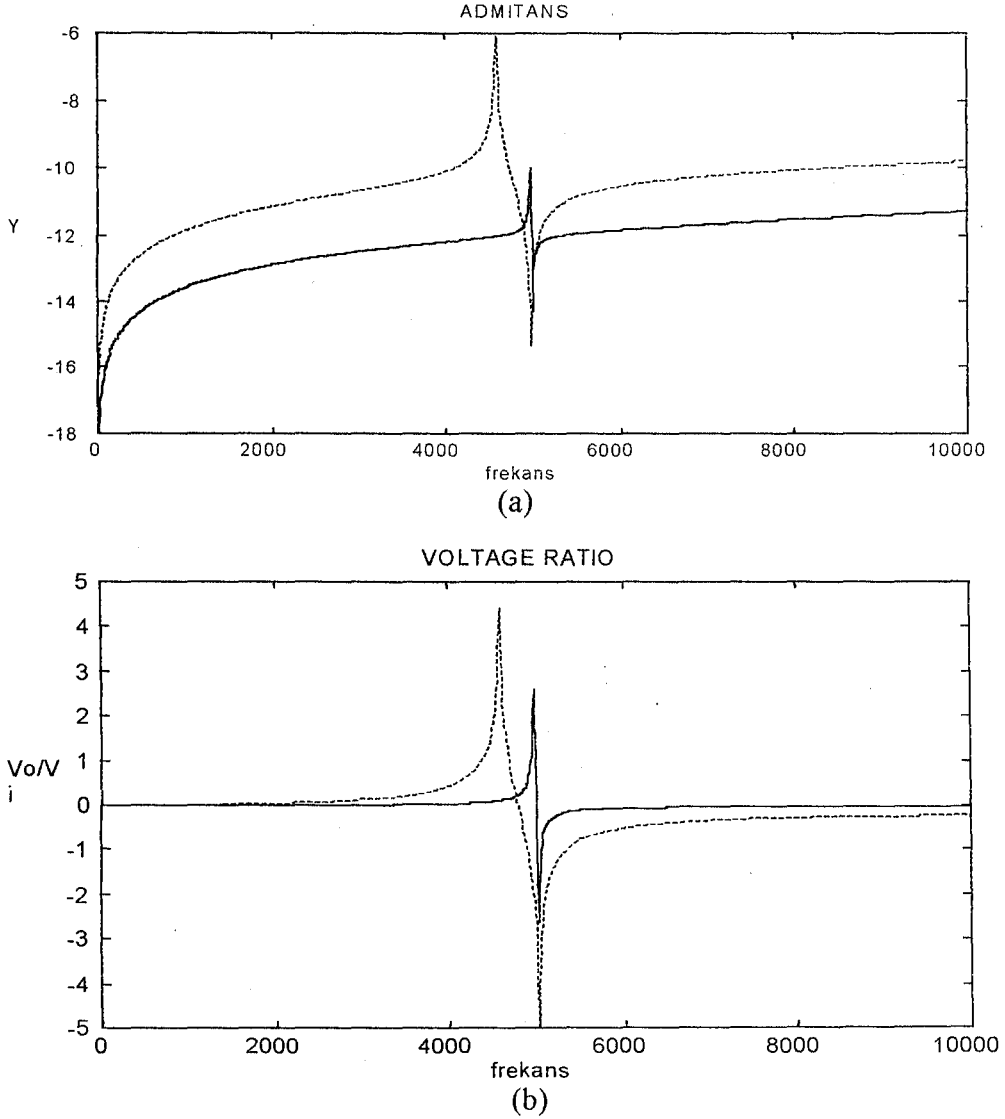


Şekil 4.14. (a) C1 10 kat artığında admitans fonksiyonu  
(b) C1 10 kat artığında giriş çıkış transfer fonksiyonu  
---- C1 10 kat artığında



#### 4.2.3.b C2'nin Etkisi

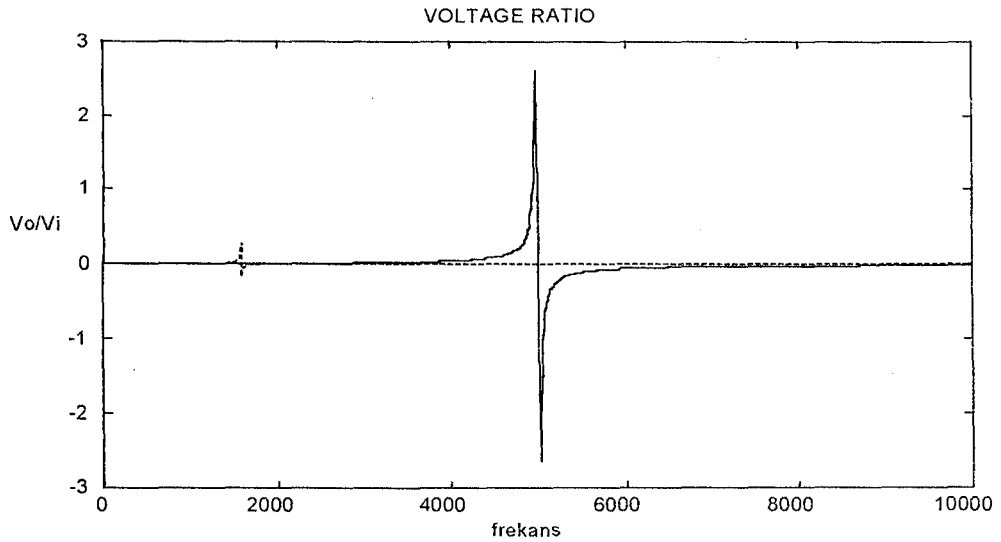
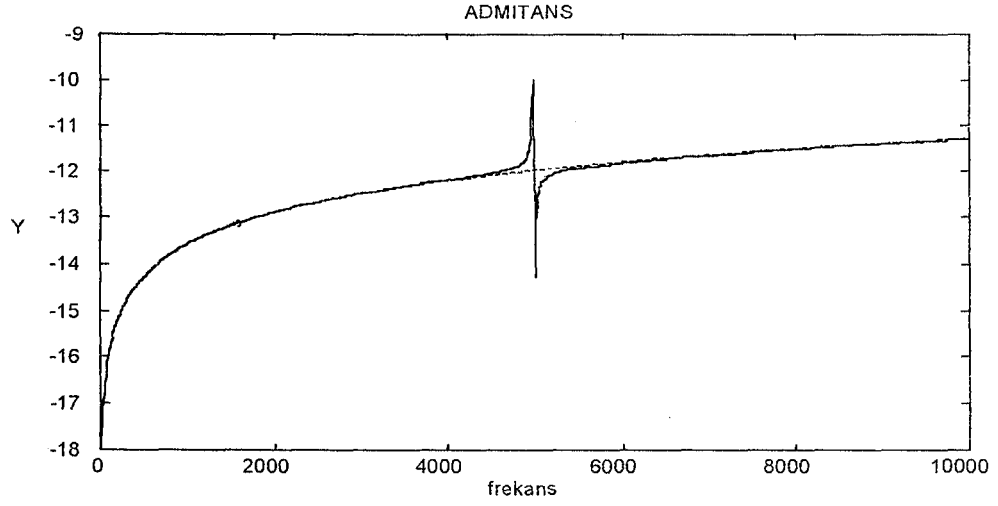
İkincil sargının toprağa göre kapasitesini 10 kat artırdığımız zaman tepe frekansları 4590 Hz ve 4990 Hz frekans değerlerine kaymıştır. Ayrıca admitans fonksiyonun genliğinde yaklaşık olarak % 12.92 giriş çıkış transfer fonksiyonu genliğinde yaklaşık olarak % 8.45 lik bir artış gözlenmiştir.(Şekil 4.15)



Şekil 4.15. (a) C2 10 kat artığında admitans fonksiyonu  
(b) C2 10 kat artığında giriş çıkış transfer fonksiyonu  
---- C2 10 kat artığında

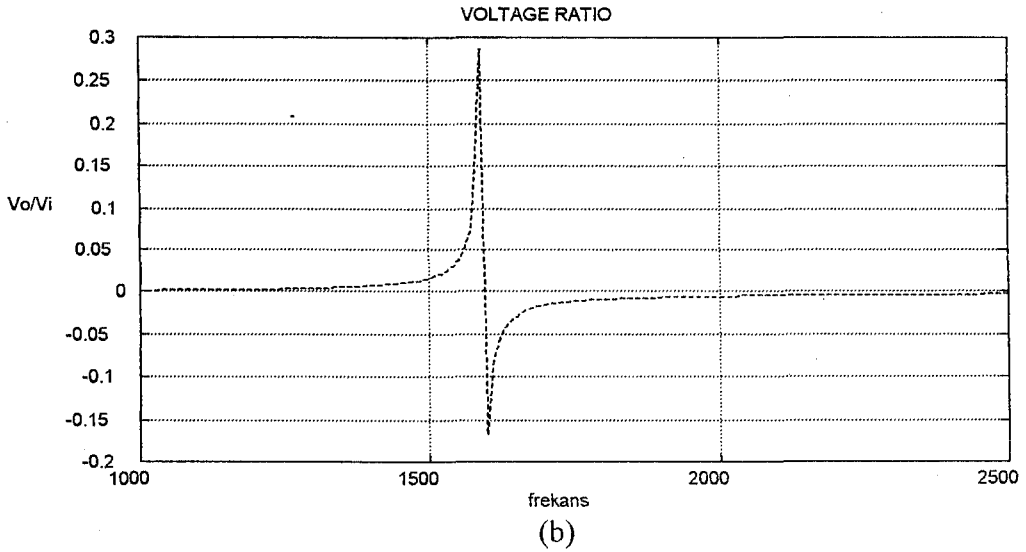
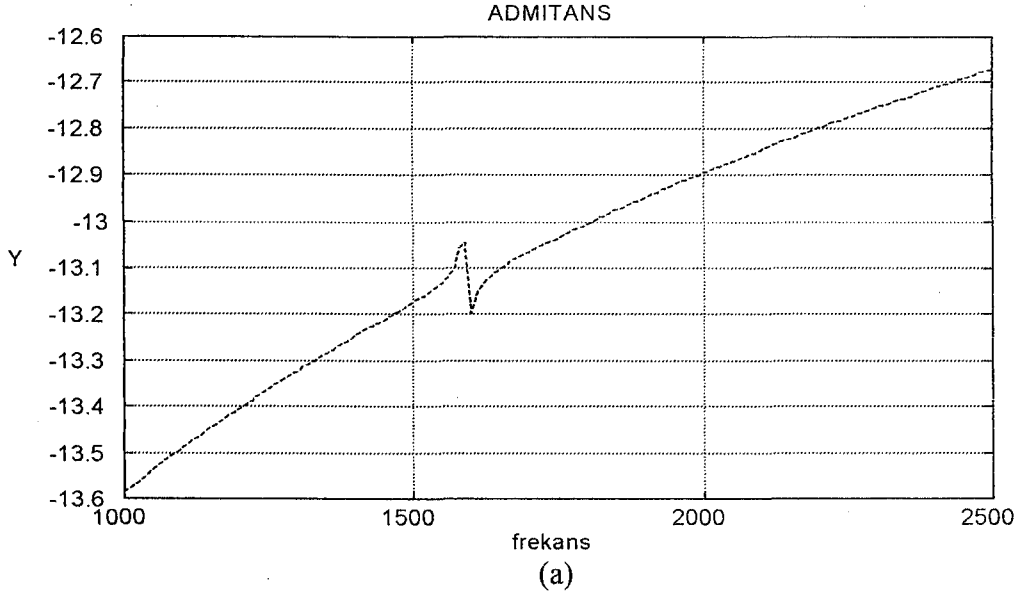
### 4.2.3.c C3'ün Etkisi

Birincil ve ikincil sargıları arasındaki kapasiteyi 10 kat artırdığımızda tepe frekansları 1590 Hz ve 1600 Hz frekans değerlerine kaymıştır ve admitans fonksiyonu genliğinde  $5.28 \times 10^{-4}$  çok küçük bir artış olmuştur. Giriş çıkış transfer fonksiyonunda da % 0.88 lik artış olmuştur. (Şekil 4.16)



Şekil 4.16. (a) C3 10 kat artığında admitans fonksiyonu  
(b) C3 10 kat artığında giriş çıkış transfer fonksiyonu  
---- C3 10 kat artığında

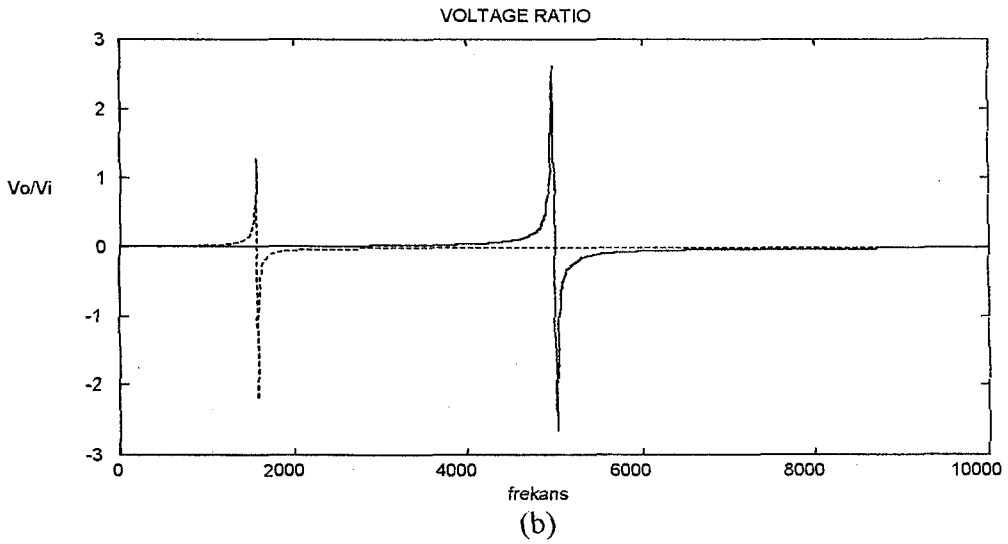
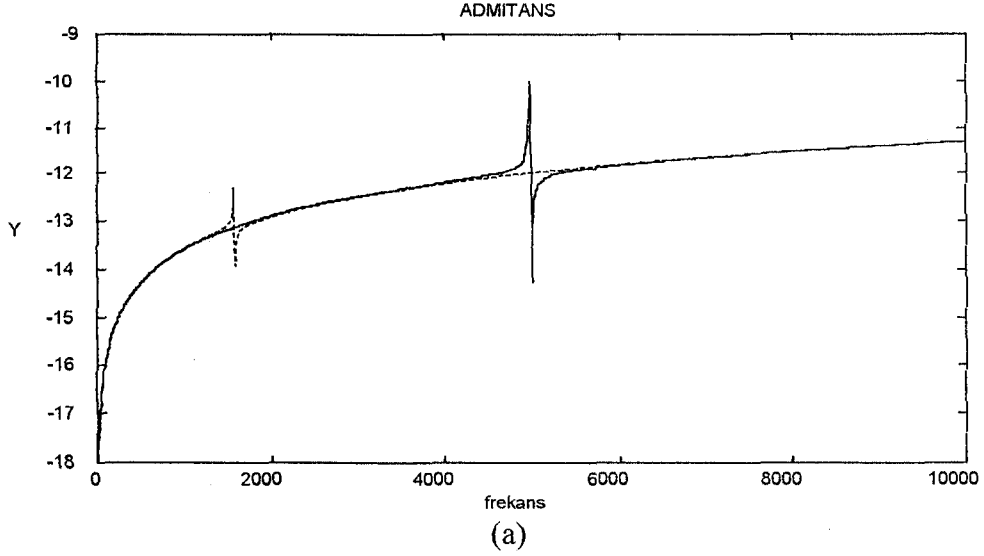
Şekil 4.16 da C3 10 kat arttığında zaman meydana gelen değişiklikler tam olarak görülmektedir. Bunun için 1 kHz - 2.5 KHz frekans aralığında admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonlarının frekans cevabı incelendiğinde yapmış olduğu tepeler daha net bir şekilde görülmektedir. (Şekil 4.17)



Şekil 4.17. (a) C3 10 kat arttığında admitans fonksiyonu  
(b) C3 10 kat arttığında giriş çıkış transfer fonksiyonu

#### 4.2.3.d L'in Etkisi

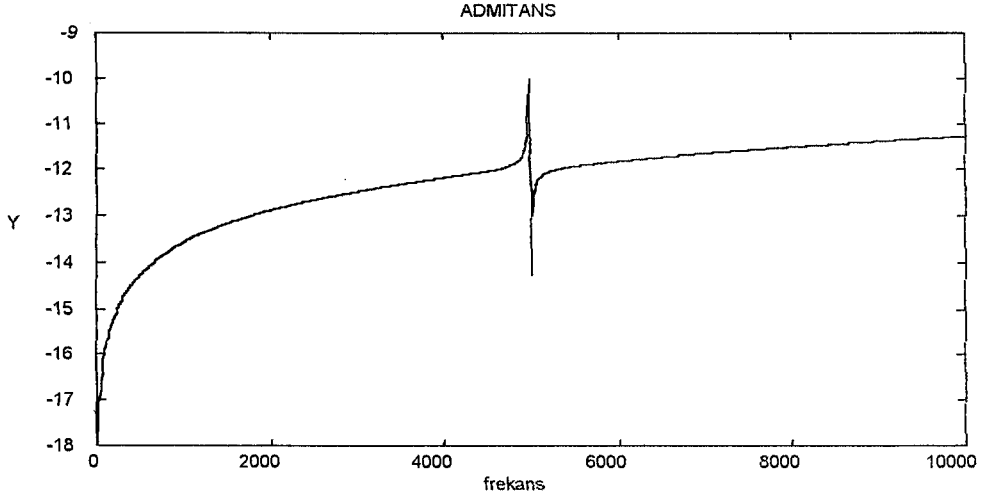
Birincil ve ikincil sargıları kaçak endüktansı ( $L$ ) 10 kat artığında tepe frekansları 1570 Hz ve 1590 Hz frekans değerlerine kaymıştır. Giriş çıkış transfer fonksiyonlarının genliklerinde sırasıyla %5.84e-4 ve % 0.38 lik çok küçük azalmalar görülmüştür. (Şekil 4.18)



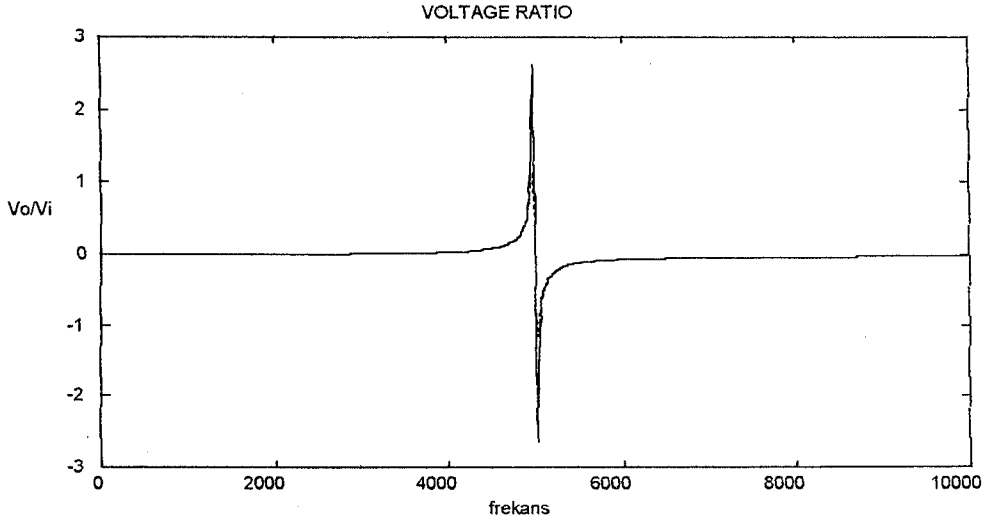
Şekil 4.18. (a) L 10 kat artığında admitans fonksiyonu  
(b) L 10 kat artığında giriş çıkış transfer fonksiyonu  
---- L 10 kat artığında

#### 4.2.3.e R'in Etkisi

Birincil ve ikincil sargıları direnci (R) 10 kat artığında tepe frekanslarında değişme olmamıştır fakat admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonları genliklerinde sırasıyla %1.68e-5 ve %0.0028 lik çok küçük azalmalar görülmüştür. (Şekil 4.19)



(a)



(b)

Şekil 4.18. (a) R 10 kat artığında admitans fonksiyonu  
(b) R 10 kat artığında giriş çıkış transfer fonksiyonu  
---- R 10 kat artığında

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada transformatörlerdeki arızaların tanımlanması ve bulunması için kullanılacak bir metot olan frekans cevabı için bir model oluşturulmuştur. Bu model birincil ve ikincil sargılarının direnci ve kaçak endüktansı, birincil sargının toprağa göre kapasitesi, ikincil sargının toprağa göre kapasitesi, birincil ve ikincil sargıları arasındaki kapasiteden oluşmuştur. Bu modelin PSPICE ve MATLAB simülasyonları yapılarak frekans cevapları alınmıştır. Matlab da simülasyonlar yapılarak alınan frekans cevabını ve modelin admitans ve giriş çıkış transfer fonksiyonları kullanılarak modelin parametreleri belirlenmiştir. Parametreler belirlendiğinde birincil sargının toprağa göre kapasitesinde %0.06 lik bir hata oranı ile ve ikincil sargının toprağa göre kapasitesinde %0.01 lik bir hata oranı ile diğer parametreler hatasız olarak belirlenmiştir.

Transformatörlerde herhangi bir arıza olduğu zaman transformatör modelinin parametrelerinde değişiklikler meydana gelir. Bu değişikliklerin transformatörün frekans cevabında etkilerini görmek için transformatör modelinin parametreleri değiştirilip Matlab da simülasyon yapılarak frekans cevabı alınmıştır. Transformatör modelindeki birincil ve ikincil sargıları direnci (R) değiştiği zaman sadece frekans cevabının genliğinde değişim olmuştur. Buna karşılık birincil sargının ve ikincil sargının toprağa göre kapasitesi (C1, C2), birincil ve ikincil sargıları arasındaki kapasite (C3), birincil ve ikincil sargıları endüktansı (L) deki değişiklikler frekans cevabının genliğinde ve tepe frekansı değerlerinde değişimlere sebep olmuştur.

## KAYNAKLAR

1. DOUGLASS D.A., Potential Transformer Accuracy at 60 Hz Voltages Above and Below Rating and At Frequencies Above 60 Hz , IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems Vol. PAS- 100 , pp 1370, No.3 March 1981
2. ISLAM, S.M. , COATES, K.M. and LEDWICH, G., Identification of High Frequency Transformer Equivalent Circuit Using Matlab from Frequency Data , IEEE Industry Applications Society Annual Meeting , New Orleans , October 5-9 1997
3. BAK-JENSEN, J. , BAK-JENSEN, B. MIKKELSEN, S.D. and JENSEN, C.G., Parametric Identification in Potential Transformer Modeling, Transaction on Power Delivery , Vol.7 No 1 , January 1992, pp 70
4. DICK, E. P. and EVREN C.C., Transformer Diagnostic Testing By Frequency Response Analysis, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , Vol. PAS-97 Nov/Dec 1978, pp 2144
5. STACE M., ISLAM S.M., Condition Monitoring of Power Transformers in the Australian State of New South Wales Using Transfer Function Measurements , Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials , Seoul, Korea, May25-30 1997, pp 248

## 6.EKLER

Ek1 :

Admitans fonksiyonu :

```
clf
R1=1;
Rp=2.16;
L1=10*10e-3;
Rs=2.16;
L2=10*10e-3;
C1=10*10e-12;
C2=10*10e-12;
C3=0.5*10e-9;
R3=10000*10e3;
L=L1+L2;
R=Rp+Rs;
f=10:10:10000;
W=2*pi.*f;
aa=[R1*C1*R3*L*C3+R1*C1*L*R3*C2+R1*R3*C2*L*C3
R3*L*C3+L*R3*C2+R1*C1*R3*R*C3+R1*C1*R*R3*C2+R1*C1*L+R1*L*C3+R1*R*C3*
R3*C2 R3*R*C3+R*R3*C2+L+R1*C1*R3+R1*C1*R+R1*R*C3+R1*R3*C2 R3+R+R1];
ba=[C1*R3*L*C3+L*R3*C1*C2+R3*C2*L*C3
C1*R3*R*C3+C1*R*R3*C2+C1*L+L*C3+R*C3*R3*C2 C1*R3+C1*R+R*C3+R3*C2 1];
[H, P]=freqs(ba, aa, W);
h=abs(H);
plot(f, log(h), 'k')
title('ADMITANS')
xlabel('frekans')
ylabel('Y')
grid
```



## Ek 2 :

### 2.Giriş – çıkış transfer fonksiyonu :

```
clear
R1=1;
Rp=2.16;
L1=10*10e-3;
Rs=2.16;
L2=10*10e-3;
C1=10*10e-12;
C2=10*10e-12;
C3=0.5*10e-9;
R3=10000*10e3;
L=L1+L2;
R=Rp+Rs;
f=10:10:10000;
W=2*pi.*f;
bv=[L*R3*C3 R*R3*C3 R3];
av=[R1*C1*R3*L*C3+R1*C1*L*R3*C2+R1*R3*C2*L*C3
R3*L*C3+L*R3*C2+R1*C1*R3*R*C3+R1*C1*R*R3*C2+R1*C1*L+R1*L*C3+R1*R*C3*
R3*C2 R3*R*C3+R*R3*C2+L+R1*C1*R3+R1*C1*R+R1*R*C3+R1*R3*C2 R3+R+R1];
[H,P]=freqs(bv,av,W);
h=abs(H);
plot(f,log(h),'k')
title('VOLTAGE RATIO')
xlabel('frekans')
ylabel('Vo/Vi')
grid
```

### Ek 3 : Parametrelerin bulunması

```
% file name donus
% voltageratio prog
clear
clf
R1=1;
Rp=2.16;
L1=10*10e-3;
Rs=2.16;
L2=10*10e-3;
C1=10*10e-12;
C2=10*10e-12;
C3=0.5*10e-9;
R3=10000*10e3;
L=L1+L2;
R=Rp+Rs;
f=10:10:10000;
W=2*pi.*f;
bv=[L*R3*C3 R*R3*C3 R3];
av=[R1*C1*R3*L*C3+R1*C1*L*R3*C2+R1*R3*C2*L*C3
R3*L*C3+L*R3*C2+R1*C1*R3*R*C3+R1*C1*R*R3*C2+R1*C1*L+R1*L*C3+R1*R*C3*
R3*C2 R3*R*C3+R*R3*C2+L+R1*C1*R3+R1*C1*R+R1*R*C3+R1*R3*C2 R3+R+R1];
[H,P]=freqs(bv,av,W);
h=abs(H);
plot(f,log(h))
title('VOLTAGE RATIO')
xlabel('frekans')
ylabel('Vo/Vi')
grid
% admitans prog
R1=1;
Rp=2.16;
L1=10*10e-3;
Rs=2.16;
L2=10*10e-3;
C1=10*10e-12;
C2=10*10e-12;
C3=0.5*10e-9;
R3=10000*10e3;
L=L1+L2;
R=Rp+Rs;
f=10:10:10000;
W=2*pi.*f;
aa=[R1*C1*R3*L*C3+R1*C1*L*R3*C2+R1*R3*C2*L*C3
R3*L*C3+L*R3*C2+R1*C1*R3*R*C3+R1*C1*R*R3*C2+R1*C1*L+R1*L*C3+R1*R*C3*
R3*C2 R3*R*C3+R*R3*C2+L+R1*C1*R3+R1*C1*R+R1*R*C3+R1*R3*C2 R3+R+R1];
ba=[C1*R3*L*C3+L*R3*C1*C2+R3*C2*L*C3
C1*R3*R*C3+C1*R*R3*C2+C1*L+L*C3+R*C3*R3*C2 C1*R3+C1*R+R*C3+R3*C2 1];
[Ha,P]=freqs(ba,aa,W);
ha=abs(Ha);
grid
```

```

[bi,ai]=invfreqs(H,W,2,3,[],200)
% kat sayilar orantilandi
aiv=(100000000/bi(1,3))*ai
biv=(100000000/bi(1,3))*bi
% invfreqs admitans
[b,a]=invfreqs(Ha,W,3,3,[],200);
% katsayilar orantilandi
aa=(1/b(1,4))*a;
ba=(1/b(1,4))*b;
% aaaaaaaaaa
R1=1;
R3=10000*10e3;
%voltagegeratio icin a ve b degerleri
b1=biv(1,1);
b2=biv(1,2);
b3=biv(1,3);
a1=aiv(1,1);
a2=aiv(1,2);
a3=aiv(1,3);
a4=aiv(1,4);
Ro=a4-R3-R1;
C3o=b2/(R*R3);
Lo=b1/(R3*C3);
%admitans1 icin a ve b degereleri
b1a=ba(1,1);
b2a=ba(1,2);
b3a=ba(1,3);
a1a=aa(1,1);
a2a=aa(1,2);
a3a=aa(1,3);
a4a=aa(1,4);
k=R3*Ro*C3o+Lo+R1*Ro*C3o;
k1=a3a-k;
k2=b3a-Ro*C3o;
x1=R1*R3+R1*Ro;
x2=Ro*R3+R1*R3;
y1=R3+Ro;
y2=R3;
C2o=(k2-(y1*k1/x1))/(y2-(y1*x2/x1));
C1o=(k1-x2*C2)/x1;
Ro
Lo
C1o
C2o
C3o
[Ro Lo C1o C2o C3o]
[R L C1 C2 C3]

```