

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

**KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİNDE FARKLI HAVA ARALIKLARI VE
KARAKTERİSTİK EMPEDANSLARA GÖRE VERİM ANALİZİ**

ALİ AĞÇAL

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

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. NUR BEKİROĞLU**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİNDE FARKLI HAVA ARALIKLARI VE
KARAKTERİSTİK EMPEDANSLARA GÖRE VERİM ANALİZİ**

Ali AĞÇAL tarafından hazırlanan tez çalışması 06/06/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İsmail AKSOY
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hakan Paşa PARTAL
Yıldız Teknik Üniversitesi



ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında ve akademik hayatımın her aşamasında benden yardımını hiç bir zaman esirgemeyen, destek ve teşviklerini her zaman şükranla anacağım, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU'na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yine tez çalışması süresince kendisinden destek gördüğüm Arş. Gör. Dr. Selin Özçira'ya ve Arş. Gör. Murat Tezcan'a değerli katkıları için teşekkür ederim.

Ayrıca her türlü desteklerinden dolayı değerli hocalarıma ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan ve çalışmalarım sırasında bana gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı aileme teşekkürü borç bilirim.

Haziran, 2014

Ali AĞÇAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Orijinal katkı.....	6
BÖLÜM 2	
KABLOSUZ ENERJİ AKTARIMI SİSTEMLERİ.....	8
2.1 Elektromagnetik Radyasyon Güç Aktarım Sistemi:.....	8
2.2 Mikrodalga Güç Aktarım Sistemi	9
2.3 Lazerle Güç Işınlama Sistemi.....	9
2.4 Endüktif Kuplaj Güç Aktarım Sistemi	10
2.5 Magnetik Rezonanslı Kuplaj.....	12
2.5.1 Sistemin Açıklaması	12
2.5.2 Teknoloji uygulamaları ve avantajları.....	14
BÖLÜM 3	
MANYETİK REZONANS DEVRESİ.....	16
3.1 Kullanılan Magnetik Kuplaj Devresi	19
3.2 Verim Denklemi	21

BÖLÜM 4

SİMÜLASYON SONUÇLARI	22
4.1 Verimin frekansa göre değişiminin farklı hava aralığı ve karakteristik empedanslarda incelenmesi	22
4.2 Z eşdeğer empedansın frekansa göre değişiminin farklı hava aralığı ve karakteristik empedanslarda incelenmesi	24
4.3 Rezonans frekansları	25
4.4 Hava aralığı ve frekansa göre verimin değişimi nin incelenmesi	26
4.5 PSIM Simülasyon Sonuçları	29
4.5.1 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için simülasyon sonuçları	29
4.5.2 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için simülasyon sonuçları	31
4.5.3 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için simülasyon sonuçları	33
4.5.4 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5 ohm için simülasyon sonuçları	35
4.5.5 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için simülasyon sonuçları	37
4.6 Maxwell 3D Simülasyon Sonuçları	40
4.6.1 Hava aralığı 1 cm Z=5 Ω	41
4.6.2 Hava aralığı 5 cm Z=5 Ω	43
4.6.3 Hava aralığı 10 cm Z=5 Ω	45
4.6.4 Hava aralığı 15 cm Z=5 Ω	48
4.6.5 Hava aralığı 20 cm Z=5 Ω	50
4.7 Verim tablosu	52

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	56

EK-A

MATLAB Sonuçları	61
A-1 MATLAB ile U fonksiyona göre optimum enerji aktarımı verimi grafiği kodları	61
A-2 MATLAB ile verim denklemi ve grafikleri	61
A-3 MATLAB Z eşdeğer denklemi ve grafikleri	73
A-4 MATLAB ile Hava aralığı ve frekansa göre verimin değişimi nin üç boyutlu grafikleri	84

EK-B

PSIM Simülasyon Grafikleri	85
----------------------------------	----

B-1 Z=1 ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları.....	85
B-2 Z=10 ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları.....	95
B-3 Z=25 ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları.....	105
B-4 Z=50 ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları.....	115
B-5 Z=100 ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları.....	125
ÖZGEÇMİŞ	136

SİMGE LİSTESİ

C_d	Cihaz rezonatör kondasatörü
C_s	Kaynak rezonatör kondasatörü
I_1	Birincil devre akımı
I_2	İkincil devre akımı
k	Rezonatörler arası kuplaj oranı
L_1	Birincil devre endüktansı
L_2	İkincil devre endüktansı
L_d	Cihaz rezonatör endüktansı
L_g	Giriş kuplaj endüktansı
L_L	Çıkış kuplaj endüktansı
L_m	Karşıt endüktans
L_s	Kaynak rezonatör endüktansı
$L_{winding_A}$	A sargısı endüktansı
$L_{winding_B}$	B sargısı endüktansı
M	Karşıt kuplaj
M_g	Giriş karşıt kuplajı
M_L	Yük karşıt kuplajı
Q	Kalite oranı
Q_d	Cihaz rezonatör kalite oranı
Q_s	Kaynak kalite kayıp oranı
$P_{çıkış}$	Çıkış gücü
$P_{giriş}$	Giriş gücü
$P_{g,max}$	Maksimum giriş gücü
P_L	Yük tarafında çıkış gücü
R_d	Cihaz rezonatör direnci
R_g	Giriş direnci
R_L	AC yük direnci
R_s	Kaynak rezonatör direnci
U	Güç aktarım oranı
V_1	Birincil devre gerilimi
V_2	İkincil devre gerilimi
V_{Freq}	Giriş gerilimi frekansı
V_g	Giriş gerilimi
ω_0	Rezonans frekansı
Z_0	Karakteristik empedans

$Z_{Eş}$	Eşdeğer empedans
$Z_{yük}$	Yük empedansı
$VP1$	Giriş gerilimi
$VP2$	Çıkış gerilimi
$VP3$	Birincil sargı uç gerilimi
$VP4$	İkincil sargı uç gerilimi
$Vc1$	Birincil kondansatör uç gerilimi
$Vc2$	İkincil kondansatör uç gerilimi
$VAPF6$	Giriş gücü
$VAPF2$	Çıkış gücü

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
FEM	Finite element method (sonlu elemanlar yöntemi)
HRWPT	High resonant wireless power transfer (yüksek rezonanslı kablosuz güç aktarımı)
KET	Kablosuz Enerji Transferi
PSIM	Powersim simulasyon programı
RF	Radio frequency (radyo frekansı)
SAR	Specific absorption rate (ölgül emilim oranı)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Elektrikli araç takipli 3 faz enerjili karayolu yapımı projesi	11
Şekil 2.2 Almanya Bombardier şirketinin endüktif güç transferi ile çalışan treni.....	11
Şekil 2.3 Kablosuz enerji aktarımı blok diyagramı	12
Şekil 2.4 Giriş ve çıkış rezonatörlü endüktif kuplajın şematik tasarımı	14
Şekil 3.1 Rezonatör örneği	16
Şekil 3.2 Bağlantılı rezonatör sisteminin eşdeğer devresi	17
Şekil 3.3 U fonksiyonuna bağlı enerji aktarımının optimum verimi grafiği	18
Şekil 3.4 Magnetik kuplaj devresi	19
Şekil 3.5 Magnetik kuplaj eşdeğer devresi	21
Şekil 4.1 Farklı hava aralığı ve karakteristik empedanslar için verim grafiği	23
Şekil 4.2 Farklı hava aralığı ve karakteristik empedanslar için eşdeğer empedans grafiği	25
Şekil 4.3 $Z=1 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi	27
Şekil 4.4 $Z=5 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi	27
Şekil 4.5 $Z=10 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi	27
Şekil 4.6 $Z=25 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi	28
Şekil 4.7 $Z=50 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi	28
Şekil 4.8 $Z=100 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi	28
Şekil 4.9 PSIM devre şeması.....	29
Şekil 4.10 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gerilimi...	30
Şekil 4.11 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım	30
Şekil 4.12 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gücü	30
Şekil 4.13 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi	31
Şekil 4.14 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi	31
Şekil 4.15 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gerilimi...	32
Şekil 4.16 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım	32
Şekil 4.17 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gücü	32
Şekil 4.18 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi	33
Şekil 4.19 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi	33

Şekil 4.20 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için giriş ve çıkış gerilimi.	34
Şekil 4.21 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım	34
Şekil 4.22 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için giriş ve çıkış gücü	34
Şekil 4.23 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi.....	35
Şekil 4.24 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi	35
Şekil 4.25 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için giriş ve çıkış gerilimi.	36
Şekil 4.26 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım	36
Şekil 4.27 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için giriş ve çıkış gücü	36
Şekil 4.28 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi.....	37
Şekil 4.29 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi	37
Şekil 4.30 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için giriş ve çıkış gerilimi.	38
Şekil 4.31 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım	38
Şekil 4.32 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için giriş ve çıkış gücü	38
Şekil 4.33 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi.....	39
Şekil 4.34 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi	39
Şekil 4.35 Maxwell Circuit Editor devre çizimi	40
Şekil 4.36 Maxwell 3D ile 1cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler	41
Şekil 4.37 Maxwell 3D ile 1cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu	41
Şekil 4.38 Maxwell 3D ile 15 cm yarıcapında bobinin endüktansı ve 1cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı	41
Şekil 4.39 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi	42
Şekil 4.40 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış akımı.....	42
Şekil 4.41 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gücü.....	42
Şekil 4.42 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi	43
Şekil 4.43 Maxwell 3D ile 5cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler.....	43
Şekil 4.44 Maxwell 3D ile 5cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu	43
Şekil 4.45 Maxwell 3D ile 15 cm yarıcapında bobinin endüktansı ve 5cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı	44
Şekil 4.46 Maxwell 3D 5cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi	44
Şekil 4.47 Maxwell 3D 5cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış akımı.....	44
Şekil 4.48 Maxwell 3D 5cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gücü.....	45
Şekil 4.49 Maxwell 3D 5cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi	45
Şekil 4.50 Maxwell 3D ile 10cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler.....	45

Şekil 4.51 Maxwell 3D ile 10cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu	46
Şekil 4.52 Maxwell 3D ile 15 cm yarıcapında bobinin endüktansı ve 10cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı	46
Şekil 4.53 Maxwell 3D 10cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi	46
Şekil 4.54 Maxwell 3D 10cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış akımı.....	47
Şekil 4.55 Maxwell 3D 10cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gücü.....	47
Şekil 4.56 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi	47
Şekil 4.57 Maxwell 3D ile 15cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler.....	48
Şekil 4.58 Maxwell 3D ile 15cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu	48
Şekil 4.59 Maxwell 3D ile 15 cm yarıcapında bobinin endüktansı ve 15cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı	48
Şekil 4.60 Maxwell 3D 15cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi	49
Şekil 4.61 Maxwell 3D 15cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış akımı.....	49
Şekil 4.62 Maxwell 3D 15cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gücü.....	49
Şekil 4.63 Maxwell 3D 15cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi	50
Şekil 4.64 Maxwell 3D ile 20cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler.....	50
Şekil 4.65 Maxwell 3D ile 20cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu	50
Şekil 4.66 Maxwell 3D ile 15 cm yarıcapında bobinin endüktansı ve 20cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı	51
Şekil 4.67 Maxwell 3D 20cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi	51
Şekil 4.68 Maxwell 3D 20cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış akımı.....	51
Şekil 4.69 Maxwell 3D 20cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gücü.....	52
Şekil 4.70 Maxwell 3D 20cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi	52

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Hava aralığı ve Karakteristik empedansa göre rezonans frekansları.....	26
Çizelge 4.2 $Z=5\Omega$ için farklı hava aralıklarında verimin karşılaştırılması	55

KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİNDE FARKLI HAVA ARALIKLARI VE KARAKTERİSTİK EMPEDANSLARA GÖRE VERİM ANALİZİ

Ali AĞÇAL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU

Kablosuz enerji transferi son yıllarda ilgi çekici bir araştırma konusu haline gelmiş ve birçok araştırmacının farklı yaklaşımlarını ortaya koyduğu bir alan olmuştur. İlk kablosuz enerji transferi çalışmaları Nicola Tesla ile başlamış ve günümüzde yapılan çalışmalarla, kablo ile beslenmesi zahmetli olan uygulamalarda tercih edilebilir hale gelmiştir.

Kablosuz enerji transferinde (KET) ana hedef, magnetik rezonans devresinde kullanılan bobinde enerji depolamak ve bu depolanan enerjiyi devredeki diğer bobine aktarmaktır. Birincil bobinden ikincil bobine etkin bir şekilde enerji iletimi sağlayabilmek için iki önemli koşul sağlanmalıdır. Bunlardan birincisi bobin boyutlarının küçük olması ve enerjinin daha iyi iletilmesini sağlayacak olan yüksek frekans kullanılmasıdır. Diğer ise bobinlerin birbirleriyle uygun bir manyetik bağlantıda olmalarıdır. Magnetik rezonans devresinin, kablosuz enerji transfer sisteminin çalışmasına etkisi devre parametrelerinin yanı sıra iki bobin arası uzaklığa da bağlıdır.

Bu nedenle, bu çalışmada hava aralığı değerlerine ve frekansa bağlı olarak, farklı yük durumlarında sistem davranışları analiz edilmiş, her iki parametre için gerilim ve güç değişimlerine dayanarak sistem verimi incelenmiştir. Farklı hava aralığı ve yük değerlerinde frekansa bağlı olarak akım, gerilim gibi parametrelerin hesabı için; üç farklı simülasyon platformunda sistem benzetim çalışmaları yapılarak gerçekleştirilen analizler, değişik parametreler için denenmiş ve sistem verimleri karşılaştırılmıştır. Enerji transferi yapan bobinler arası uzaklığın optimum büyüklükte tutulması gerektiği ve hava aralığı arttırıldığı sürece enerji aktarım oranı düşeceğinden bu sorunun frekans ve kalite faktörü arasında optimizasyon yapılarak çözülebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz enerji transferi, magnetik kuplaj, magnetik rezonans devresi, karakteristik empedans

**EXAMINATION AND ANALYSIS OF EFFICIENCY FOR AIR GAP AND
CHARACTERISTIC IMPEDANCE IN WIRELESS ENERGY TRANSFER**

Ali AĞÇAL

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nur BEKİROĞLU

Wireless energy transfer has become one of the attractive research topics in recent years and is now one of the fields in which many researchers state their different approaches. The very first energy transfer studies was started by Nicola Tesla and the present day studies make it possible to have applications which are hard to be supplied by cables but by wireless energy as the preferred method.

The main target for wireless energy transfer is to store the energy within a coil in the magnetic resonance circuit and then to transfer this stored energy to another coil in the very same circuit. In order to have the energy transferred from the primary coil to the secondary coil effectively, two conditions have to be fulfilled. The first condition is to have a very compact coil size and utilize high frequency for better energy transmission. The second condition on the other hand is to have good magnetic coupling between the two coils. The effect of magnetic resonance circuit on the wireless energy transfer system is not only affected by the parameters of the system itself but by the distance between the two coils. Therefore in this study, depending on the air gap values as well as the applied frequency, the behavior of the system under various load conditions has been analyzed such that depending on the change of voltage and power for these two parameters and the system efficiency is observed. In order to calculate parameters like current and voltage as a function of frequency at various air gap values and load conditions, analysis depending on different parameters were made by running system simulations on three different simulation platforms and the efficiency values of each system gathered from these simulations have been compared. It was observed that the distance between the coils responsible for energy

transfer should be kept at an optimum value since any increase of the air gap value will degrade the energy transfer ratio. This problem could be solved by optimizing the relation between frequency and quality factor.

Keywords: Wireless energy transfer, magnetic coupling, magnetic resonance circuit, characteristic impedance

GİRİŞ

Enerjinin kablosuz olarak aktarılması 200 yıla aşkın bir süredir üzerinde çalışılan bir konu olmasına rağmen hala hazırda çözümünün elektrik-elektronik mühendisliği kültüründe etkin olarak yaşama geçirilememesi en önemli sorunlardan biridir. Nikola Tesla ile başlayan bu serüven, teknolojinin çok disiplinli bir alan olarak yön almasıyla önemini giderek artırmış, farklı disiplinlerin ortak bir çalışma alanı haline gelmiştir. Dahası ilerde yaşanabilecek muhtemel sorunların çözümü olarak gösterilen elektrikli araçlar, ev elektroniği ve medikal uygulamalar gibi bir takım önerilerin hayata geçirilmesinde kablosuz enerji transferi önemli rol oynamaktadır. İnsanoğlunun bu zorlu olguyla mücadelesi Tesla'nın büyük gayretine rağmen sonuçlanmamış, aradan geçen uzun yıllar nihayetinde ilk somut başarı 2007 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü profesörlerinden oluşan bir takım tarafından elde edilmiştir.

Kablosuz enerji transferi bugüne kadar elektromagnetik radyasyonla, mikrodalgayla, lazerle, elektromagnetik endüksiyonla ve en son elektromagnetik rezonanslı kuplaj ile gerçekleştirilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Aşağıda kablosuz enerji transferi ile ilgili önem arz eden literatür çalışmaları tarih sırasına göre verilmiştir.

İlk kablosuz enerji transferi çalışmaları Nicola Tesla ile elektromagnetik radyasyon üzerine elektrik enerjisini kablosuz olarak tüm dünyaya iletme amacıyla başlamış ancak sponsorların projeden desteğini çekmesi üzerine bu proje tamamlanamamıştır [1-3].

Mikrodalga ile kablosuz enerji transferi fikri, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra yüksek güçlü mikrodalga vericilerinin gelişimiyle ortaya çıkmıştır. Mikrodalga güç transferi öncülerinden William Brown, 1964'te bütün uçuş gücünü mikrodalga ışıklardan alan model helikopter tasarlamıştır [4].

Sahai ve Graham, yüksek mesafelerde düşük verimde çalışan, bir çeşit kablosuz enerji olan lazerle enerji transferini gerçekleştirmişlerdir. Daha çok uzay uygulamalarında uygun olan bu tip enerji aktarımında kullanılan lazer radyasyonu oldukça zararlı olmakla birlikte düşük güçlerde bile insanı kör edebilmekte, yüksek güçlerde canlıları kısmi ısınmayla öldürebilmektedir [5].

Zaho ve arkadaşları, etkin çalışma mesafesi yalnızca birkaç cm olan elektromagnetik endüksiyon teknolojisi üzerine çalışmalar yapmış ve yüksek verimler elde etmiştir. Ancak mesafenin çok yakın oluşu ve bu yakınlıktan dolayı sekonder bobinin primer bobine hizalanmasının zor oluşu bu yöntemin teknolojinin dezavantajlarından [6].

Magnetik rezonanslı kuplaj teorisi, 2007 yılında MIT'den bilim insanlarının kablosuz enerji transferi teknolojisinde devrim yaratan ve adını Witriety koydukları buluşla başlamıştır. Kullandıkları bu magnetik rezonanslı kuplaj teorisiyle, 60 W'lık bir lamba 2 metreden daha uzak bir mesafede, %40 civarında bir verimle kablosuz olarak yakılabilmektedir. Böylece orta mesafe elektrik güç aktarımı gerçekleştirilmiştir. Witriety sisteminde enerji, magnetik rezonanslı kuplaj ile transfer edilir. Primer rezonans bobinindeki enerji, ideal çalışmada sekonder rezonans bobini tarafından tamamen çekilir. Dolayısıyla bu teoride aktarılan enerji, verimli bir şekilde rezonanslı nesneler arasında; ayrıca zayıf şekilde de olsa rezonanslı olmayan nesneler arasında paylaşılabılır [7,8].

Son yıllarda literatürde magnetik endüksiyon teorisine dayanan endüktif güç transferi ile yapılan çalışmalar düşük verimli olması nedeniyle popülerliğini yitirmiş, yerini magnetik rezonanslı kuplaj çalışmalarına bırakmıştır. Aşağıda hem magnetik endüksiyona hem de magnetik rezonanslı kuplaj çalışmalarına ait literatür çalışması ayrı ayrı verilmiştir.

Magnetik İndüksiyona Yönelik Çalışmalara Ait Literatür İncelemesi

Wang ve arkadaşları, primer rezonans frekansını, sekonder rezonans frekansına eşitleyerek, minimum görünen güçte maksimum endüktif güç transferi ile elektrikli araç şarjını gerçekleştirmişlerdir [9].

Thrimawithana ve arkadaşları, primer tarafta gerçekleştirdikleri kontrol tekniği ile primer sargılarda endüklenen gerilimi kontrol edip, primer akımı düzenleyerek endüktif güç transferi sağlamışlardır. Deneysel çalışmada 150W'lık gücü 20kHz frekansta sekonder tarafa aktarıp, alınan sonuçları simülasyon sonuçları ile karşılaştırmışlardır [10].

Low ve arkadaşları, geliştirdikleri yöntemde yüksek verimli endüktif güç transferi sağlamak için sistemin düzlemsel yapıda birden çok alıcıyı desteklemesini ve yükte, boşta ve hata durumlarından en uygun durumun seçilmesini sağlamışlardır. Yüksüz çalışma durumunda, enerji tasarrufu için alıcı yok iken vericinin gücünün düşürülmesini ve herhangi bir iletken ya da magnetik nesne verici bobinin endüktansını etkilediği hata durumunda, vericinin hasar görmemesi için sistemin kendini kapatmasını sağlamışlardır [11].

Neves ve arkadaşları, MATLAB/Simulink ortamında Fiat Seicento model elektrikli araç için magnetik endüksiyon teorisine dayanan endüktif güç transfer sistemi ile kablosuz enerji aktarımını gerçekleştirmişlerdir [12].

Magnetik Rezonanslı Kuplaja Yönelik Çalışmalara Ait Literatür İncelemesi

Kurs ve arkadaşları, iki rezonans bobinini aynı frekansta rezonansa sokarak 60 Watt'lık gücü 2 metre mesafeden %40 verimle transfer etmişlerdir. Magnetik rezonanslı kuplaja ilgili fiziksel sistemin lineer denklemini çıkararak, mesafeye göre verim değişimini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır [7,8].

Sample ve arkadaşları, frekans bölümleri, kritik kuplaj (maksimum mesafe) ve empedans uyumu için magnetik rezonanslı kuplajın analizini yapmışlardır. Diğer sistemlerden farklı olarak alıcı ve verici anteninde tek turluk spiral bobin sarımına ek olarak, bu spiral bobinlerin magnetik alanını kuvvetlendirmek için etrafına çok turluk ucu açık spiral bobinler sarmışlardır. Kablosuz enerji sisteminin eşdeğer devresini çıkarıp, bu eşdeğeri kullanarak verim ifadesini elde etmişler ve verimin, hava aralığı ve frekansa bağlı olarak değişimini çıkarmışlardır [13].

Imura ve arkadaşları, magnetik rezonanslı kuplaj için eşdeğer devre ve Neumann formülünü kullanarak hava aralığı ile verim arasındaki ilişkiyi analiz etmişlerdir. Hava aralığı ve karakteristik empedansın değerine göre; sistemin çift rezonans frekansına veya tek rezonans frekansına sahip olduğunu bir bağıntı ile açıklayarak, karakteristik empedansın verim üzerine etkilerini incelemişlerdir. 49 mm'den 357 mm'ye kadar hava aralığı için 11 MHz ile 17 MHz frekans aralığında sistem verimliliğini karşılaştırmışlardır. Karşıt endüktans, karakteristik endüktans, iç direnç ve rezonans frekansı parametreleriyle çeşitli hava aralıkları optimum karakteristik empedansı ayarlayarak, maksimum verimle çalışmayı sağlamışlardır [14].

Koma ve arkadaşları, verici ve alıcı anten arasında bir aktarıcı anten kullanarak magnetik rezonanslı kuplaj için yeni bir konum algılama sistemi üzerine çalışmışlardır. Alıcının konumuna en yakın bölgedeki vericileri anahtarlayarak, alıcıya en verimli şekilde enerji aktarmayı hedeflemişler, sistemin eşdeğer devresini çıkarıp, toplam empedans denklemini oluşturmuşlardır. Ayrıca seçilen belirli hava aralıkları için; sistemin toplam empedansının frekansa göre değişimi analiz etmişlerdir [15].

Cannon ve arkadaşları, tek bir vericiyle, bir ve birden fazla alıcıya magnetik rezonanslı kuplaj ile güç aktarımı yapmışlardır. Rezonanslı olmayan endüktif kuplajlı bir alıcı devresini, düşük ve yüksek kalite faktörlü rezonanslı kuplaj alıcı devreleri ile karşılaştırmışlardır [16].

Cheon ve arkadaşları, rezonanslı sistemin düğüm denklemlerini magnetik rezonanslı kuplaja göre çıkarmışlardır. Sistemlerini, primer ve sekonder bobinin dışına magnetik alanı kuvvetlendirici sarımlar sararak tasarlamışlar ve yüksek verimli transfer bobinlerinin optimum mesafesini ve optimum kuplaj kat sayılarını hesaplamışlardır. Sistemin frekans karakteristiklerini bulabilmek amacıyla eşdeğer modelin elektriksel tasarımını Advanced Design System programında gerçekleştirmişlerdir [17].

Ho ve arkadaşları, sonlu elamanlar yöntemini kullanarak rezonanslı ve rezonansız magnetik kuplaj sistemlerinin karşılaştırmalarını yapmışlardır. 2 cm ve 5 cm hava aralığı için iki sistemi karşılaştırarak, rezonanslı sistemin üstünlüğü gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır [18].

Kusaka ve arkadaşları, elektrikli araba şarj istasyonları için inverter giriş empedasının magnetik rezonans devresi karakterisik empedansına eşit olduğu bir dönüştürücü tasarlamışlar, akım ve gerilim regülatörleri ile rezonans dönüştürücünün çalışma noktasını sabitlemişlerdir [19].

Nam ve arkadaşları, dual aktif köprülü seri LCLC rezonans dönüştürücü toplojisi kullanarak kuplaj katsayısı düşüşünden ve yük değişiminden etkilenmeden çalışmayı olanaklı hale getirmişlerdir. Bu şekilde elektronik cihaz batarya şarjının daha yüksek verimle kısa zamanda yapabilmesini sağlamışlardır [20].

Zhang ve arkadaşları, magnetik rezonans kuplaj devresi için resonatör yapısı olarak kübik film kullanmışlardır. Kübik film resonatör, iç yüzeydeki bakır tabakaların dış yüzeydeki bakır şeritlerden izolasyon tabakası ile ayrıldığı bir yapıya sahiptir. Rezonans frekansı (FEM) sonlu elemanlar yöntemi ile resonatör devresi parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır. Kübik filmin iç tabakasına ait dielektrik sabitinin rezonans frekansından çok fazla etkilendiğini saptamışlardır. [21].

Phokhaphan ve arkadaşları, alıcı ve verici olarak sistemin baskı devresini kullanan kablosuz enerji transfer sistemini önermişlerdir. Bu sistemde, anten rezonans frekansında çalışan yüksek frekanslı inverter kullanarak 80mm mesafe için %56,7 verim elde etmişlerdir [22].

Christ ve arkadaşları, kablosuz enerji aktarımının insan sağlığı üzerine olan etkilerini incelemişler insan sağlığı için izin verilen maksimum SAR (özellik emilim oranı) değerleri için birkaç metre uzaklıkta, yüksek çözünürlüklü anatomik modellerde ölçümler yapmışlar ve 8 MHz'de ve 10 mm mesafede maksimum etkiye maruz kalındığı sonucuna ulaşmışlardır [23].

Like ve arkadaşları, kablosuz enerji transferi için optimum bobin tasarımı üzerine çalışmışlar ve direnç ile sarım sayısının iletim verimi üzerindeki etkilerinin çok fazla olduğunu, ancak bobinin kendi çevresindeki tur sayısının verim üzerine etkisinin olmadığını bildirmişlerdir [24].

Dukju ve arkadaşları, tek bir taraftaki resonatör için iki kuplaj kullanmışlar ve bu kuplajları yüksek kalite faktörüne sahip olacak şekilde oluşturmuşlardır. Bu şekilde ek olarak eklenen kuplaja ait ikincil bobindeki ek endüktans da resonatörün yapısına dahil

olduğundan yeni bir enerji aktarım yolu oluşturulmuştur. Önerilen bu teknikle 17,2 W'lık güç %65,2 verim ile aktarılmıştır [25].

1.2 Tezin Amacı

Kablosuz enerji transferi son yıllarda çok önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Günümüzde ileri teknoloji başlıkları, kablosuz enerji aktarımına yönelmeyi zorunlu kılmıştır. Kablosuz enerji transferinde ana hedef, optimum frekans aralığında, yüksek verim ile uygun mesafe kat ederek enerjiyi aktarmaktır. Bunun için literatürde başlıca yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları günümüzde düşük verimliliklerinden dolayı uygulanmaz iken bir kısmı telekomünikasyon teknolojisine daha uygun, bir kısmı ise çok yüksek frekans bandında çalışmaktadır. Bunlar arasında magnetik rezonanslı kuplaj yöntemi elektrik mühendisliği uygulamaları için en elverişli ve uygun olanıdır. Bu tez çalışmasında, magnetik rezonanslı kuplaj yöntemi kullanılarak kablosuz enerji transferine ait benzetim çalışmaları yapılmış ve farklı simulasyon platformlarının farklı yetkin özellikleri kullanılarak KET sistemi oluşturulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada hava aralığı değerlerine ve frekansa bağlı olarak, farklı yük durumlarında sistem davranışları analiz edilmiş, her iki parametre için gerilim ve güç değişimlerine dayanarak sistem verimi incelenmiştir. Farklı hava aralığı ve yük değerlerinde frekansa bağlı olarak akım, gerilim gibi parametrelerin hesabı için; üç farklı simülasyon platformunda sistem benzetim çalışmaları yapılarak gerçekleştirilen analizler, değişik parametreler için denenmiş ve sistem verimleri karşılaştırılmıştır. Enerji transferi yapan bobinler arası uzaklığın optimum büyüklükte tutulması gerektiği ve hava aralığı arttırıldığı sürece enerji aktarım oranı düşeceğinden bu sorunun frekans ve kalite faktörü arasında optimizasyon yapılarak çözülebileceği görülmüştür.

1.3 Orijinal katkı

Bu çalışmada magnetik rezonanslı kuplaj devresine ait birbirine bağlı parametrelerin farklı konfigürasyonlarda oluşturulması ve hesaplanması gerçekleştirilmiştir. 1cm ile 20 cm hava aralığı için farklı karakteristik empedanslarda KET sistemi incelenmiştir. KET sisteminde kullanılan parametrelerden rezonans frekansına ait hesaplar; eşdeğer devre çözümleri ile elde edilen verim denklemi kullanılarak MATLAB platformunda, gerçek

zamanlı verilere bağı kalmak adına bobin endüktansları ve karşıt endüktanslar ise FEM analizi yapılarak Maxwell platformunda ve sistemin elektriksel devresine ait benzetimler de PSIM platformunda gerçekleştirilmiştir. Maksimum verim ile hava aralığı arasındaki ilişkinin denklemler, manyetik rezonans kuplaj eşdeğer deversi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu denklemler ile çeşitli hava aralıklarında ve farklı karakteristik empedanslarda, her koşul için maksimum verimi sağlayan rezonans frekansları belirlenmiş ve yüksek verimli kablosuz enerji aktarımı sağlanmıştır. Hava aralığının ve karakteristik empedansın verime etkileri gözlemlenmiştir.

Bu çalışma sayesinde KET sistemleri için rezonans frekansın saptanmasının önemi görülmüş ve diğer frekanslardaki verimin değişimi gözlemlenmiştir. KET sistemleri için frekans kontrolünün gerekliliği gösterilmiştir. İlerki çalışmalara yönelik KET sistemleri için değişken hava aralığı ve değişken karakteristik empedansa için bu rezonans frekansını yakalanılarak oldukça verimli sistemler olduğu anlaşılmıştır.

KABLOSUZ ENERJİ AKTARIMI SİSTEMLERİ

Kablosuz enerji transferi konusundaki ilerlemelerin günümüzde geldiği noktaya bakıldığında, fiziğin aynı prensiplerini kullanan farklı yaklaşımlar ve teorileri ile geliştirilmiş olduğu görülmektedir. Bugüne kadar kablosuz enerji aktarımı; elektromagnetik radyasyonla, mikrodalgayla, lazerle, elektromagnetik endüksiyonla ve en son elektromagnetik rezonanslı kuplaj prensipleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu prensipler aşağıda kısa açıklanmıştır.

2.1 Elektromagnetik Radyasyon Güç Aktarım Sistemi:

James Maxwell tarafından ilk olarak modellenen elektromagnetik radyasyon Tesla'nın elektromekanik osilatörleri kullanarak, yayılan enerji nedeniyle osilatörlerin yakınındaki vakum tüplerine zarar vermesi sonucu fiziksel olarak gözlemlenmiş ve Tesla tarafından bir iletken üzerindeki gerilimi değil boşluk ve madde üzerinden enerjinin hareketi olarak tanımlanmıştır (Tesla etkisi) [26]. Bu enerjinin oluşturulması için tasarlanan Tesla bobini; yüksek gerilim ve yüksek frekanslı akım kaynağıdır. Düşük gerilim kaynağını yüksek gerilim kaynağına dönüştürmek için, bir indüksiyon bobini kullanılır. Indüksiyon bobininin ikincil sarım uçları (yüksek gerilimin uçları), bir kıvılcım aralığına bağlanır. Devre, Tesla bobininin birincil sarımı ve kondansatör üstünden tamamlanır. Birincil sarım magnetik olmayan bir çekirdek üstüne sarılı birkaç sargıdan oluşur ve çok sargılı olan ikincil sarımdan ya hava boşluğuyla ya da yağla ayrılır. Birincil sarımdaki gerilim, tıpkı indüksiyon bobinindekine benzer bir süreçle artarak, ikincil sarımdan çıkar. Birincil devrede bulunan kıvılcımaralığı, akımın birincil bobinde birkaç milyon hertzlik bir salınımla titreşmesine neden olur. Titreşimin etkisiyle ikincil uçlardan, hem yüksek gerilim hem de yüksek frekans elde edilir. Aygıt genellikle deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Ancak, boş ve büyük bir alan içerisinde boşa kaybedilen büyük miktarda enerji nedeniyle, çok yönlü bir şekilde enerjiyi yaymanın pratik olmadığı sonucuna varılmış daha verimli farklı yöntemler denenmiştir.

2.2 Mikrodalga Güç Aktarım Sistemi

Elektromagnetik radyasyon fikrinin ardından yüksek güçlü mikrodalga vericilerinin gelişimi ile kablosuz güç aktarımı için mikrodalga kullanma fikri araştırılmıştır. Mikrodalga güç aktarımında en önemli avantaj yüksek verimdir. Temel bileşenler mikrodalga generatörü gönderici anten, alıcı antenden oluşmaktadır. Mikrodalga generatörde mikrodalga vakum tübü (magnetron) en fazla kullanılan biçimdir. Mikrodalga iletiminde kullanılan frekanslar oldukça yüksek olup 2,45 GHz ve 5,8 GHz değerlerinde olabilir. En yüksek verimin alındığı frekansı 2,45 GHz olarak sağlanmıştır. Genelde slot yapılı dalga yönlendirmeli antenler gönderici anten olarak, dipol anten yapısı ise alıcı anten olarak kullanılmaktadır. Mikrodalga güç aktarımı uzak mesafeler için uygun olup, telekomünikasyon sistemleri ve solar uydu sistemlerinde kullanılmaktadır.

2.3 Lazerle Güç Işınlama Sistemi

Elektromagnetik radyasyonun spektrumun görünür bölgesine yaklaşması durumunda, lazer ışınlarını güneş pili alıcısına yöneltip elektriğe çevirme yoluyla güç taşınabilmektedir [5]. Bu mekanizma genellikle güç ışınlama olarak da bilinir çünkü güç bir alıcıda ışının elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle kullanılabilir. Diğer kablosuz yöntemlerle kıyaslandığında lazer tabanlı enerji transferinin avantajları;

- Hizalanan tek renkli wavefront yayılımı, kesit alanı dar bir ışının uzun mesafelere enerji transferi için olanak sağlaması
- Kat hal lazerlerinde, fotovoltaiik yarı iletken diyotlarının boyutlarının küçük olması ve kolaylıkla ürünlerin içine sığması
- Erişim kontrolü, yalnız lazer tarafından aydınlatılan alıcılarından güç alabilmesi
- Cep telefonları gibi radyo haberleşmesi yapan cihazlara radyo frekansı parazitine neden olması

Dezavantajları;

- Lazer radyasyonu zararlıdır. Düşük güç seviyelerinde bile insanları ve hayvanları kör edebilir. Ayrıca yüksek güç seviyelerinde canlıları kısmı bir noktada ısınmadan dolayı tehlikeli olması

- Fotovoltaik hücreler kullanıldığından %40-%50 verim elde edilmektedir.
- Sis, yağmur... vb. sorunlar tarafından oluşan atmosferik emilim, saçılma ve soğurulma kayıpları verimi %0'a kadar düşürebilir.

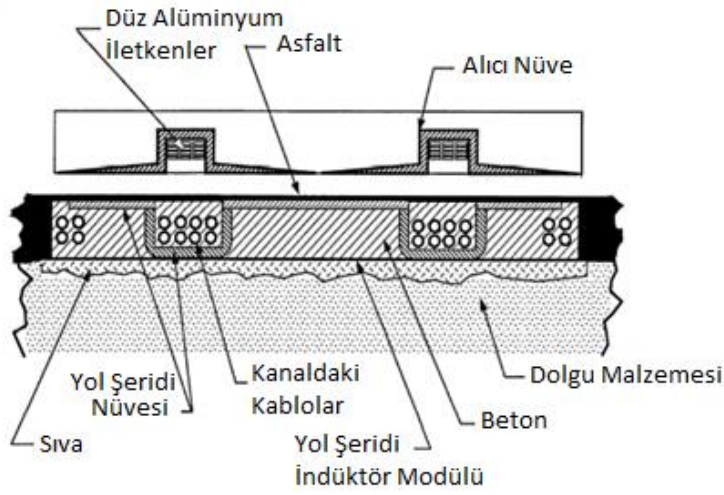
2.4 Endüktif Kuplaj Güç Aktarım Sistemi

İki iletkenin karşıt endüktans bağlantısıyla veya magnetik kuplajla, bir iletkeniden geçen akımın başka bir iletkenide elektromagnetik endüksiyon ile gerilim endüklemesine endüktif kuplaj adı verilir. İki iletken arasındaki endüktif kuplaj değeri, iletkenlerin karşıt endüktansı ile ölçülür.

İki kablo arasındaki kuplajın arttırılması, sargıların aynı eksene ve yakın olarak yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Böylece bir bobinin magnetik alanı diğer bobine geçer. İki bobin fiziksel olarak, transformatörün primer ve sekonder tarafı gibi tek bir bütün ya da ayırık halde bulunabilir. Kuplaj istemli veya istemsiz gerçekleşebilir. İstemsiz kuplaj, cızırtı da denilen elektromagnetik parazitlerden oluşur. Endüktif kuplaj düşük frekanslı enerji kaynaklarını tutar. Endüktif kuplaj verici, elektronik verileri taşıyan bir mikroçip ve anten işlevi olan büyük bir bobin içerir. Endüktif kuplaj vericileri hemen hemen her zaman pasif olarak çalıştırılır. Yüksek frekans enerji kaynaklarında genellikle kapasitif kuplaj kullanılır.

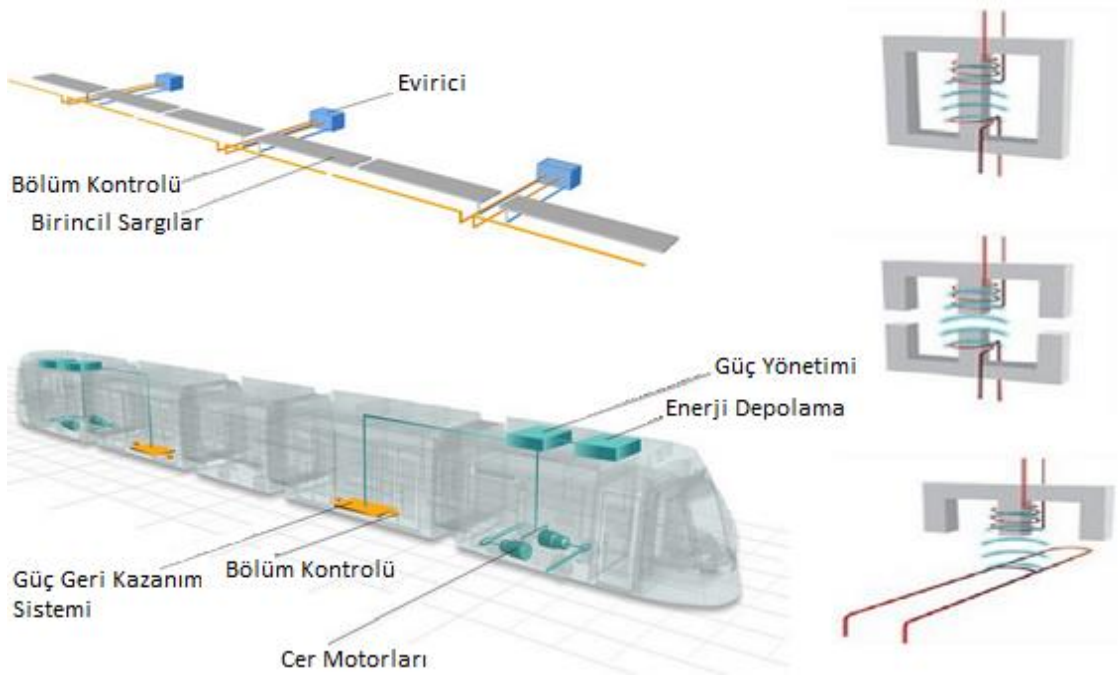
Endüktif şarjda iki nesne arasında enerji transferi elektromagnetik alanla sağlanır. Bu işlem genellikle şarj istasyonuyla veya yola döşenmiş verici hatla yapılır. Enerji elektrikli cihaza endüktif kuplaj ile aktarılır ve bu enerji bataryaları şarj etmekte yada cihazı çalıştırmakta kullanılır.

Endüktif şarjın elektrikli araçlar için ilk çalışmaları "Elektrikli Araç Takipli 3 Faz Enerjili Karayolu Yapımı Ve Testi Projesi" ile 1994 yılında California Üniversitesi'nden araştırmacılar tarafından 7,6 cm hava aralığında %60 verimle yapılmıştır [27].



Şekil 2.1 Elektrikli araç takipli 3 faz enerjili karayolu yapımı projesi

Endüktif güç transferi prensibine dayanılarak, aracın altındaki yüklü alıcıyla yer altına gömülü verici bileşenler arasında kablosuz iletimi sağlayan bir sistem de Almanya'da tren yolu için tasarlanmıştır. Bu çalışmada 3 fazlı güç aktarımı ile 6,5 cm hava aralığında %92 verime ulaşılmıştır [28].



Şekil 2.2 Almanya Bombardier şirketinin endüktif güç transferi ile çalışan treni

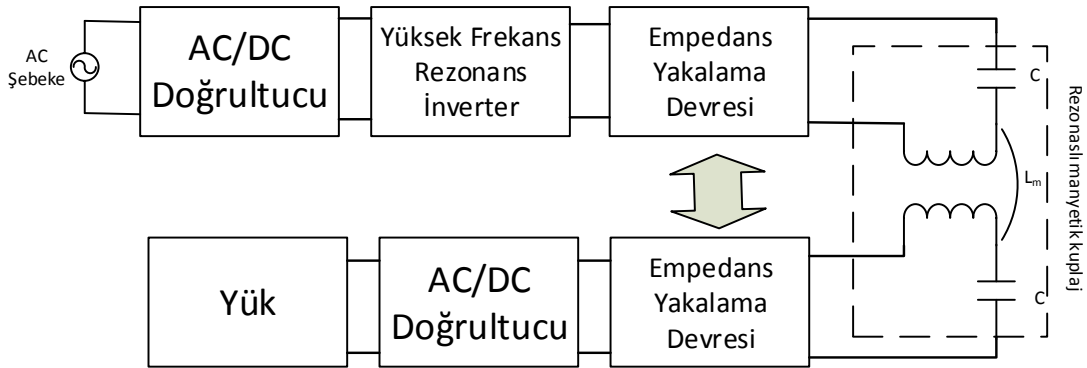
2.5 Magnetik Rezonanslı Kuplaj

Magnetik rezonanslı kuplaj teorisi, 2007 yılında MIT’den bilim insanlarının kablosuz enerji transferi teknolojisinde devrim yaratan ve adını Witricity koydukları buluşla başlamıştır. Kullandıkları bu magnetik rezonanslı kuplaj teorisiyle, 60 W’lık bir lamba 2 metreden daha uzak bir mesafede, %40 civarında bir verimle kablosuz olarak yakılabilmektedir. Dolayısıyla orta mesafe elektrik güç aktarımını gerçekleştirilmiştir. Witricity sisteminde enerji, magnetik rezonanslı kuplaj ile transfer edilir. Birincil rezonans bobinindeki enerji ideal çalışmada sekonder rezonans bobini tarafından tamamen çekilir. Dolayısıyla bu teoride aktarılan enerji verimli bir şekilde rezonanslı nesneler arasında, ayrıca zayıf şekilde de olsa rezonanslı olmayan nesneler arasında paylaşılır.

Yüksek kalite faktörlü rezonatörler ile düşük kuplaj oranlarında verimli enerji aktarımını sağlanabilir. Bu yolla uzak mesafelerde daha serbest konumlu çalışabilme mümkün hale gelir. Bu çalışma türüne yüksek rezonanslı güç akarımı (HR-WPT) denir [7,8,29,30,31]. Bazı örneklerde, bu teknoloji magnetik rezonans olarak da adlandırılır. Uzak mesafelerde endüksiyona göre verimi oldukça yüksektir.

2.5.1 Sistemin Açıklaması

Wattlardan kilowatlara kadar güç seviyelerinde uygulama alanına sahip olan kablosuz enerji aktarım sisteminin yüksek magnetik rezonans sistemi temel alınmış genel blok diyagramı Şekil 2.3’teki gibidir.

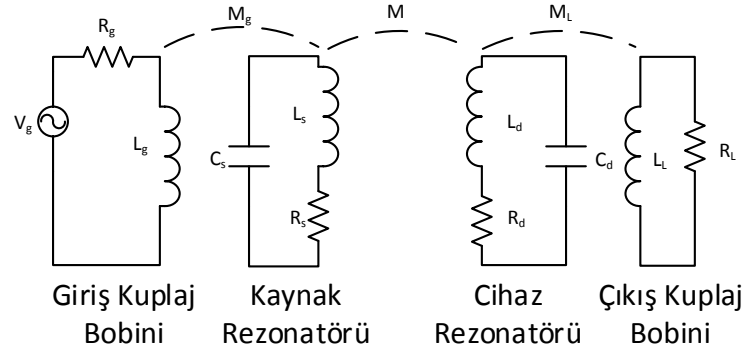


Şekil 2.3 Kablosuz enerji aktarımı blok diyagramı

Diyagram, en üst satırdan başlayarak soldan sağa doğru ilerlemektedir. Sistemin giriş gücü genellikle AC kaynak, AC/DC doğrultucu blok ile doğrultularak sağlanır yada DC gerilim direkt bataryadan veya başka bir DC kaynaktan verilerek sağlanır. Yüksek güçlü uygulamalarda güç faktörü düzeltme aşaması da bu blok içine dahil edilebilir. Yüksek verimli anahtarlama dönüştürücüler DC gerilim radyo frekansında (RF) gerilim dalgasına dönüştürülür. Bu gerilim dalgası kaynak rezonatörünü sürmekte kullanılır. Çeviricinin çıkışıyla kaynak rezonatörünün etkin bir çift oluşturması için, genellikle empedans yakalama bağlantısı kullanılır. Bu bağlantı anahtarlama dönüştürücünün verimli çalışmasını sağlar. Genellikle en yüksek verim için endüktif yük empedansı gerektirir. Empedans yakalama bağlantısı; kaynak rezonatörünün empedansını, buna kuplaj ile etki eden cihaz rezonatörünün ve çıkış yükünün empedansını kaynak çeviricisine uygun bir empedansa dönüştürmeyi sağlar. Kaynak rezonatörü tarafından üretilen magnetik alan cihaz rezonatörü ve verici rezonatör çifti içinde enerji birikmesine neden olur. Bu enerji cihazın rezonatörüne bağlandığında bunu amaca uygun işi yapmak için doğrudan bir yüke güç olarak verebilir veya batarya şarjında kullanılabilir. Burada ikinci empedans yakalama bağlantısı rezonatörden yüke verimli bir enerji bağlantısı için kullanılabilir. Asıl yük empedansını optimum verim için yüklenmeyi daha yakın eşleştiren cihaz rezonatörü tarafından görülen efektif yük empedansına çevirebilir. DC gerilim gerektiren yükler için doğrultucu, alınan AC gücü tekrar DC güce çevirir.

MIT de yapılan ilk çalışmalarda, empedans eşleşimi endüktif kuplaj yöntemiyle kaynak rezonatörü ve cihaz rezonatörü için gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda, giriş kuplajının ayarlanması; giriş empedansı, kaynağın giriş kuplaj bobini ve kaynak rezonatörleri arasındaki hiza ayarlanarak sağlanır. Aynı şekilde çıkış kuplajının ayarlanması; çıkış empedansı, cihaz çıkış kuplaj bobini ve cihaz rezonatörleri arasındaki hizalanma ayarlanarak sağlanır. Kuplaj değerlerinin uygun bir şekilde ayarlanmasıyla, olası optimum verimle enerji aktarımını başarmak mümkün olur. Endüktif kuplaj yaklaşımının empedans birleşimi şematik olarak Şekil 2.4 ile gösterilmiştir. Bu devrede M_g , kaynağın çıkış direnciyle kaynak rezonatörünün uygun bir şekilde yüklemesiyle ayarlanır. Cihaz rezonatörü, yükün karşıt kuplajlanması olan M_L 'nin ayarlanmasıyla benzer bir şekilde yüklenir. Kuplaj bobinlerinin reaktanslarının kaynak ve yük dirençlerinden az olmadığı

durumda, giriş ve çıkış kuplaj bobinlerinin verimini geliştirmek için kapasitör serilerine de ihtiyaç olabilir.



Şekil 2.4 Giriş ve çıkış rezonatörlü endüktif kuplajın şematik tasarımı

Aynı zamanda çeşitli empedans yakalama bağlantıları kaynağın ve yükün kendi rezonatörlerine direkt olarak bağlanabilir. Bunlar genellikle “T” ve/veya “Π” biçimlerinde ayarlanmış bileşenleri (kondansatör ve endüktans) içermektedir. Bu bileşenlerin değerleri belirli bir kaynak-cihaz kuplajlaması ve yük durumunda (sabit ayarlı empedans eşleştirmesi) optimum verimi elde etmek veya belirli bir sıra üzerindeki kaynak-cihaz pozisyonlarından ve yük durumundan daha çok enerji elde etmek için ayarlanabilir (ayarlanabilir empedans eşleştirmesi). Hangi yaklaşımın performans ve maliyet açısından daha uygun olduğuna ise uygulamanın gereksinimlerine göre karar verilir.

Mobil elektronik cihazlarda, alan son derece önemlidir. Bu yüzden rezonatör bileşenleri, bu alan kısıtlamalarını karşılamak için sistemin veriminde ve rezonatör boyutunda genellikle bazı kısıtlamalara yol açar. Ayrıca, bu uygulama kullanım durumuna göre kaynak ve cihaz arasında geniş aralığa sahip magnetik kublaji içerebilir. Bu durum ise empedans yakalama bağlantısının tasarımı için zorluk oluşturabilir. Ancak bu tarz düşük güçlü uygulamalarda, bobinden bobine verim %90 ve üzerinde, uçtan uca verim de %80'den fazla olarak sağlanabilmektedir.

2.5.2 Teknoloji uygulamaları ve avantajları

Yüksek rezonanslı güç aktarım sisteminin avantajları aşağıda sıralanmıştır;

- Bir güç kablosu ya da batarya değiştirme ihtiyacını ortadan kaldırarak, cihazları daha kullanışlı ve alıcıya daha cazip hale getirir.

- Kabloları ve bağlayıcıları ortadan kaldırarak cihazları daha güvenilir hale getirir.
- Tek kullanımlık batarya ihtiyacını ortadan kaldırdığı için bu cihazlar daha çevre dostudur. Şebeke gücünü kullanmak, geleneksel elektrokimyasal temel alınarak üretilen, taşınan ve kullanılan bataryalara göre daha ucuz ve daha çevrecidir.
- Kıvılcım tehlikesine sahip iletken bağlantılarını ortadan kaldırarak cihazı güvenli hale getirir. İletken başlıklarını ve kabloları ortadan kaldırdığı için çatı, duvar ya da diğer engellerin üzerinden takılmadan kolayca çalışır. Cihazlar su geçirmez ve patlamaya dayanıklıdır.
- Tek bir kaynak rezonatörden birden çok güçlü cihazların yararlanabilme yeteneğinden dolayı sistem maliyeti azdır.

Yüksek rezonans kablosuz güç aktarımı temel alınarak, mesafe aralığı ve güç seviyesi ölçeğinin yüksek seviyeli olduğu çözümleri çok çeşitli yapılandırmalara olanak sağlar. 1W'tan daha düşük, kablosuz sensör ve elektronik cihazlar için çok düşük güç seviyelerinde ayrıca 3 kilowatt'tan daha yüksek endüstriyel sistemler ve elektrikli araçlar için yüksek güç seviyelerine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Buna ek olarak, bu sistemler cihaza iki ayrı şekilde uygulanabilir.

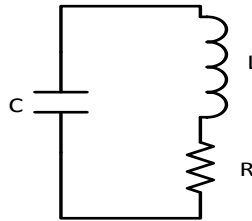
- Direkt kablosuz güç vererek; bu çalışmada yakalanan enerji doğrudan bir yüke (örn. led ışık) bağlanarak ya da var olan herhangi bir batarya veya enerji depolayan cihaza bağlanmadan yedek güç vererek sağlanır.
- Kablosuz şarj ederek, alınan enerjiyle batarya veya süper kapasitör şarj edilir.

Yüksek rezonans kablosuz güç aktarımı sistemlerinin geleneksel magnetik endüksiyonla karşılaştırıldığında 4 önemli fonksiyonel faydası vardır. Birincisi, kaynak ve cihazın çalışmasında göreceli uyum sağlama esnekliğidir. Bu esneklik uygulama alanını açarak; sistemi daha kolay ve daha rahat kullanılabilir hale getirir. İkincisi, tek bir kaynak kullanılarak birden fazla cihaza enerji aktarımı cihazlar farklı güç gereksinimlerine sahip olsa bile sağlanabilir. Örneğin, ailenizin her cep telefonu için ayrı bir şarj yerine, bir kerede hepsini ele alan bir şarj yüzeyi olabilir. Üçüncü faydası, düşük magnetik kublaj değerlerinde çalışabildiği için kaynak ve cihaz rezonatörlerinin boyutları aynı olmak zorunda değildir. Son faydası ise, verimli enerji aktarımı için mesafe aralığı, kaynak ve cihaz aralarına rezonans tekrarlayıcılar konularak önemli ölçüde artırılabilir.

MANYETİK REZONANS DEVRESİ

Rezonans doğada çok farklı biçimlerde görülen bir olgudur. Genel olarak, rezonans iki farklı mod arasında enerjinin salınmasıdır. Örneğin mekanik sarkaçlardaki potansiyel ve kinetik formların arasında enerjinin salınımı gerçekleşir. Sistem rezonanstayken, sadece düşük bir uyartım sistemiyle büyük bir enerjinin depo edilmesi mümkündür. Eğer sistemin enerji alma hızı oranı sistemin enerji kayıpları oranından büyük ise enerji birikmesi oluşur.

Bir bobin, bir kondansatör ve bir direnç içeren bir elektromagnetik rezonatör örneği devresi Şekil 3.1 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Rezonatör örneği

Bu devrede, enerji bobin (magnetik alanda enerji depo eder) ve kondansatör (elektrik alanında enerji depo eder) arasında rezonans frekansında salınır ve dirençte harcanır. Rezonatörün rezonans frekansı ve kalite faktörü;

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

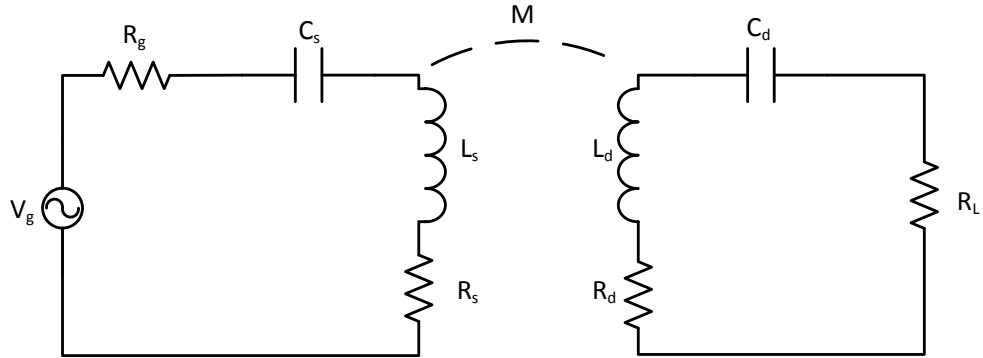
$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanır. (3.1) ifadesinden, devredeki kaybın azaltılması yani R 'nin azalması halinde sistemin kalite faktörünün arttığı görülmektedir.

Yüksek rezonans kablosuz güç aktarımı sistemlerinde, sistemin verimli enerji aktarması için rezonatör yüksek kalite faktörüne sahip olmalıdır. Yüksek kalite faktörlü elektromagnetik rezonatörler genellikle düşük soğurucu kayıpları ve düşük ısıma kayıpları olan iletkenlerden ve bileşenlerden yapılırlar. Ayrıca rezonans frekansı aralığı dardır. Aynı zamanda, rezonatörler yabancı nesneler ile etkileşimlerini azaltmak için de tasarlanabilir.

Eğer iki rezonatörden biri diğerine yakın yerleştirilirse, rezonatörlerin aralarında bir bağlantı olur ve rezonatörler için enerji alışverişi mümkün olur. Enerji alışverişinin verimi, her rezonatöre ve bunların arasındaki kuplaj oranı k 'ya göre değişir. İki rezonatörlü sistemin dinamikleri kuplaj mod teorisiyle veya rezonatörlerin bağlantı sisteminin eşdeğer devresinin analizinden tanımlanabilir.

Kuplajlı rezonatörler için eşdeğer devre seri rezonans devresi yapısında Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Bağlantılı rezonatör sisteminin eşdeğer devresi

Burada kaynak R_g iç dirençli, ω frekansında, V_g genlikli sinüsoidal gerilim kaynağıdır. Kaynak ve cihaz rezonatör bobinleri L_s ve L_d , karşılıklı endüktans M ($M = k\sqrt{L_s L_d}$) ile gösterilir. Bir rezonatör oluşturmak için her bir bobine seri bir kapasitör vardır. R_s ve R_d dirençleri, her bir rezonatör için bobinlerin ve rezonans kondansatörlerinin istenmeyen (omik ve ısıtım kayıplarını içeren) dirençleridir. Yük AC direnç R_L ile gösterilir.

Bu devrenin verimi, kaynak ve cihaz rezonanstayken yük direncine gönderilen gücün kaynaktaki maksimum mevcut güce oranı ile bulunur.

$$\frac{P_L}{P_{g,max}} = \frac{4U^2 \frac{R_g R_L}{R_s R_d}}{\left[\left(1 + \frac{R_g}{R_s}\right) \left(1 + \frac{R_L}{R_d}\right) + U^2 \right]^2} \quad (3.3)$$

$$U = \frac{\omega M}{\sqrt{R_s R_d}} = k \sqrt{Q_s Q_d} \quad (3.4)$$

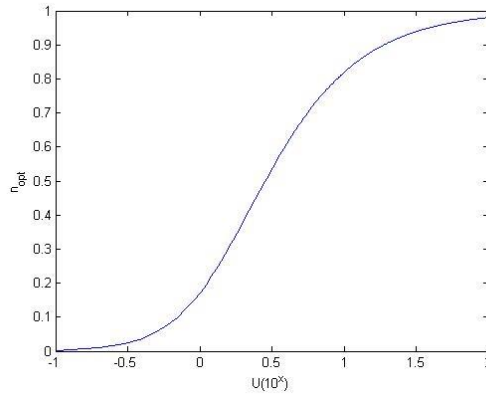
En iyi sistem performansı sağlamak için yük ve kaynak dirençleri uygun seçilebilir ya da empedans dönüşüm bağlantısı kullanılarak diğer direnç değerleri yakalanabilir. Eğer dirençler denklem (3.5)'teki gibi seçilirse,

$$\frac{R_g}{R_s} = \frac{R_L}{R_d} = \sqrt{1 + U^2} \quad (3.5)$$

güç aktarımı verimi denklem (3.6) gibi olur.

$$\eta_{opt} = \frac{U^2}{(1 + \sqrt{1 + U^2})^2} \quad (3.6)$$

Güç aktarımı veriminin maksimum değeri denklem (3.6) kullanılarak, Şekil 3.3'deki (şekilin MATLAB kodları EK-A içinde verilmiştir) gibi çizilebilir.



Şekil 3.3 U fonksiyonuna bağlı enerji aktarımının optimum verimi grafiği

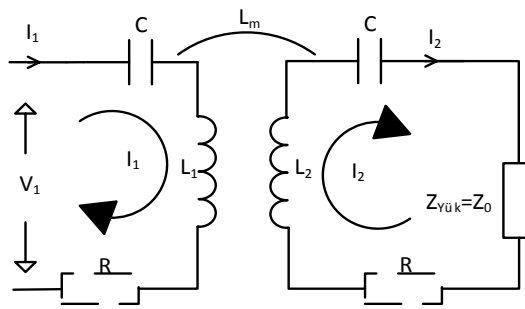
Burada U değerleri büyük olan sistemlerde yüksek verimle enerji aktarımının mümkün olduğu görülmektedir. Mümkün olan en iyi kablosuz enerji aktarımı sistemi verimi, sistemin performansını belirleyen faktörler olan; rezonatörler arasındaki magnetik kuplaj katsayısı k ve yüksüz rezonatörlerin kalite faktörüne Q_s (kaynak) ve Q_d (cihaz) bağlıdır.

Belirli uygulamalar için rezonatörün kalite faktörleri ve rezonatörler arasındaki magnetik kuplaj aralığı sistem için mümkün olan en iyi verimi belirlemek adına denklem (3.4) kullanılabilir.

Kablosuz güç aktarımında denklem (3.4)'den de görüldüğü gibi bağlantı faktörü ve kalite faktörünün önemi büyüktür. Magnetik kuplaj katsayısı, cihaz ve kaynak rezonatörleri arasındaki magnetik akı bağlantısını temsil eden birimsiz bir parametredir ve 0 (bağlantısız) ile 1 (tam akı bağlantılı) arasında değere sahiptir. Geleneksel endüksiyon tabanlı kablosuz güç aktarımı sistemleri (elektrikli diş fırçası gibi) yüksek kuplaj değerinde, yakın mesafede, kaynak ile cihaz hizalı olarak tasarlanır. Denklem (3.4) göstermiştir ki, yüksek kaliteli rezonatör kullanmak geleneksel endüksiyon sistemlere göre daha verimlidir. Daha da önemlisi düşük kuplaj değerlerinde verimli çalışma mümkün hale gelir. Ayrıca bu sebepten ötürü kaynak ve cihaz arasında kesin bir konumlandırma ihtiyacı ortan kalkar ve daha büyük bir hareket özgürlüğü sağlar. Yalnız yüksek kalite faktörünün en büyük dezavantajı ise devredeki kondansatör uç gerilimini çok yükseltmesidir. Kondansatör geriliminin tepe değeri ile kalite faktörü arasındaki ilişki denklem (3.7)'de gösterilmiştir [32].

$$V_{Ctepe} = Q \frac{2V_s}{\pi} \quad (3.7)$$

3.1 Kullanılan Magnetik Kuplaj Devresi



Şekil 3.4 Magnetik kuplaj devresi

$$V_1 = I_1 \cdot \left(R + jL_1\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) \right) - I_2 \cdot (jL_m\omega) \quad (3.8)$$

$$0 = I_2 \cdot \left(jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R \right) - I_1 \cdot (jL_m\omega) \quad (3.9)$$

$$I_2 \cdot \left(jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R \right) = I_1 \cdot (jL_m\omega) \quad (3.10)$$

$$I_2 = I_1 \left(\frac{jL_m\omega}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R} \right) \quad (3.11)$$

$$V_1 = I_1 \cdot \left(R + jL_1\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) \right) - I_1 \left(\frac{jL_m\omega}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R} \right) (jL_m\omega) \quad (3.12)$$

$$V_1 = I_1 \cdot \left[\left(R + jL_1\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) \right) - \left(\frac{j^2 L_m^2 \omega^2}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R} \right) \right] \quad (3.13)$$

$$Z_{E\mathfrak{S}} = Z_{Giri\mathfrak{S}} = R + jL_1\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + \left(\frac{L_m^2 \omega^2}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R} \right) \quad (3.14)$$

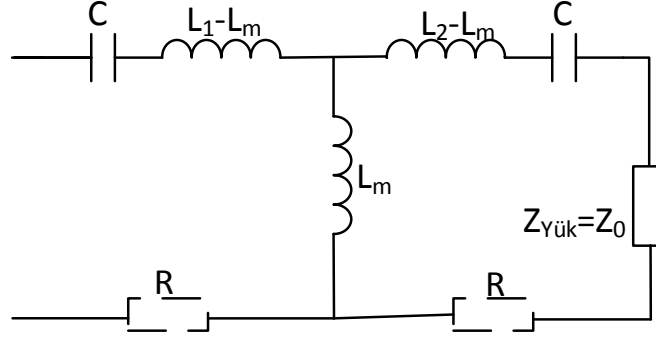
$$Z_{E\mathfrak{S}} = R + jL_1\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + \left(\frac{L_m^2 \omega^2}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R} \right) + jL_m\omega - jL_m\omega \quad (3.15)$$

$$Z_{E\mathfrak{S}} = R + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + j(L_1 - L_m)\omega + \frac{-j^2 L_m^2 \omega^2 + j^2 L_m L_2 \omega^2 + jL_m\omega(Z_0 + R) + jL_m \left(\frac{1}{j\omega C} \right) \omega}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R} \quad (3.16)$$

$$Z_{E\mathfrak{S}} = R + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + j(L_1 - L_m)\omega + \frac{(jL_m\omega)(j(L_2 - L_m)\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R)}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R} \quad (3.17)$$

$$Z_{E\mathfrak{S}} = R + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + j(L_1 - L_m)\omega + \frac{1}{\frac{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R + jL_m\omega - jL_m\omega}{(jL_m\omega)(j(L_2 - L_m)\omega + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + Z_0 + R)}} \quad (3.18)$$

$$Z_{E\mathfrak{S}} = R + \left(\frac{1}{j\omega C} \right) + j(L_1 - L_m)\omega + \frac{1}{\frac{1}{jL_m\omega} + \frac{1}{j(L_2 - L_m)\omega + (1/j\omega C) + Z_0 + R}} \quad (3.19)$$



Şekil 3.5 Magnetik kuplaj eşdeğer devresi

3.2 Verim Denklemi

$$\eta = \frac{P_{Çıkış}}{P_{Giriş}} = \frac{I_{Çıkış}^2 * Z_{Çıkış}}{I_{Giriş}^2 * Z_{Giriş}} \quad (3.20)$$

Denklem (3.11)'den yararlanılarak;

$$\frac{I_{Çıkış}}{I_{Giriş}} = \frac{jL_m\omega}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C}\right) + Z_0 + R} \quad (3.21)$$

yazılır. Denklem (3.21) ve (3.14), denklem (3.20)'e yerleştirildiğinde;

$$\eta = \left(\frac{jL_m\omega}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C}\right) + Z_0 + R} \right)^2 * \frac{Z_0}{\left(R + jL_1\omega + \left(\frac{1}{j\omega C}\right) + \left(\frac{L_m^2\omega^2}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C}\right) + Z_0 + R} \right) \right)} \quad (3.22)$$

elde edilir. Denklem (3.23) maksimum verim için L_m karşıt endüktans, L alıcı ve verici endüktans, Z_0 karakteristik empedans ve R iç direnç koşullarını tanımlar. Denklem (3.24) koşulunda sistem çift rezonans frekansına sahiptir. Denklem (3.25) koşulunda ise sistem düşük bir verimle tek rezonans frekansına sahiptir[14].

$$L_m^2 = \frac{Z_0^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (3.23)$$

$$L_m^2 > \frac{Z_0^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (3.24)$$

$$L_m^2 < \frac{Z_0^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (3.25)$$

SİMÜLASYON SONUÇLARI

4.1 Verimin frekansa göre değişiminin farklı hava aralığı ve karakteristik empedanslarda incelenmesi

Verimi hesaplamak için denklem (3.22) kullanılır. Denklem MATLAB programında farklı hava aralıkları ve farklı karakteristik empedanslar için frekans değiştirilerek çözdürüldüğünde verimin frekansa göre değişimini gösteren grafik olan Şekil 4.1 çıkarılır. Verimin frekansa göre değişimini veren MATLAB kodları EK-A içinde verilmiştir. Ayrıca verim grafiğinin büyük ölçekli halide yine EK-A içerisinde yer almaktadır. Maxwell programıyla hesaplanan alıcı ve verici bobinlerin endüktansı, her bir hava aralığına göre yine maxwell programıyla hesaplanan karşıt endüktans ve rezonans için seçilen kondansatör değerleri aşağıda verilmiştir.

Hava aralığı 1cm için $L=1004$ nH, $C=124$ pF, $L_m=562.5$ nH

Hava aralığı 5cm için $L=982.4$ nH, $C=124$ pF, $L_m=241.8$ nH

Hava aralığı 10cm için $L=999.2$ nH, $C=124$ pF, $L_m=128.6$ H

Hava aralığı 15cm için $L=1010.5$ nH, $C=124$ pF, $L_m=80.5$ nH

Hava aralığı 20cm için $L=996.7$ nH, $C=124$ pF, $L_m=46.2$ nH

Hava aralığı 1cm

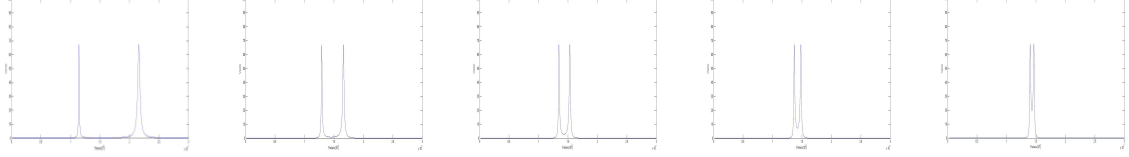
Hava aralığı 5cm

Hava aralığı 10cm

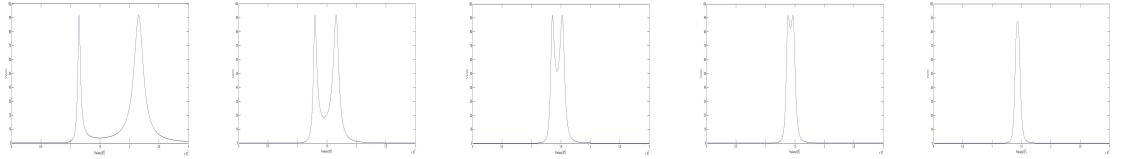
Hava aralığı 15cm

Hava aralığı 20cm

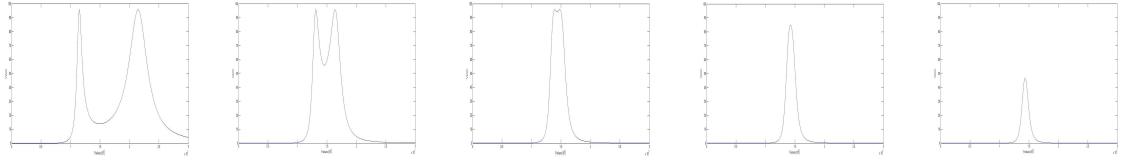
1) $z=1 \Omega$



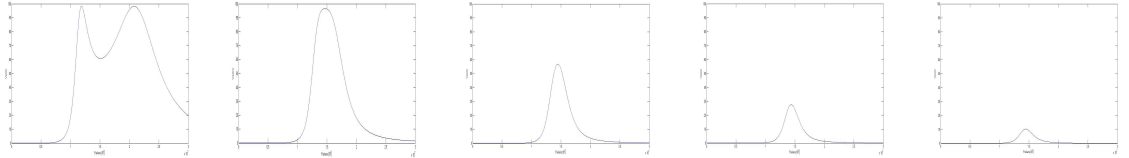
2) $z=5 \Omega$



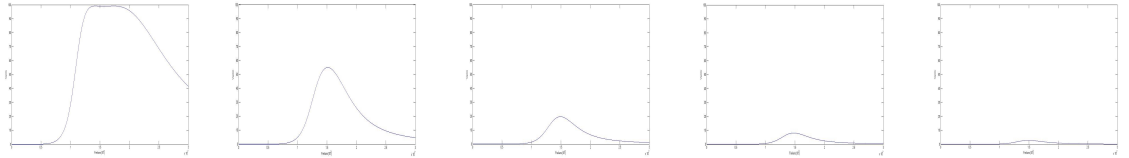
3) $z=10 \Omega$



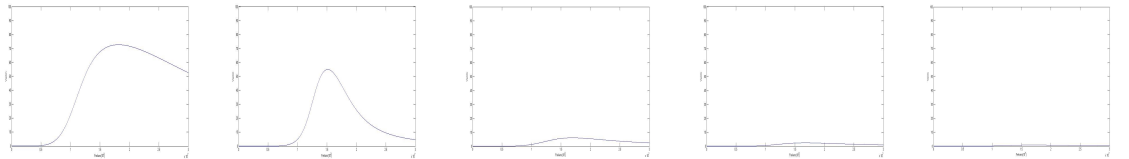
4) $z=25 \Omega$



5) $z=50 \Omega$



6) $z=100 \Omega$



Şekil 4.1 Farklı hava aralığı ve karakteristik empedanslar için verim grafiği

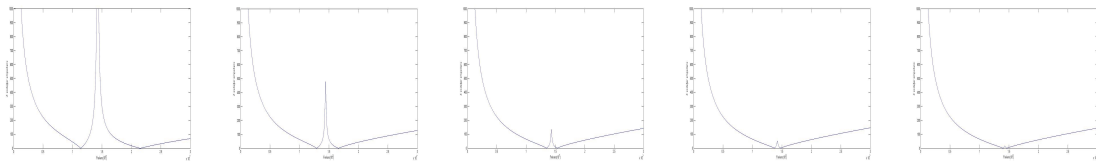
Şekil 4.1'deki grafik incelendiğinde, sistemin bazı durumlarda iki ayrı rezonans frekansına bazı durumlarda ise tek rezonans frekansına sahip olduğu görülür. Bu durum denklem (3.24) ve (3.25) ile açıklanır. Denklem (3.24) koşulunda sistemin çift rezonans frekansına sahip olduğu ve denklem (3.25) koşulunda ise sistemin tek rezonans frekansına sahip olduğu görülür. Denklem (3.25)'daki eşitsizliğin farkı arttıkça tek rezonanslı sistemlerde verimin de düştüğü yine grafiklerden görülmektedir.

4.2 Z eşdeğer empedansın frekansa göre değişiminin farklı hava aralığı ve karakteristik empedanslarda incelenmesi

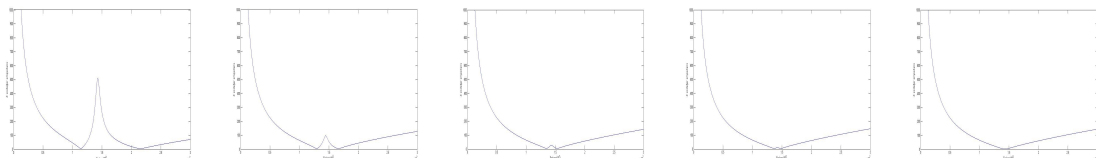
Z eşdeğer empedansı hesaplamak için denklem (3.14) kullanılır. Denklem MATLAB programında farklı hava aralıkları ve farklı karakteristik empedanslar için frekans değiştirilerek çözdürüldüğünde Z eşdeğer empedansın frekansa göre değişimini gösteren grafik olan Şekil 4.2 çıkarılır. Z eşdeğer empedansın frekansa göre değişimini veren MATLAB kodları EK-A içinde verilmiştir. Ayrıca Z eşdeğer empedans grafiğinin büyük ölçekli halide yine EK-A içerisinde yer almaktadır. Şekil 4.2'deki grafikleri incelendiğinde sistemin rezonansa girdiği durumlarda Z eşdeğer empedansın minimum olduğu noktalar vardır. Yine bu noktalar Şekil 4.1'deki grafiklere bakıldığında verimin maksimum olduğu noktadır. Sistemimizin rezonans frekansı dediğimiz noktalarda tam burasıdır.

Hava aralığı 1cm Hava aralığı 5cm Hava aralığı 10cm Hava aralığı 15cm Hava aralığı 20cm

1) $z=1 \Omega$

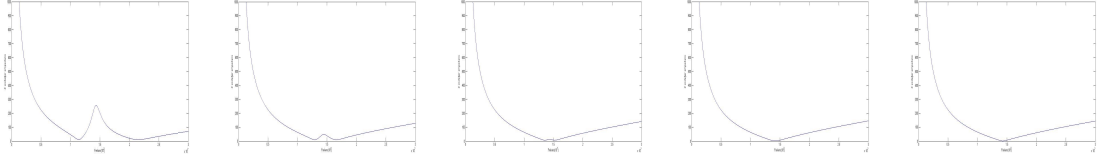


2) $z=5 \Omega$

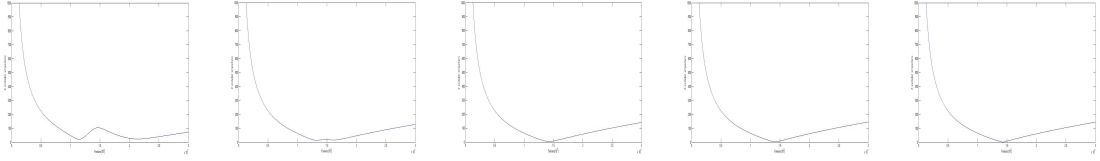


Şekil 4.2 Farklı hava aralığı ve karakteristik empedanslar için eşdeğer empedans grafiği

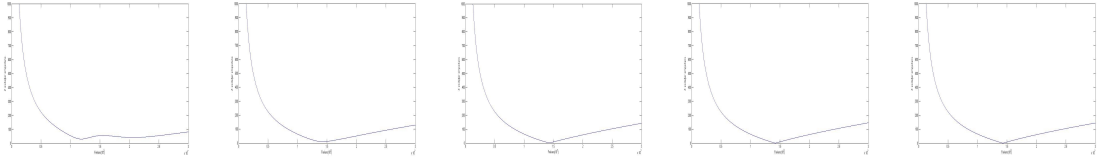
3) $z=10 \Omega$



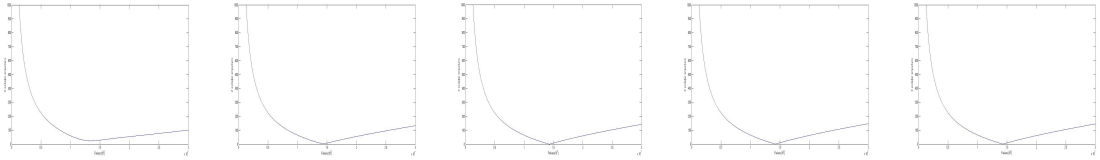
4) $z=25 \Omega$



5) $z=50 \Omega$



6) $z=100 \Omega$



Şekil 4.2 Farklı hava aralığı ve karakteristik empedanslar için eşdeğer empedans grafiği (Devamı)

Şekil 4.2'deki grafik incelendiğinde, Z eşdeğer empedansların minimum noktalarının Şekil 4.1'de verimin maksimum olduğu rezonans frekansların olduğu görülmektedir.

4.3 Rezonans frekansları

Rezonans frekansları Şekil 4.1'deki verim grafiklerinin maksimum noktaya ulaştığındaki ve Şekil 4.2'deki Z eşdeğerinin minimum olduğu frekanslarıdır. Her bir hava aralığı ve karakteristik empedans için ayrı ayrı rezonans frekansları hesaplanarak Çizelge 4.1 oluşturulur.

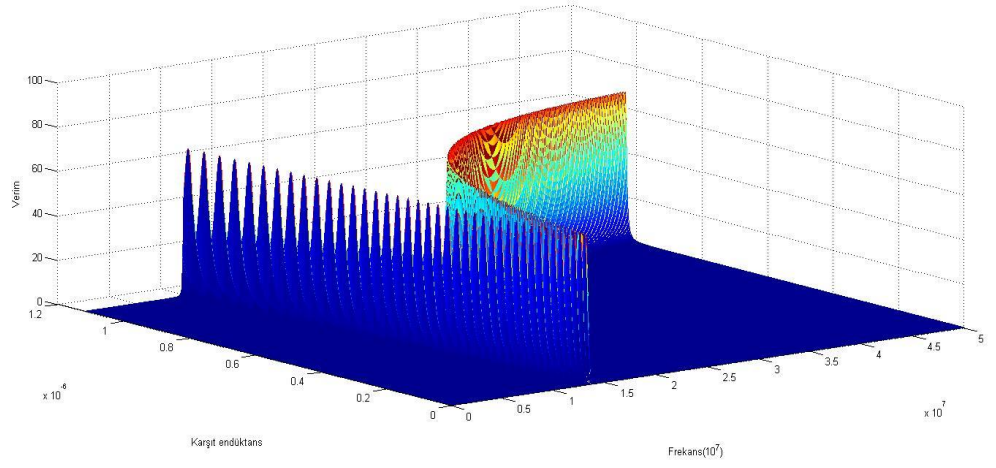
Çizelge 4.1 Hava aralığı ve Karakteristik empedansa göre rezonans frekansları

Hava Aralığı/ Z_0	1Ω	5Ω	10Ω	25Ω	50Ω	100Ω
1cm	11,434MHz	11,450MHz	11,499MHz	11,870MHz	14,212MHz	18,154MHz
5cm	12,920MHz	12,964MHz	13,103MHz	14,683MHz	15,149MHz	17,300MHz
10cm	13,463MHz	13,552MHz	13,928MHz	14,472MHz	14,915MHz	16,948MHz
15cm	13,691MHz	13,855MHz	14,252MHz	14,370MHz	14,803MHz	16,786MHz
20cm	14,010MHz	14,326MHz	14,343MHz	14,463MHz	14,905MHz	16,928MHz

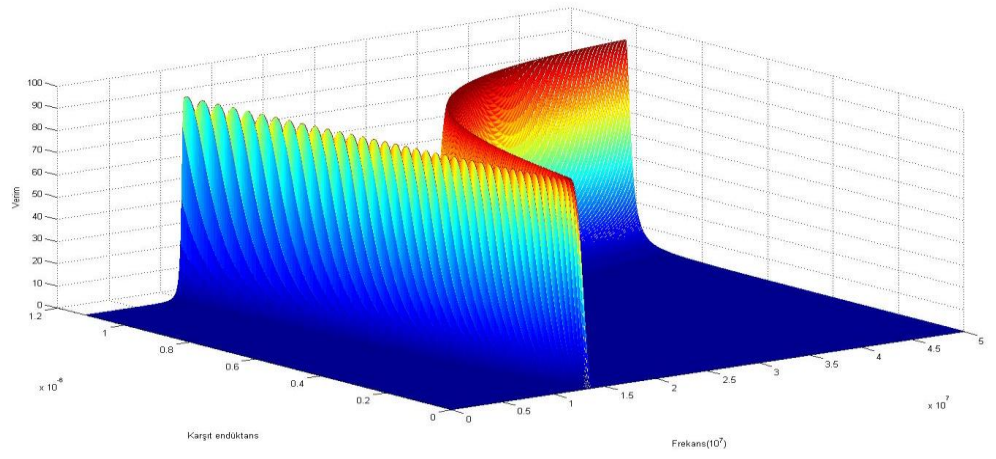
4.4 Hava aralığı ve frekana göre verimin değişiminin incelenmesi

Hava aralığının ve frekansın verime olan etkisini daha geniş bir düzlemde incelemek için 3 boyutlu bir grafik kullanılır. Hava aralığı ve frekansa göre verimin değişimini veren MATLAB kodları EK-A içinde verilmiştir.

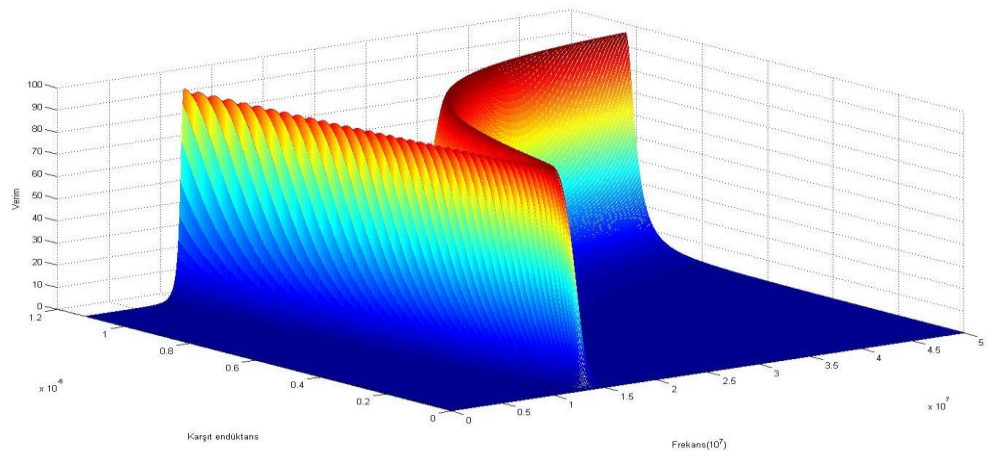
Burada farklı karakteristik empedanslara göre hava aralığının ve frekansın verime etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde $Z=1\Omega$ durumu için verimin %70 lerde sınırlandığı ve karşıt endüktansın çok düşük olduğu değerlerde tek rezonans frekansına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca rezonans frekansının çok ince bir aralıkta olduğu ve sistemin kontrolünün en zor olduğu kısımdır. $Z=1\Omega$ durumu aslında sistemin kısa devre durumuna en yakın halidir. Bu durumda sistem en kararsız ve en verimsiz haldedir. Şekil 4.4 incelendiğinde $Z=5\Omega$ için sistemin $Z=1\Omega$ olan sisteme göre daha verimli olduğu ve rezonans frekansı aralığının biraz daha geniş olduğu görülmektedir. Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8 incelendiğinde sistemin karakteristik empedansını arttırdıkça, sistemin çift rezonans frekansına girdiği noktaların azaldığı ve tek rezonans frekansına yaklaştığı ve düşük karşıt endüktans değerlerinde ise verimin çok azaldığı görülmektedir.



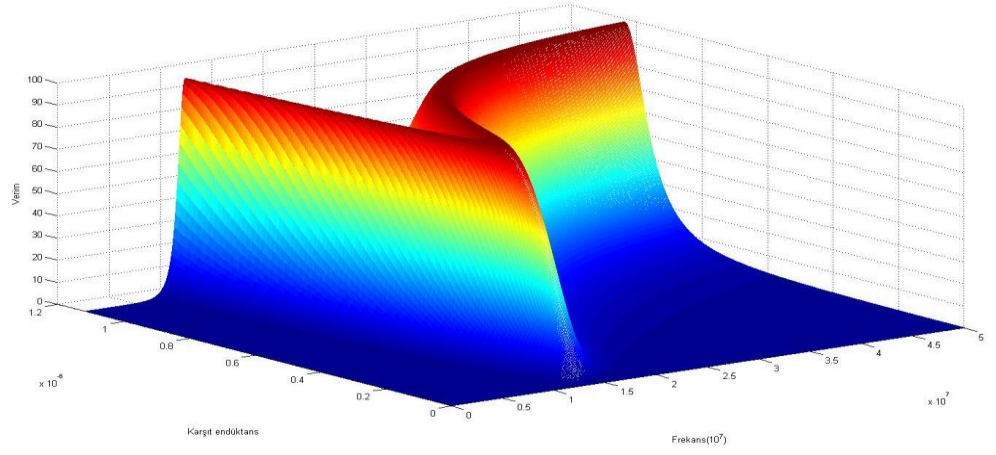
Şekil 4.3 $Z=1 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi



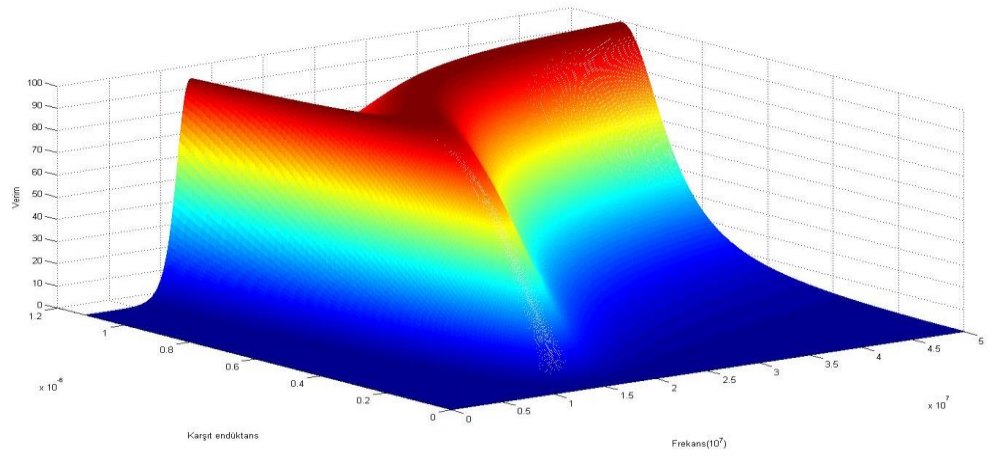
Şekil 4.4 $Z=5 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi



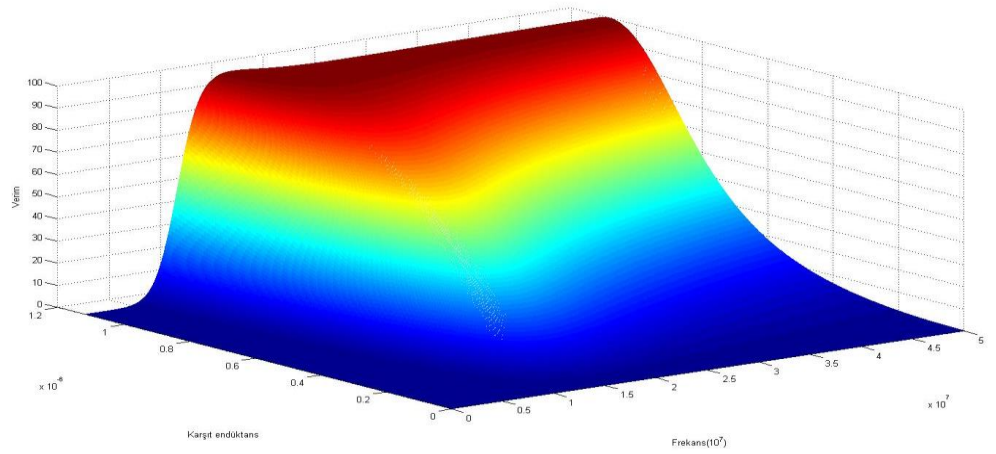
Şekil 4.5 $Z=10 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi



Şekil 4.6 $Z=25 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi



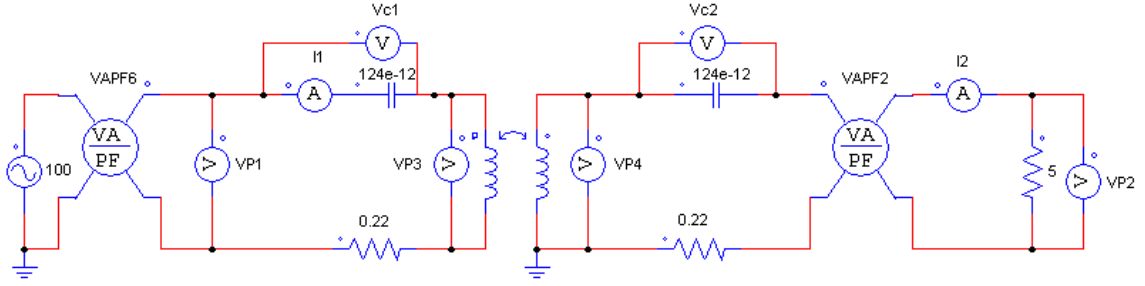
Şekil 4.7 $Z=50 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi



Şekil 4.8 $Z=100 \Omega$ için verimin karşıt endüktans ve frekansa göre değişimi

4.5 PSIM Simülasyon Sonuçları

Sistemin elektriksel devre analizi PSIM simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PSIM simülasyonlarında; giriş ile çıkış gücü, giriş gerilimi ile çıkış gerilimi, giriş ile çıkış akımları, birincil ile ikincil sargılarda endüklenen uç gerilimleri ve birincil taraf ile ikincil taraf kondansatörlerin uç gerilimleri arasındaki ilişki gözlemlenmiştir.

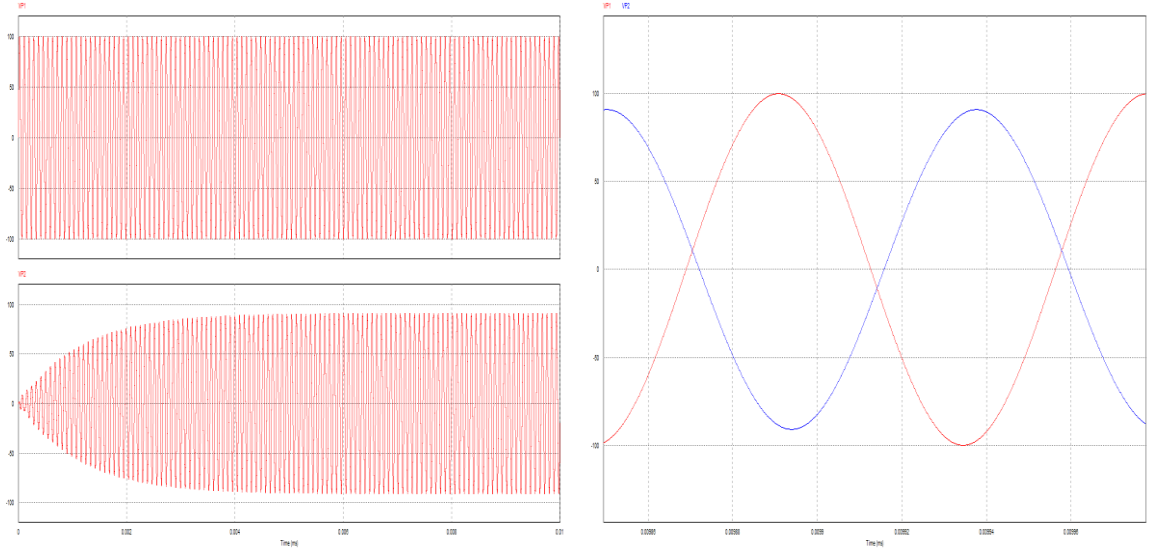


Şekil 4.9 PSIM devre şeması

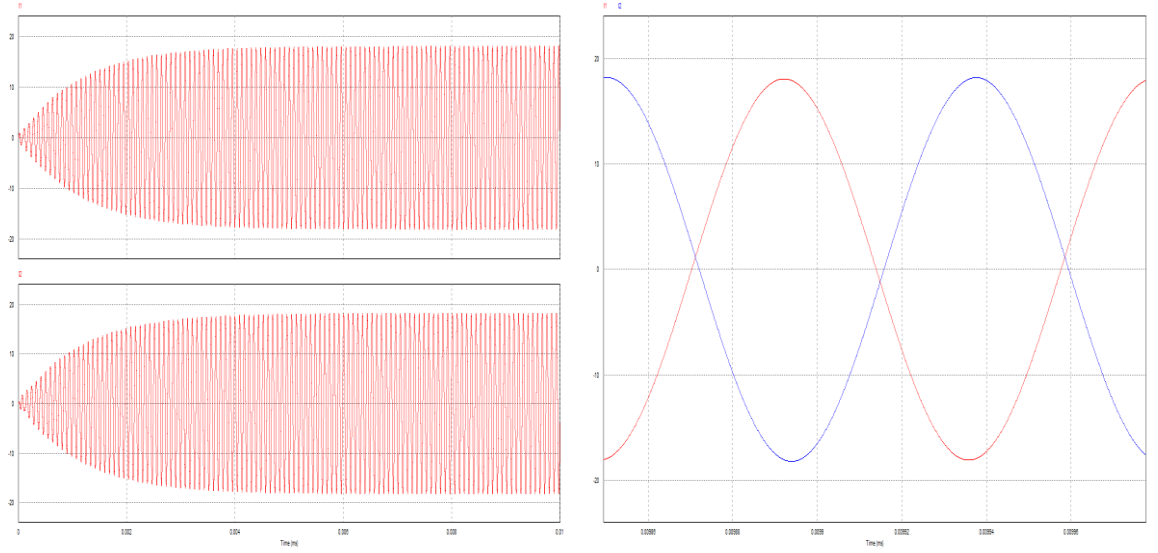
Şekil 4.9'daki modelde VAPF6 ile giriş gücü, VAPF2 ile çıkış gücü, VP1 ile giriş gerilimi, VP2 ile çıkış gerilimi, VP3 ile birincil(verici) sargıda endüklenen gerilimi, VP4 ile ikincil(alıcı) sargıda endüklenen gerilimi, Vc1 ile birincil kondansatör uç gerilimi ve Vc2 ile ikincil kondansatör uç gerilimi, I1 ile giriş (birincil taraf) akımı ve I2 ile çıkış (ikincil taraf) akımı ölçülür.

4.5.1 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için simülasyon sonuçları

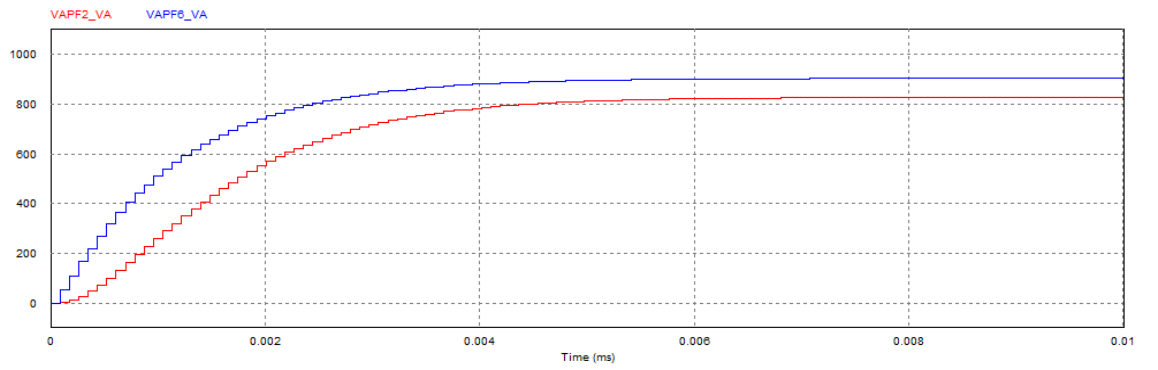
100 V geriliminde 11,450 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1004 nH, karşıt endüktans 562.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 Ω , Z_0 değeri 5 Ω olarak seçilmiştir.



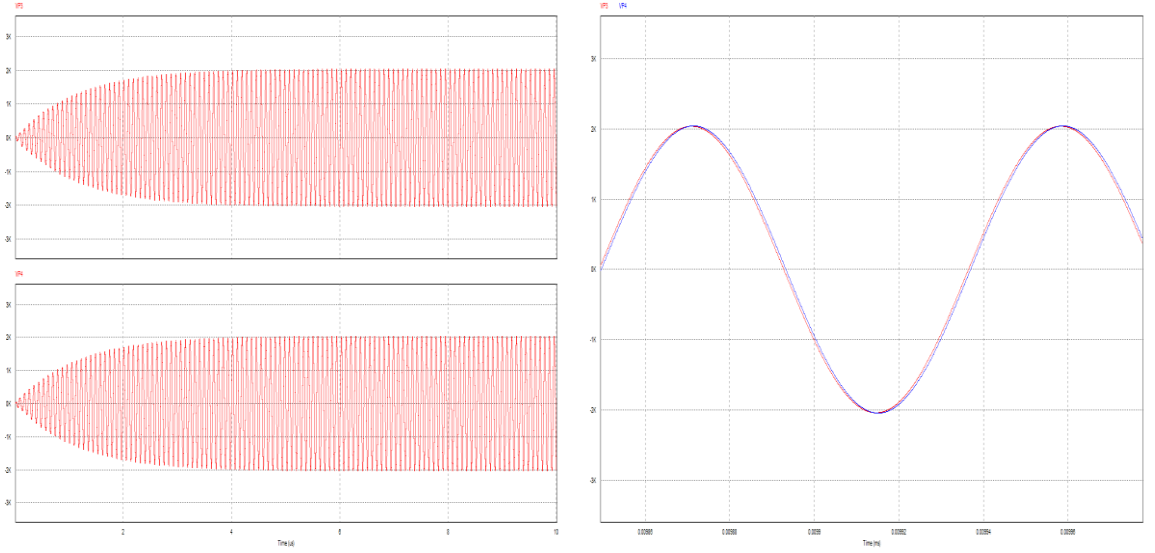
Şekil 4.10 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gerilimi



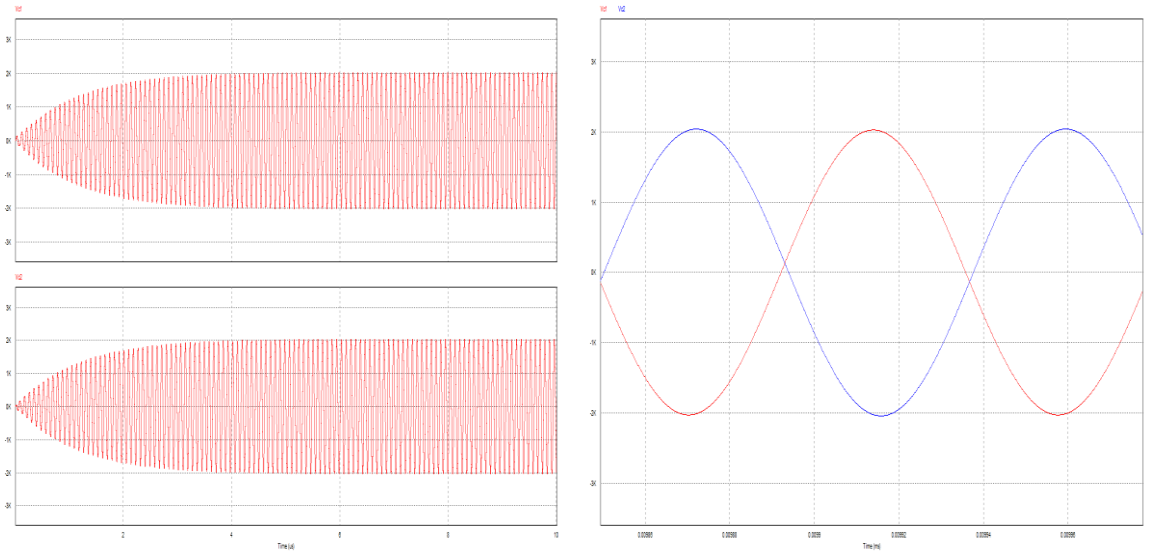
Şekil 4.11 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil 4.12 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gücü



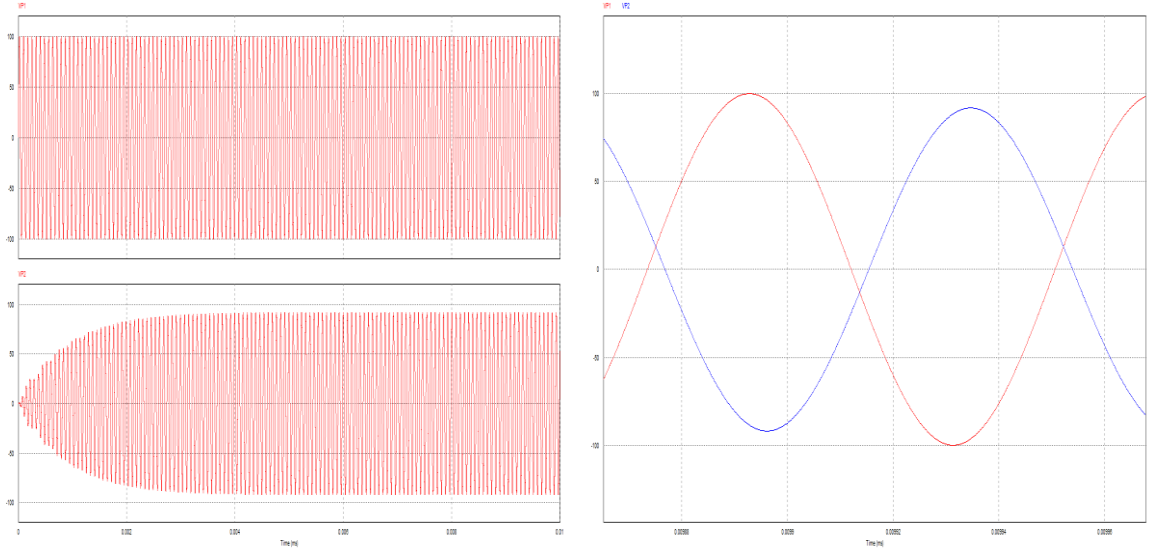
Şekil 4.13 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



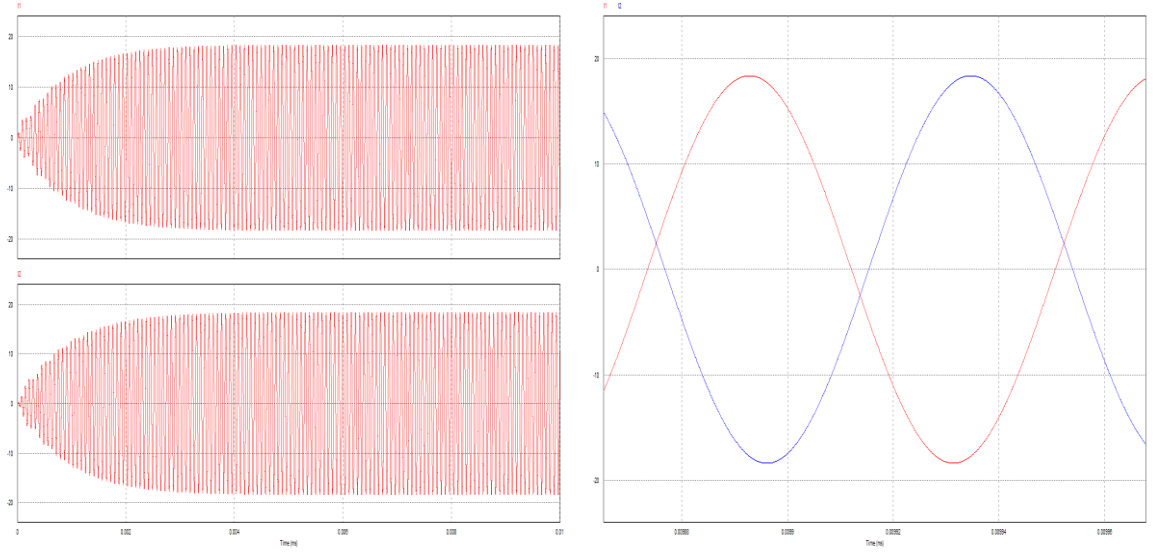
Şekil 4.14 Hava aralığı 1 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

4.5.2 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5Ω için simülasyon sonuçları

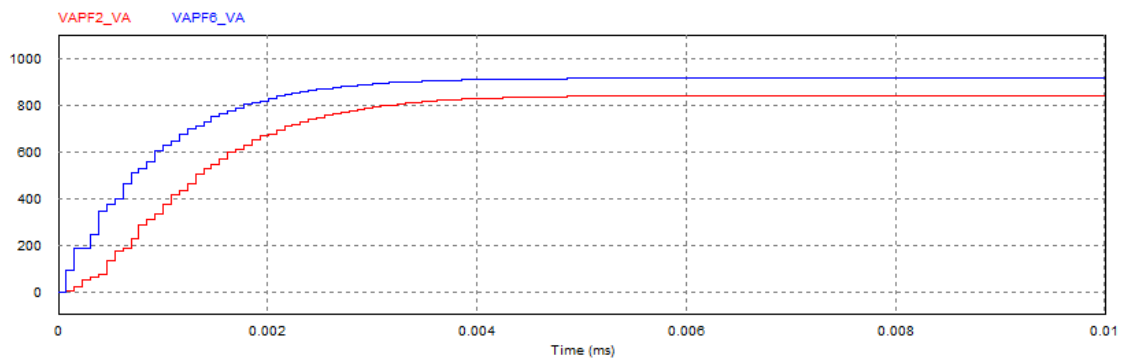
100 V geriliminde 12,964 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 982.4 nH, karşıt endüktans 241.8 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22Ω , Z_0 değeri 5Ω olarak seçilmiştir.



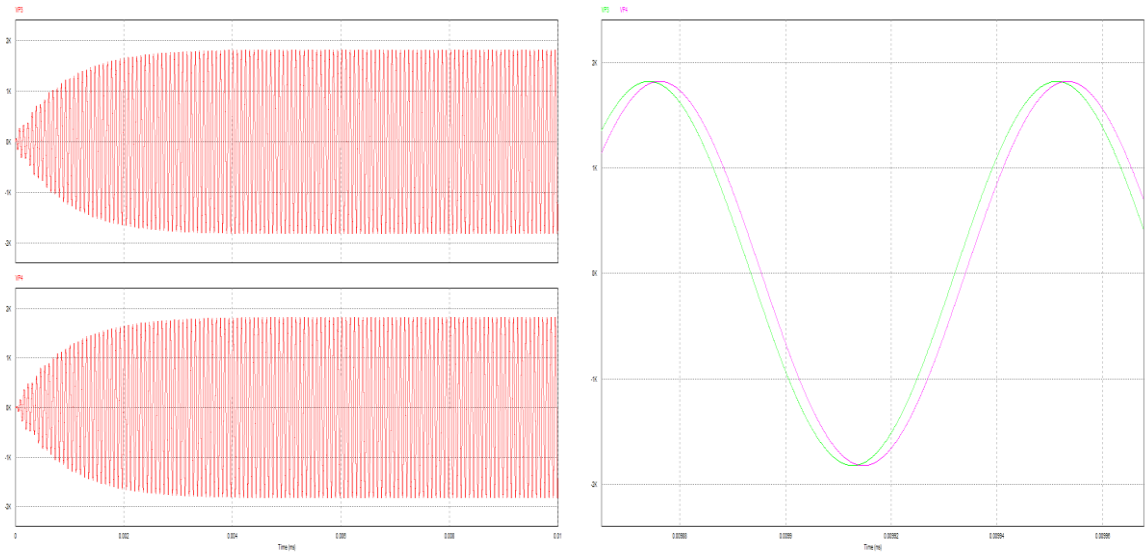
Şekil 4.15 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gerilimi



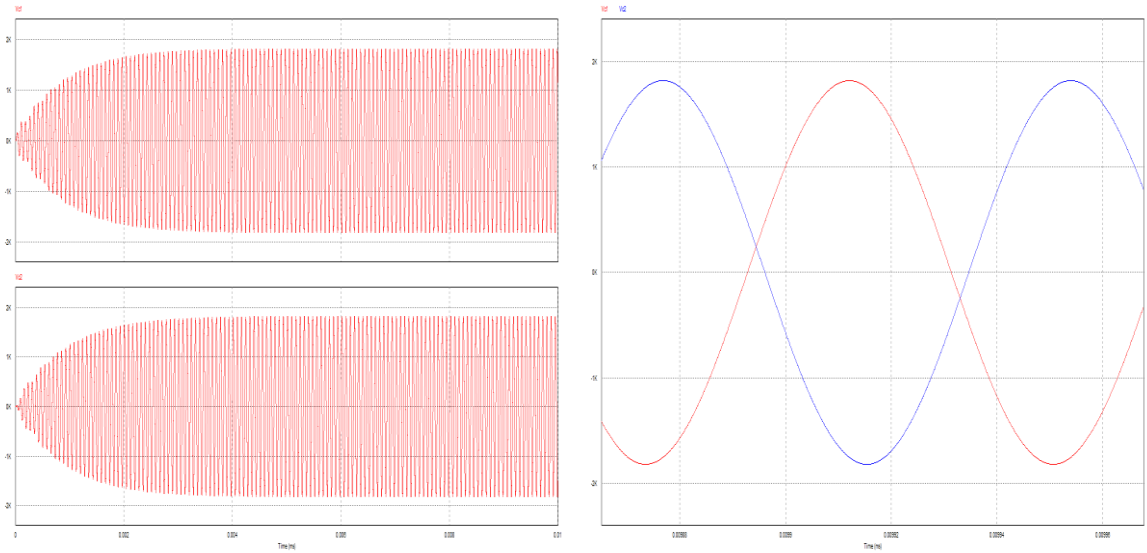
Şekil 4.16 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil 4.17 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gücü



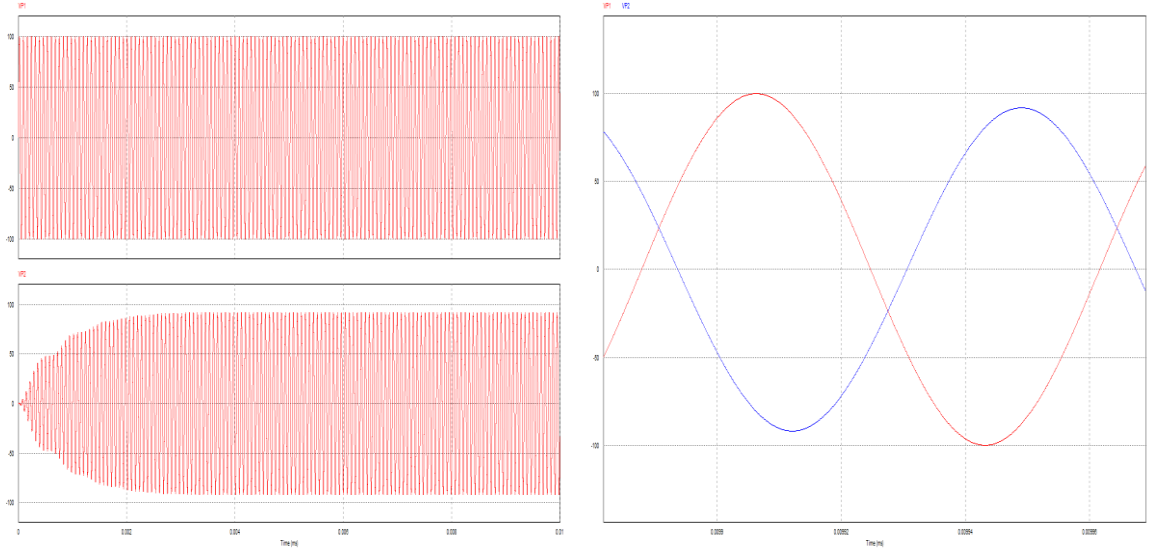
Şekil 4.18 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birinci ve ikincil sargı uç gerilimi



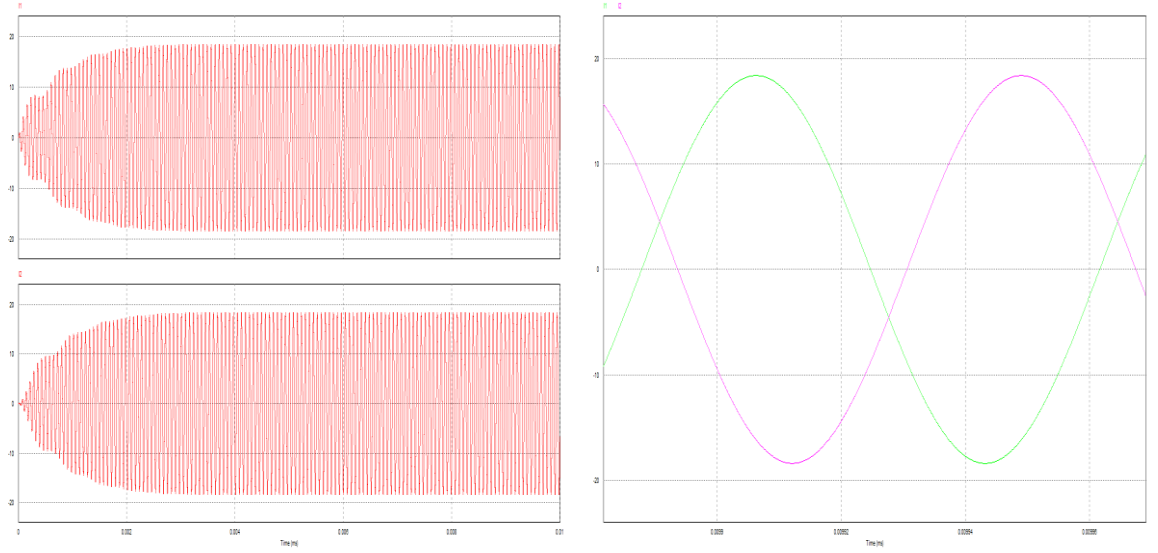
Şekil 4.19 Hava aralığı 5 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

4.5.3 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için simülasyon sonuçları

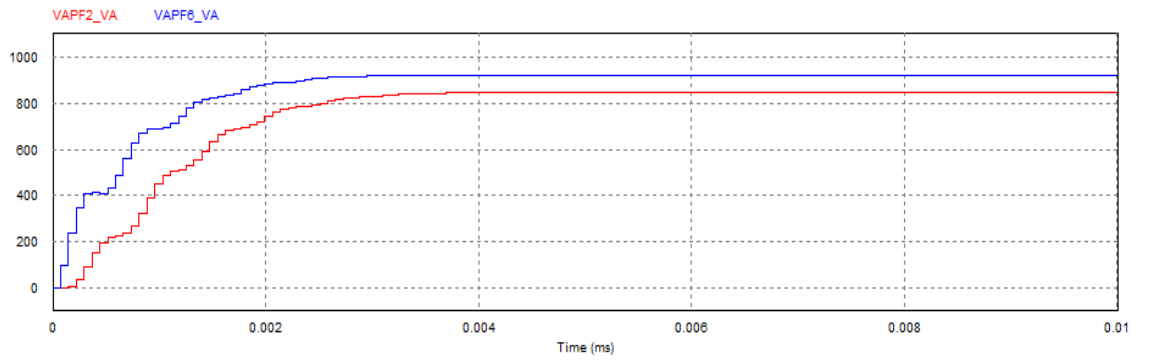
100 V geriliminde 13,552 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 999.2 nH, karşıt endüktans 128.6 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 Ω , Z_0 değeri 5 Ω olarak seçilmiştir.



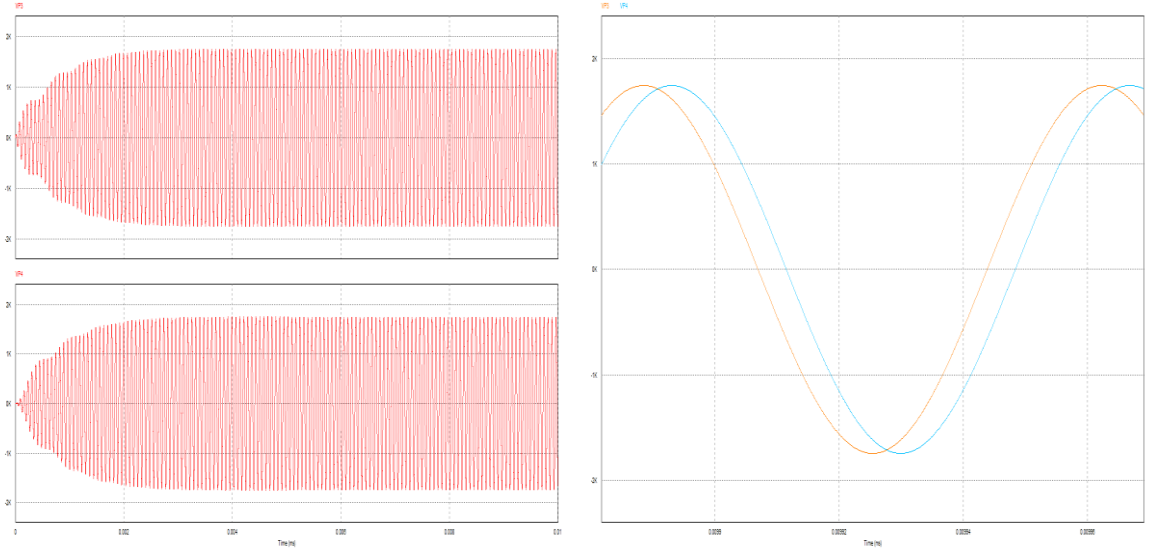
Şekil 4.20 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gerilimi



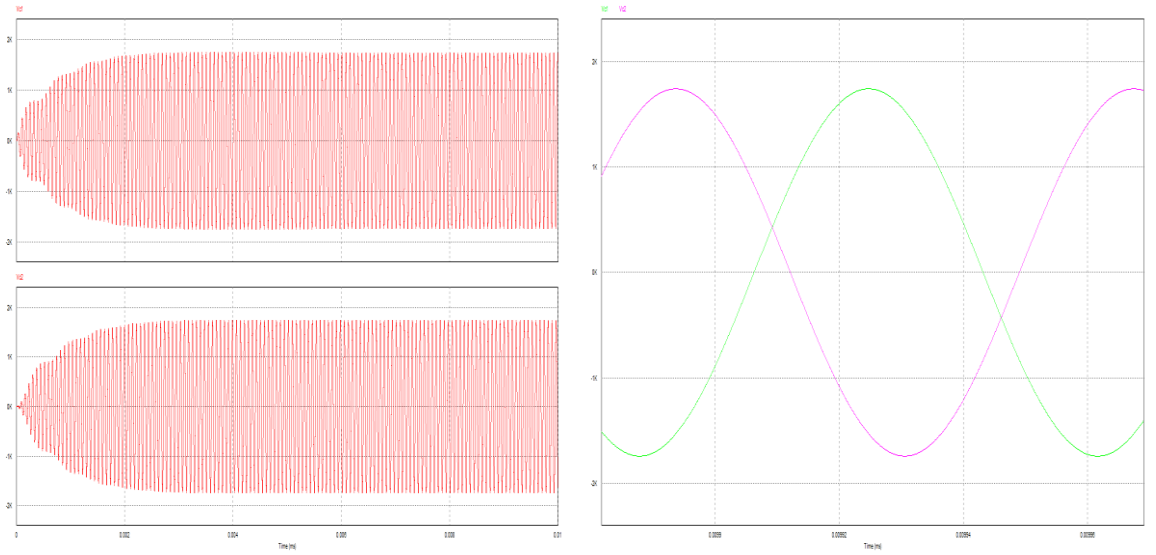
Şekil 4.21 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil 4.22 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gücü



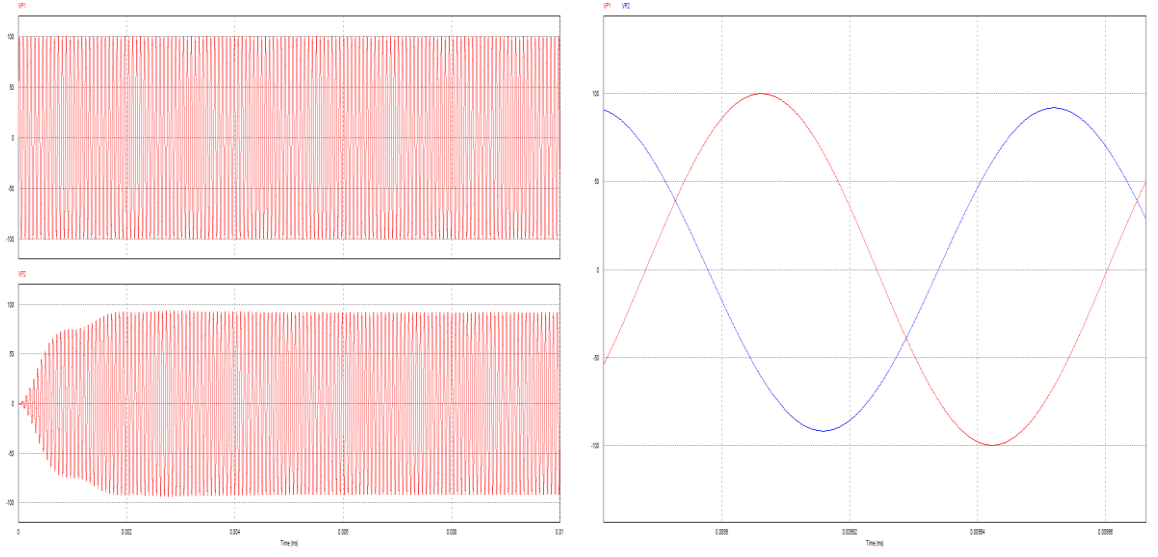
Şekil 4.23 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



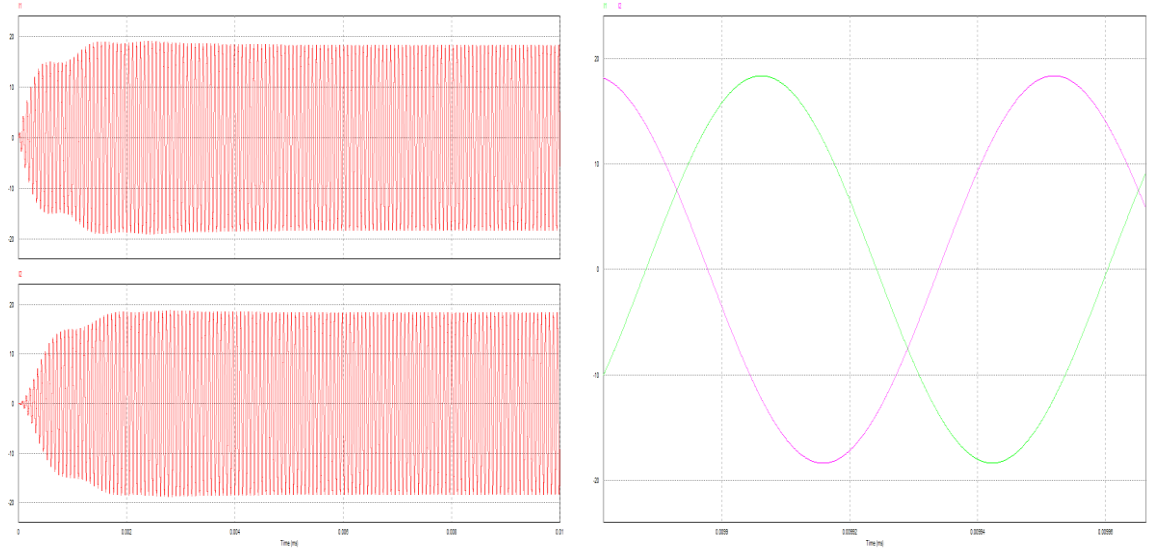
Şekil 4.24 Hava aralığı 10 cm ve karakteristik empedans 5 Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

4.5.4 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5 ohm için simülasyon sonuçları

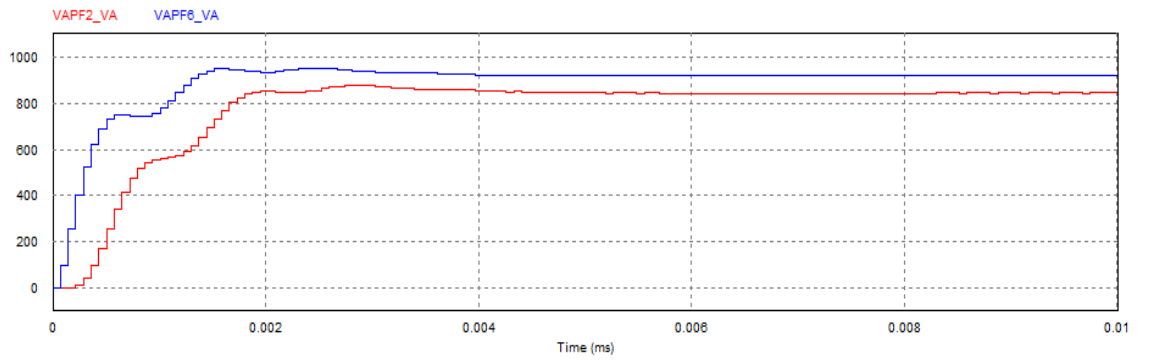
100 V geriliminde 13,855 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1010.5 nH, karşıt endüktans 80.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 Ω , Z_0 değeri 5 Ω olarak seçilmiştir.



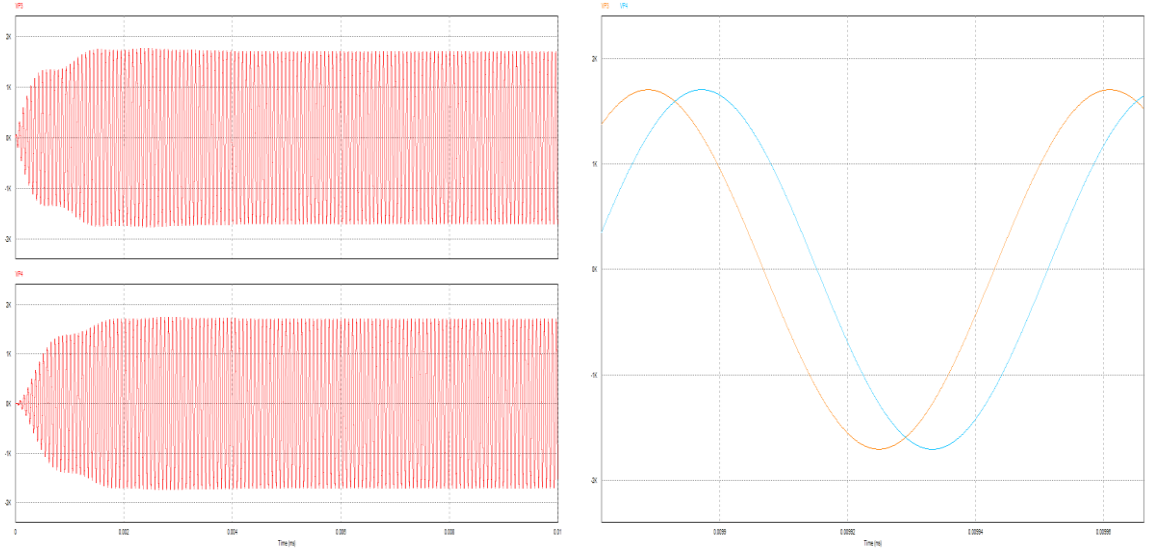
Şekil 4.25 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gerilimi



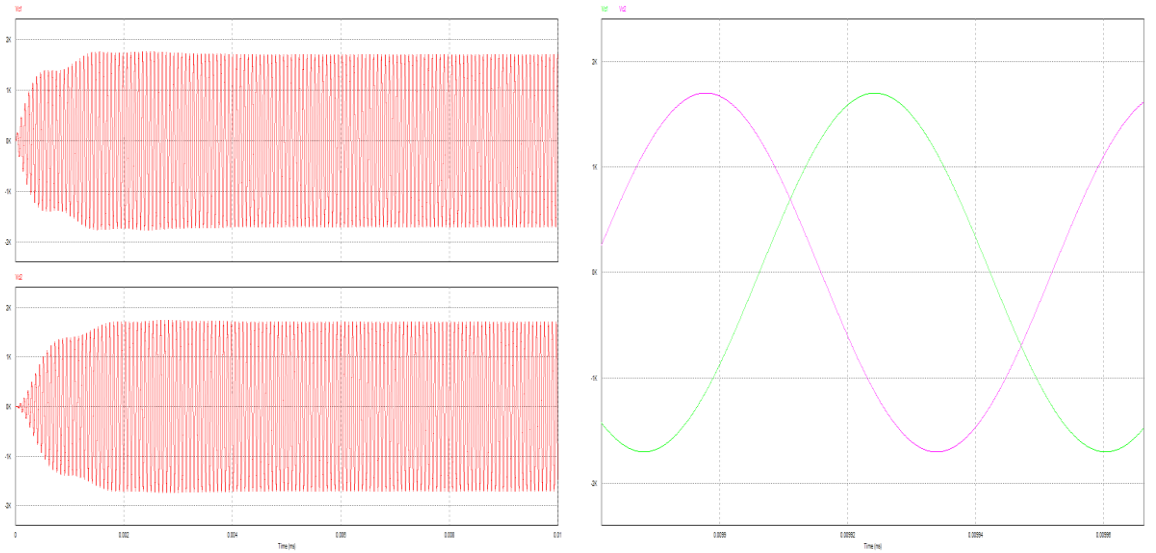
Şekil 4.26 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil 4.27 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gücü



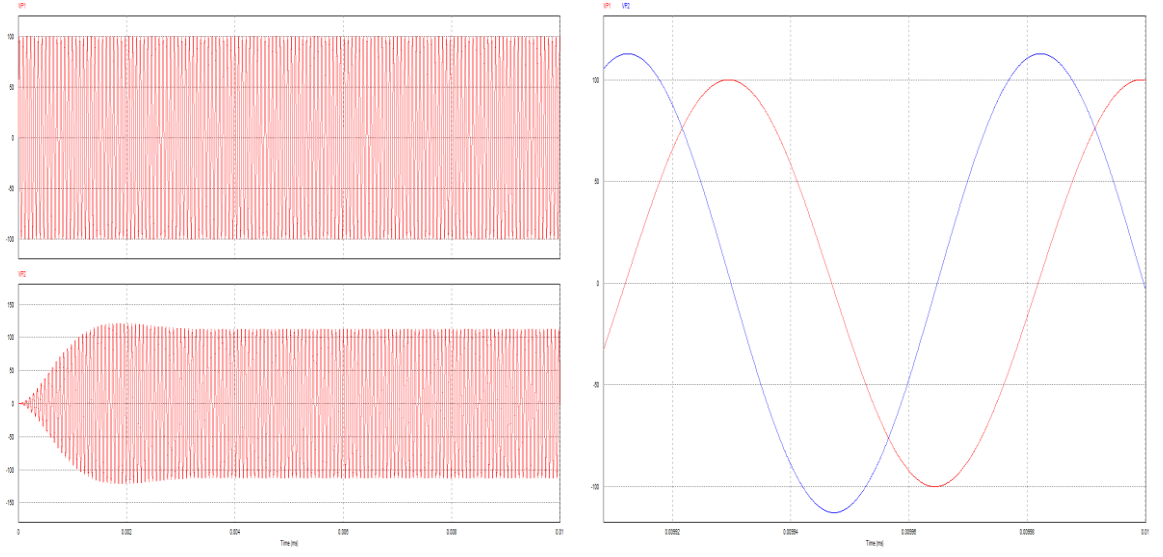
Şekil 4.28 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



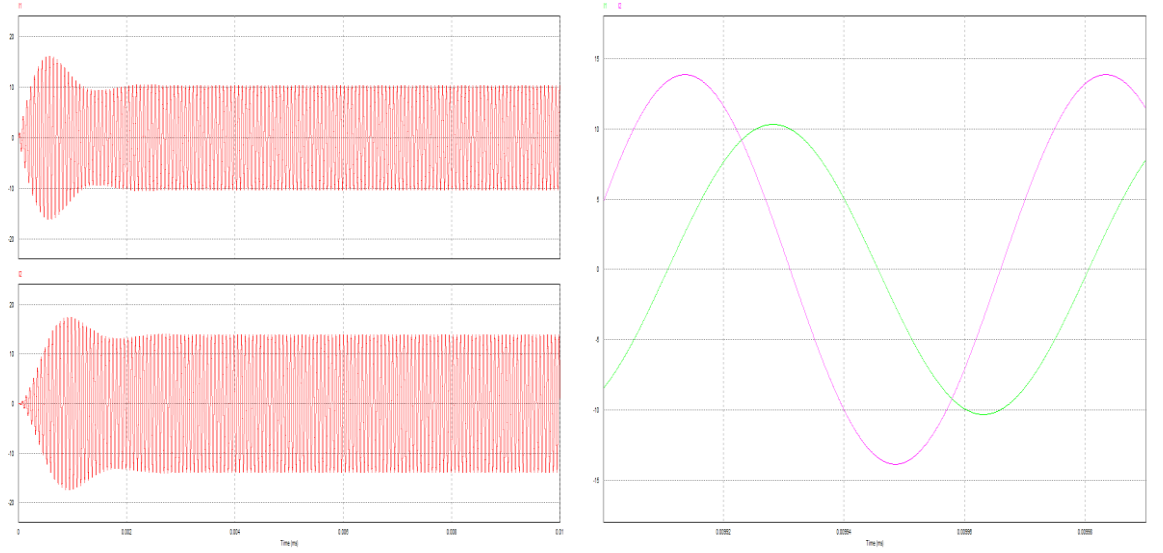
Şekil 4.29 Hava aralığı 15 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

4.5.5 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5Ω için simülasyon sonuçları

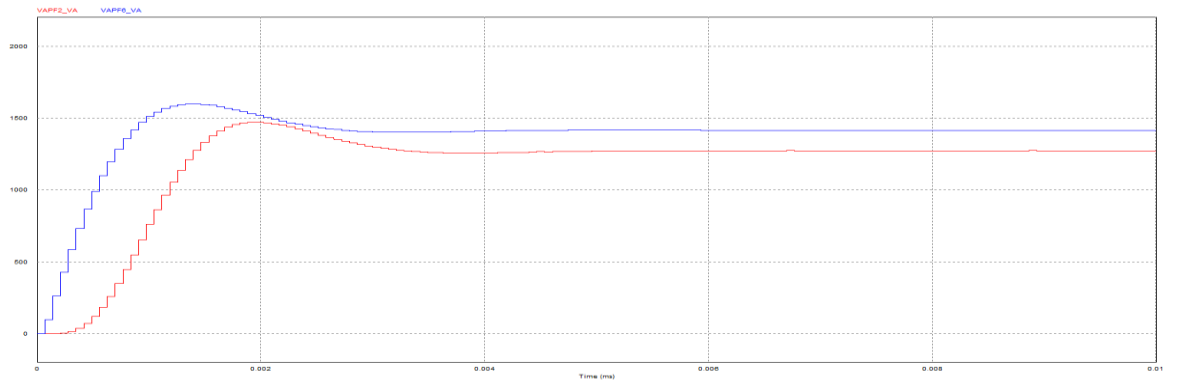
100 V geriliminde 14,326 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 996.7 nH, karşıt endüktans 46.2 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22Ω , Z_0 değeri 5Ω olarak seçilmiştir.



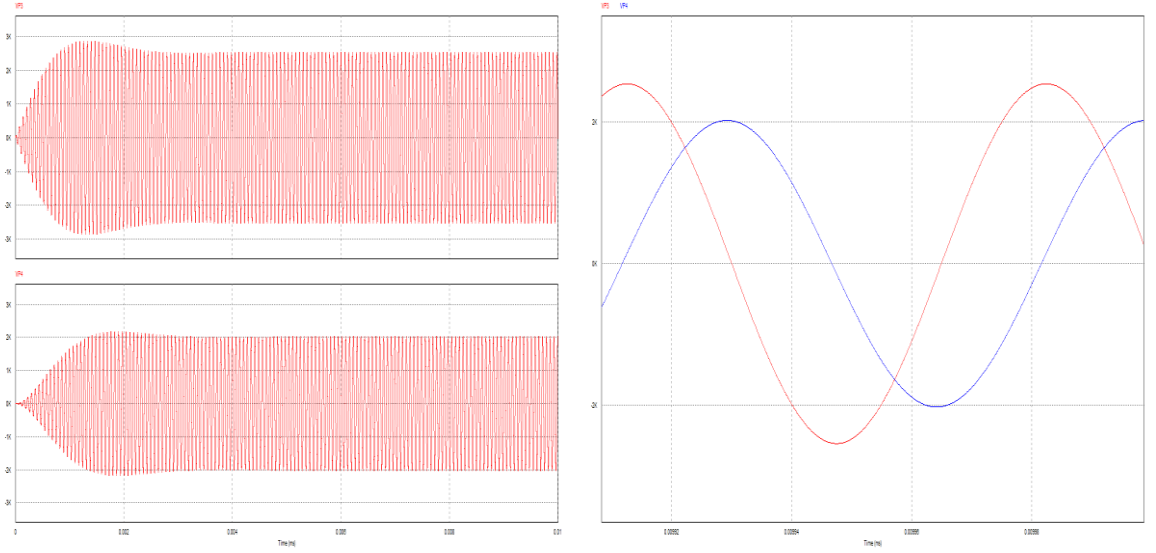
Şekil 4.30 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gerilimi



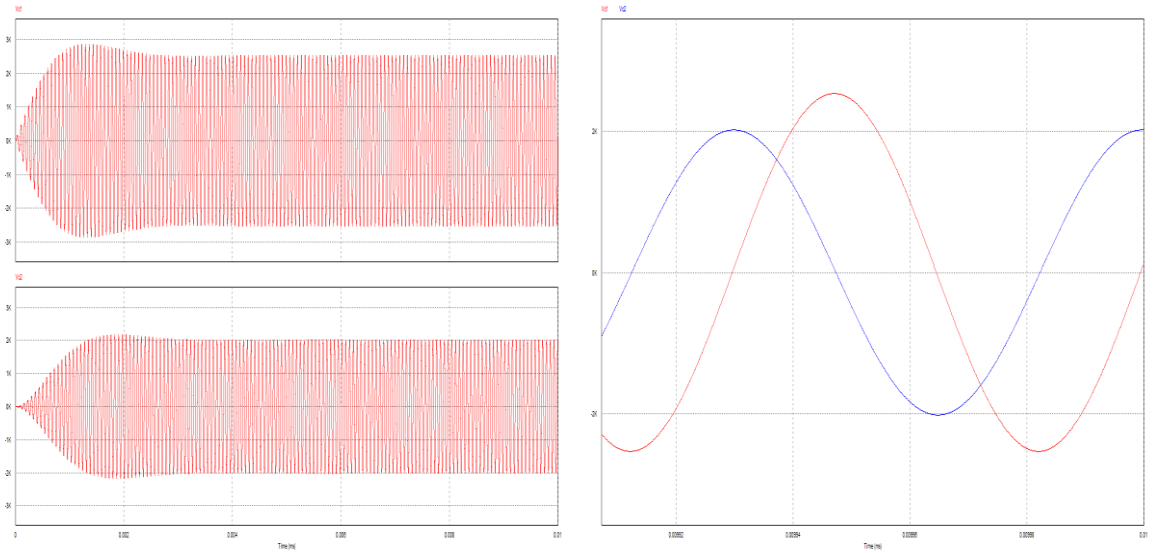
Şekil 4.31 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil 4.32 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5Ω için giriş ve çıkış gücü



Şekil 4.33 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

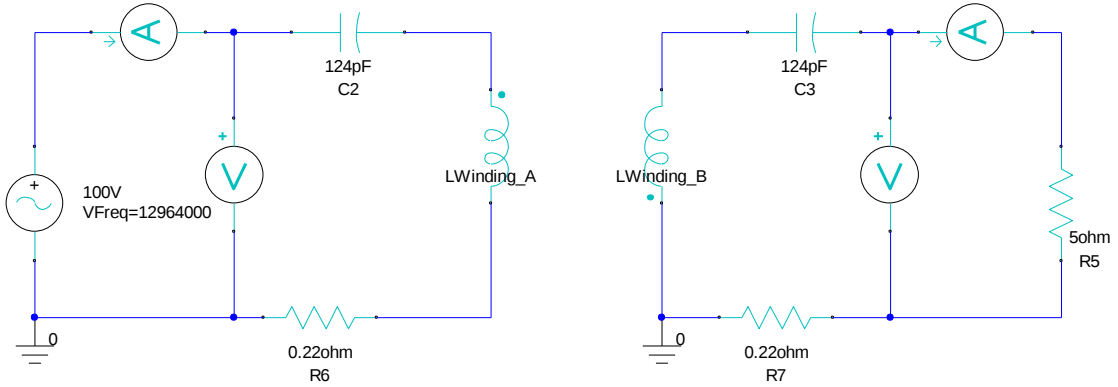


Şekil 4.34 Hava aralığı 20 cm ve karakteristik empedans 5Ω için birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

Bu bölümde PSIM ile $Z=5\Omega$ koşulu için 1cm, 5cm, 10cm, 15cm ve 20cm hava aralıklarında giriş ile çıkış gücü, giriş gerilimi ile çıkış gerilimi, giriş ile çıkış akımları, birincil ile ikincil sargılarda endüklenen uç gerilimleri ve birincil taraf ile ikincil taraf kondansatörlerin uç gerilimleri şekillerin sol tarafında uzun bir zaman periyodunda sistemin geçici halden kalıcı haline kadar incelenmiştir. Şekillerin sağ tarafında ise kalıcı hal durumları kısa bir zaman periyodu için 1 veya iki dalga boyu uzunlukta incelenmiştir.

4.6 Maxwell 3D Simülasyon Sonuçları

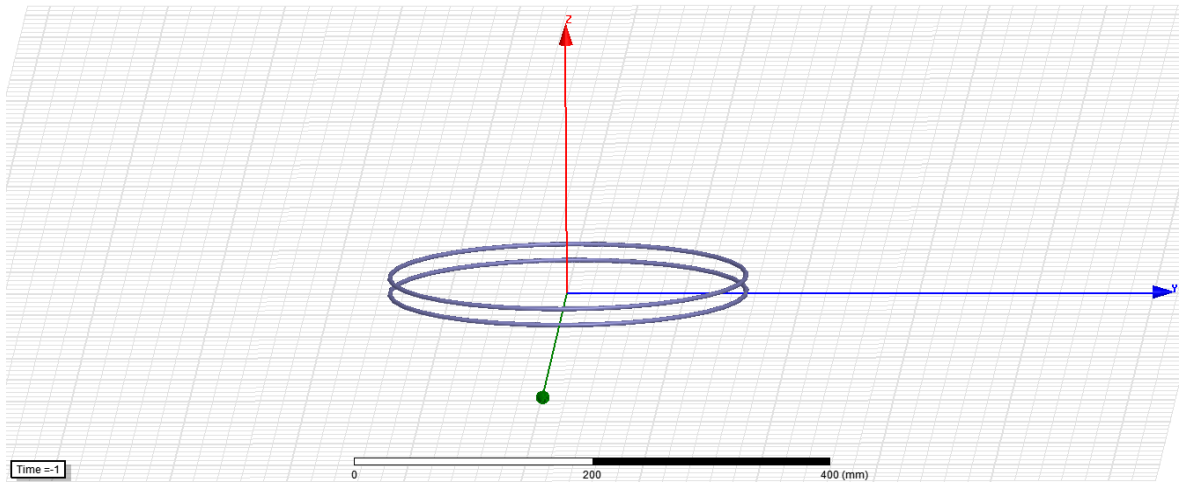
Maxwell 3D programında magnetik rezonanslı kuplaj kablosuz enerji aktarım sistemi sonlu elemanlar yöntemiyle (FEM) çözülür. $Z=5\Omega$ koşulu için 1cm, 5cm, 10cm, 15cm ve 20cm hava aralıklarında Çizelge 4.1'deki rezonans frekanslarına göre kaynak frekansları ayarlanarak simülasyonlar gerçekleştirilir. Maxwell 3D simülasyonlarında; giriş ve çıkış gücü arasındaki ilişki, giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki, giriş ve çıkış akımları arasındaki ilişki ve birincil ile ikincil sargılarda endüklenen uç gerilimleri arasındaki ilişki gözlemlenecektir. Ayrıca 3 boyutlu düzlemde alıcı ile verici bobinin ve havadaki manyetik akı yoğunluğu gösterilir.



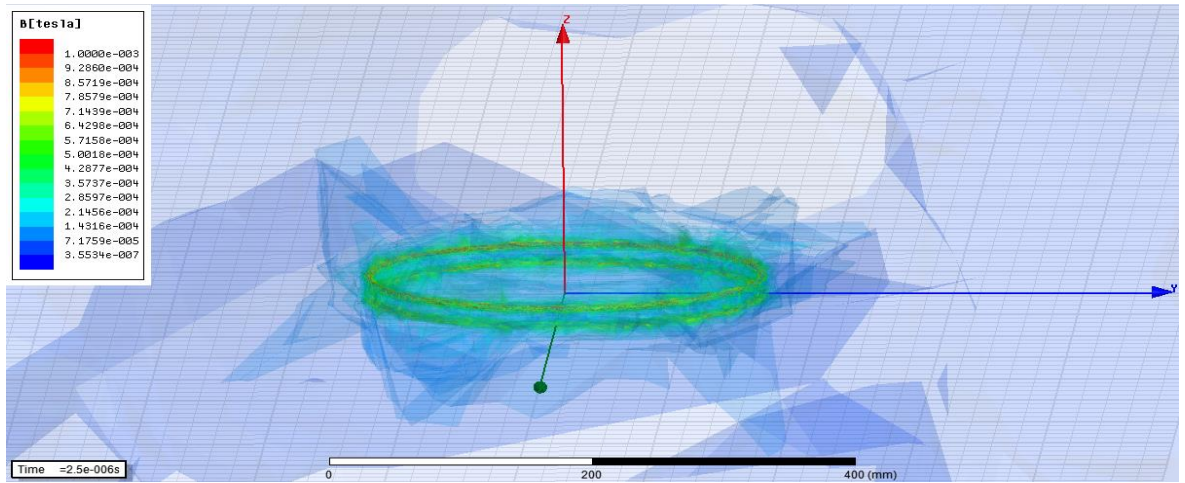
Şekil 4.35 Maxwell Circuit Editor devre çizimi

Şekil 4.35'te manyetik rezonanslı KET sistemi Maxwell Circuit Editör programında kurulmuştur. LWinding_A(birincil bobin veya verici bobin) ve LWinding_B (ikincil bobin veya alıcı bobin) ise Maxwell 3D ile Şekil 4.36, 4.43, 4.50, 4.57 ve 4.64 de görüldüğü gibi tasarlanmıştır. Maxwell 3D programı, Maxwell Circuit Editör programıyla haberleştirilerek devremiz çözülürmüştür.

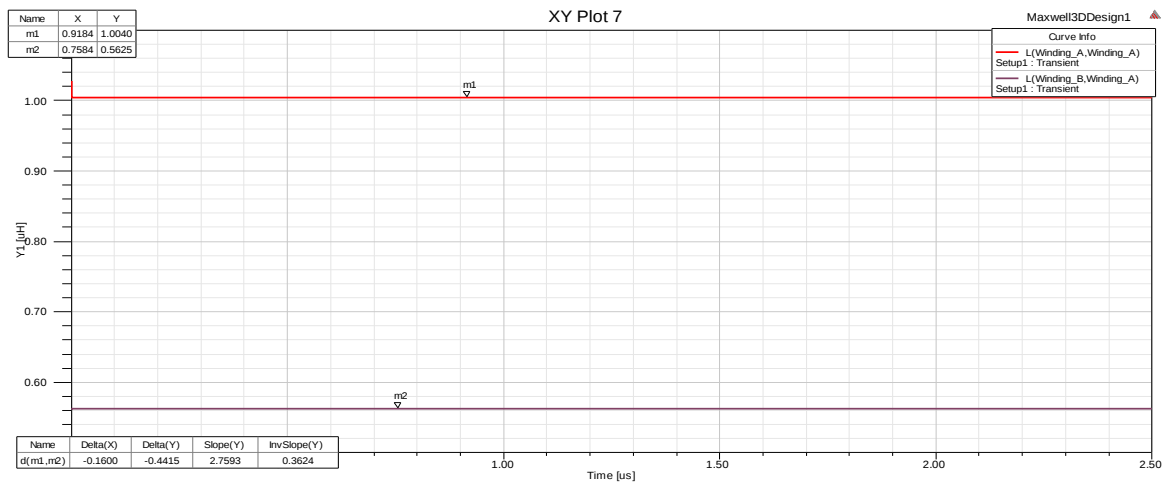
4.6.1 Hava aralığı 1 cm Z=5 Ω



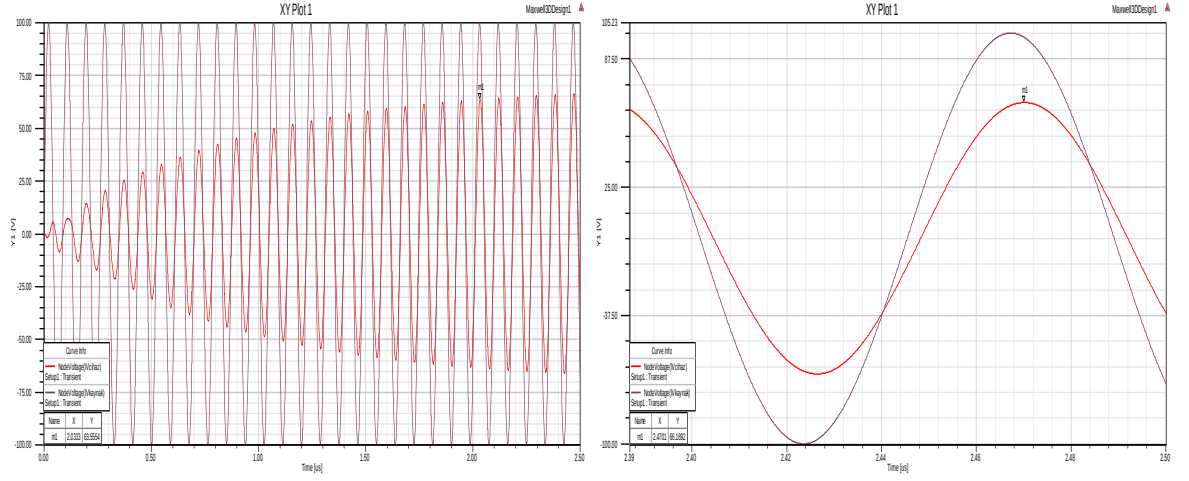
Şekil 4.36 Maxwell 3D ile 1cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler



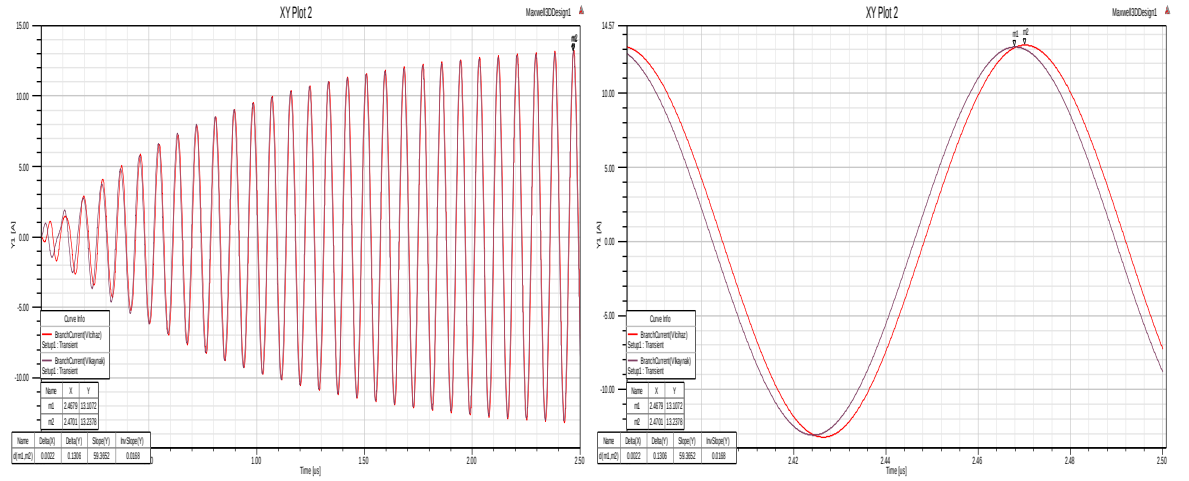
Şekil 4.37 Maxwell 3D ile 1cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu



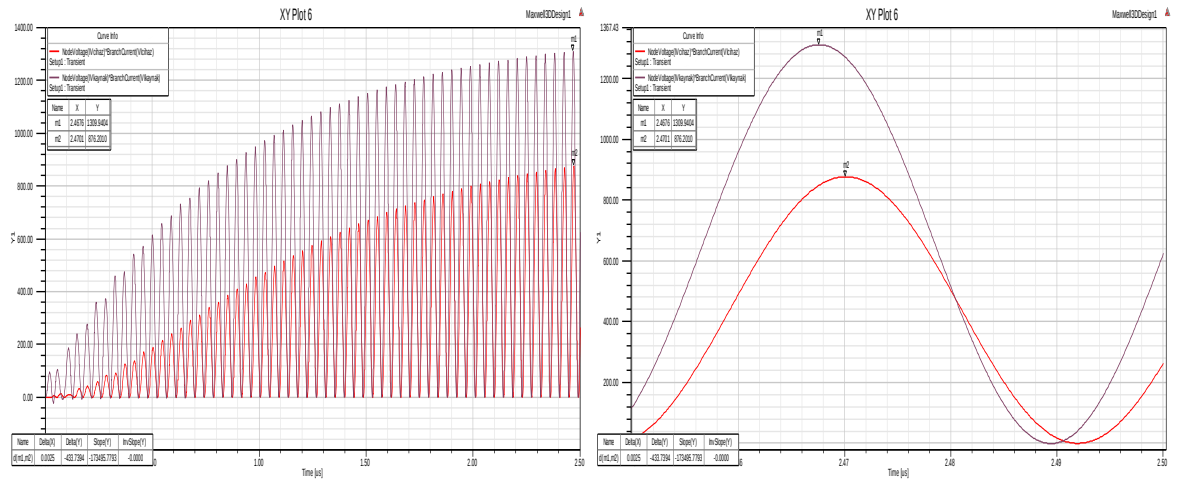
Şekil 4.38 Maxwell 3D ile 15 cm yarıçapında bobinin endüktansı ve 1cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı



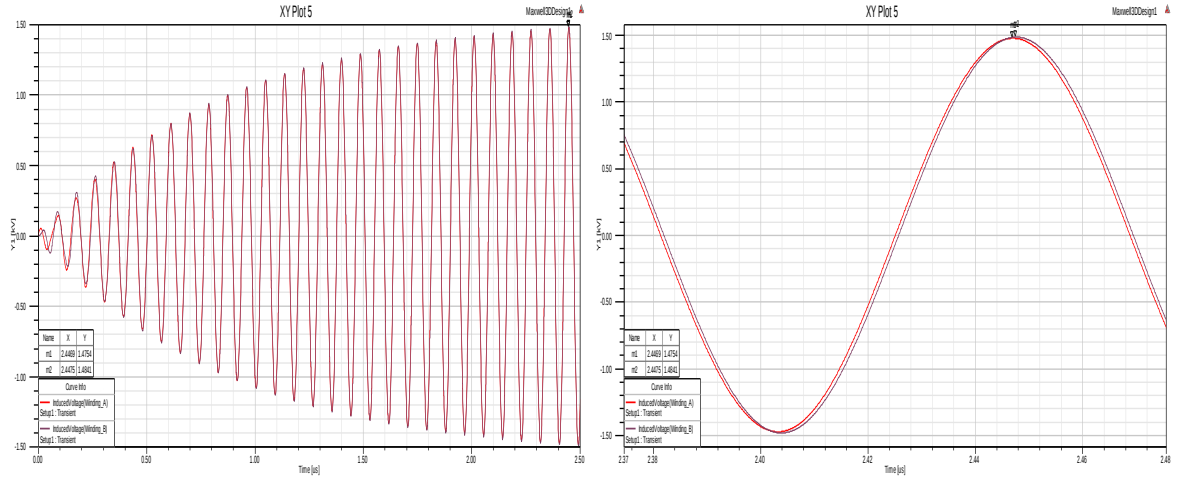
Şekil 4.39 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi



Şekil 4.40 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış akımı

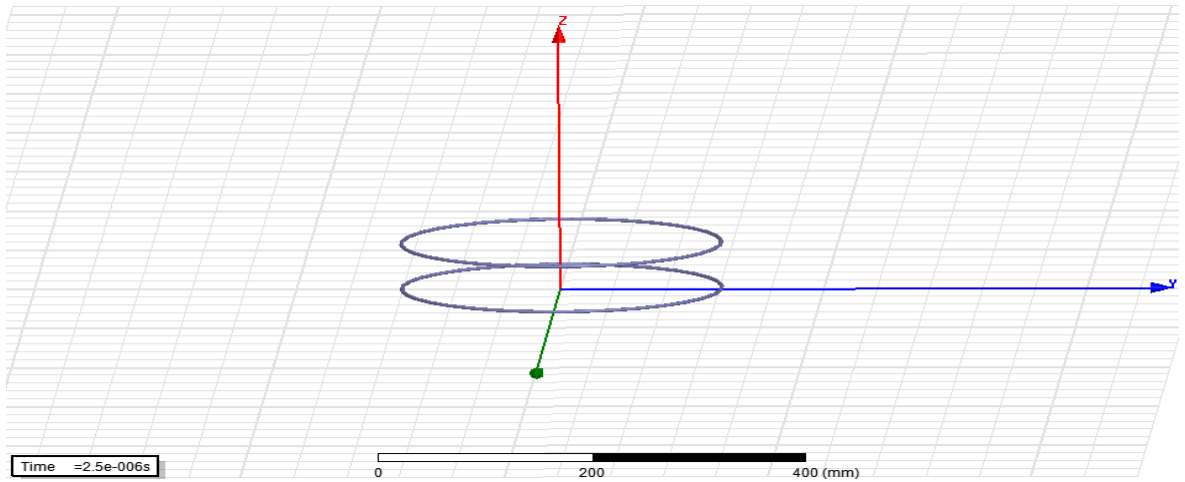


Şekil 4.41 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gücü

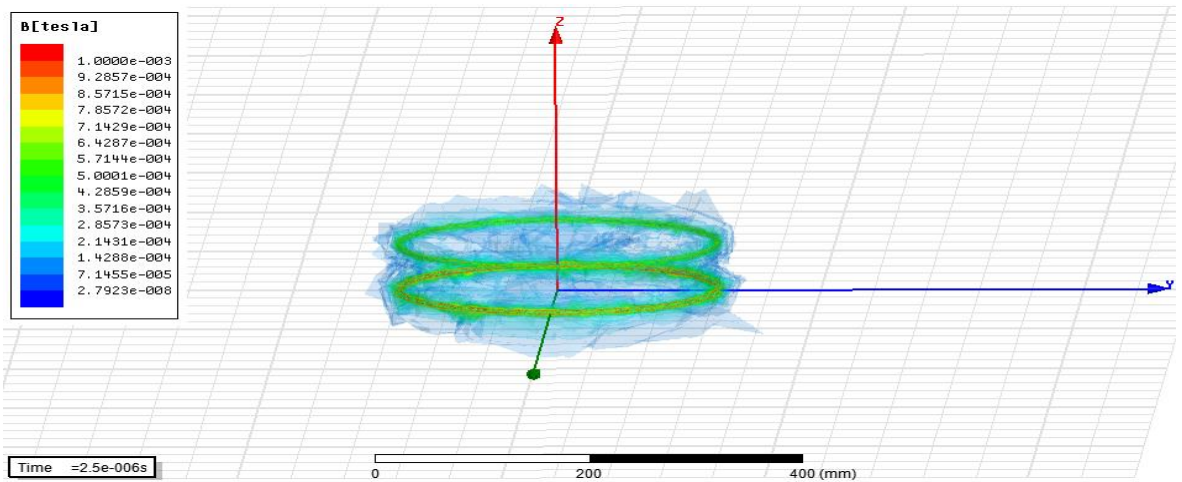


Şekil 4.42 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

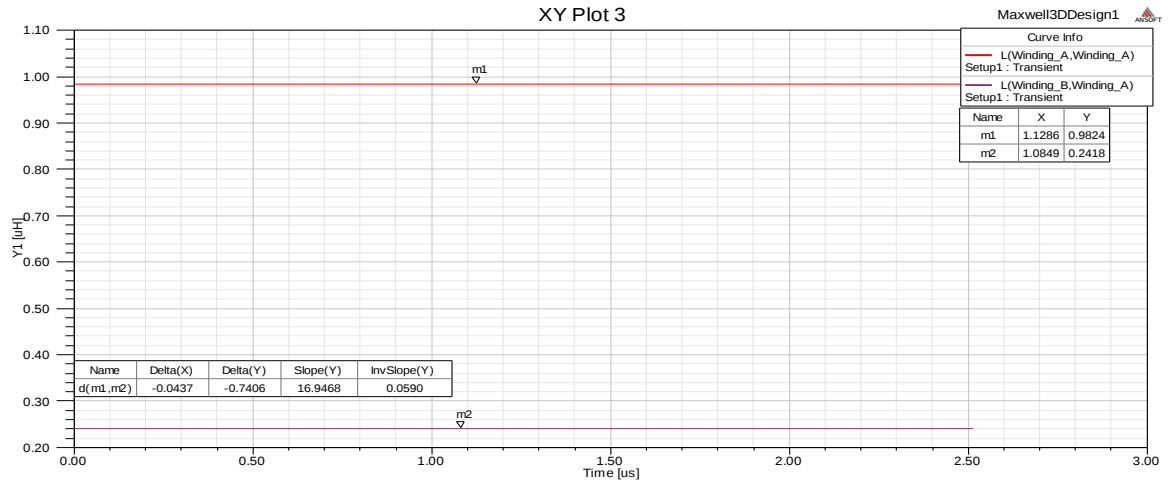
4.6.2 Hava aralığı 5 cm Z=5 Ω



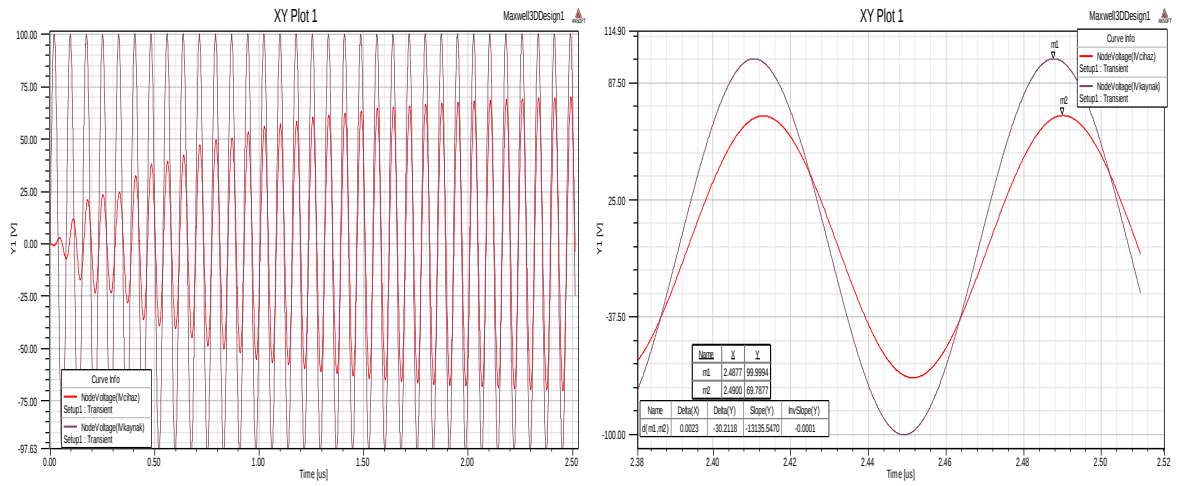
Şekil 4.43 Maxwell 3D ile 5cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler



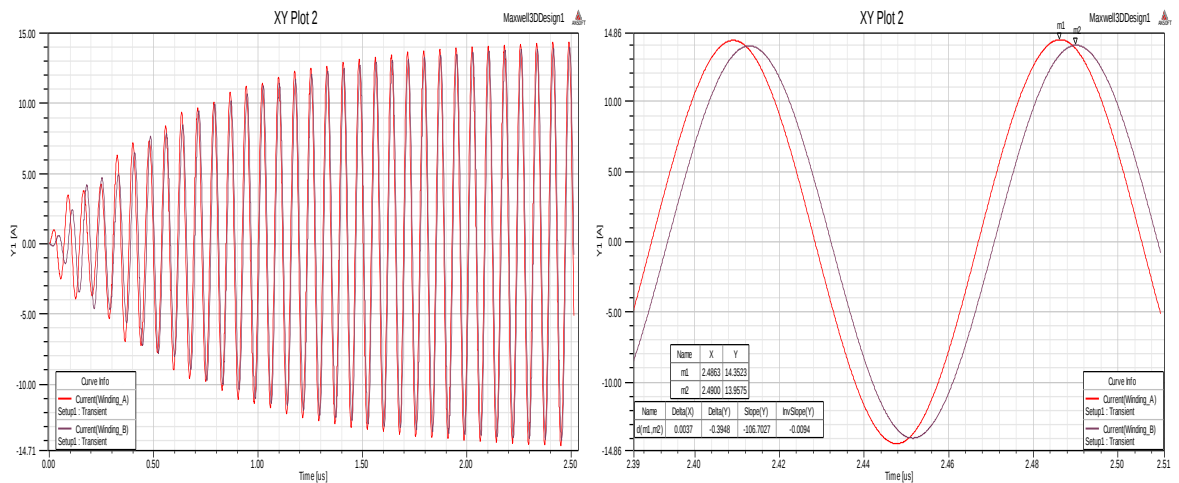
Şekil 4.44 Maxwell 3D ile 5cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu



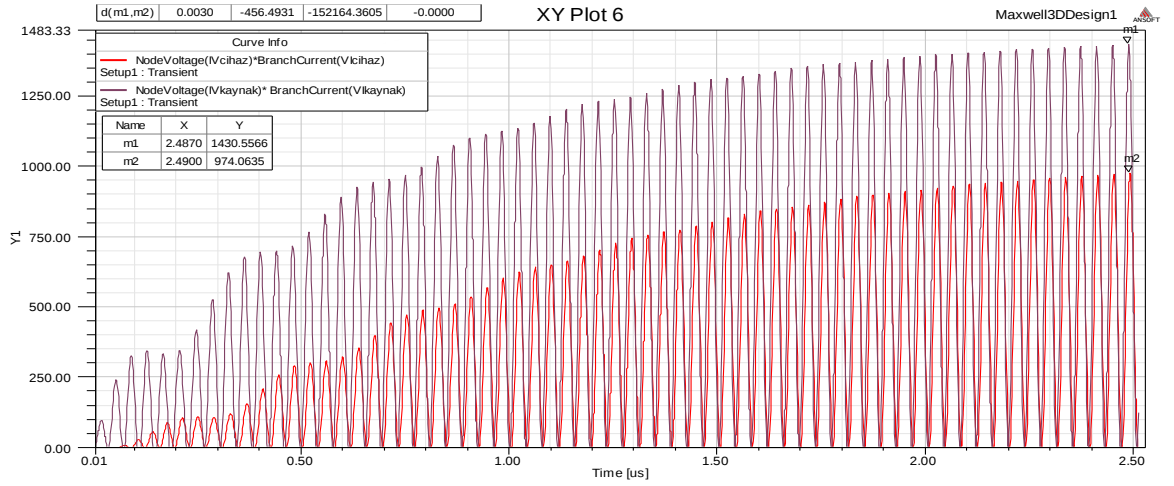
Şekil 4.45 Maxwell 3D ile 15 cm yarıcapında bobinin endüktansı ve 5cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı



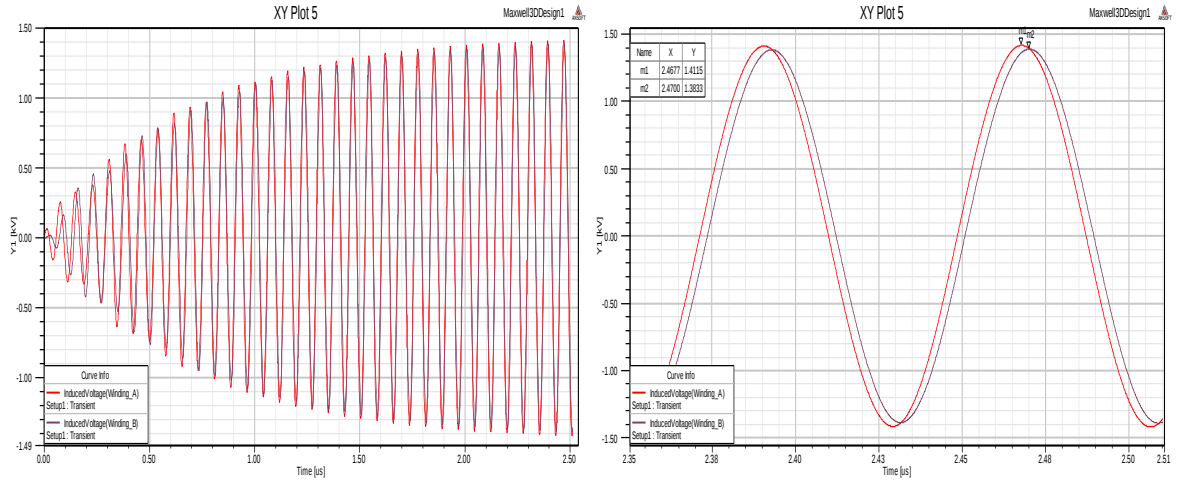
Şekil 4.46 Maxwell 3D 5cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi



Şekil 4.47 Maxwell 3D 5cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış akımı

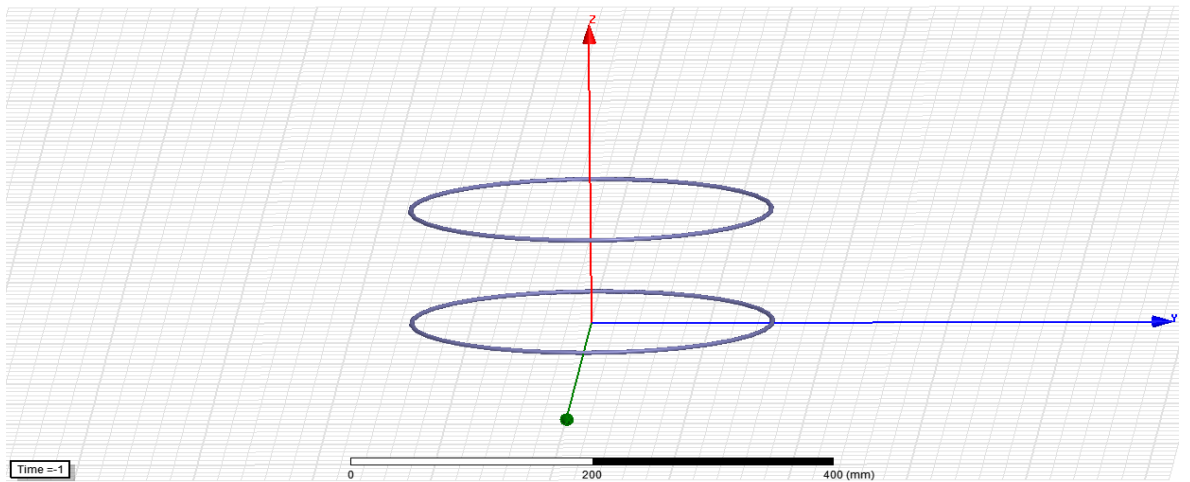


Şekil 4.48 Maxwell 3D 5cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gücü

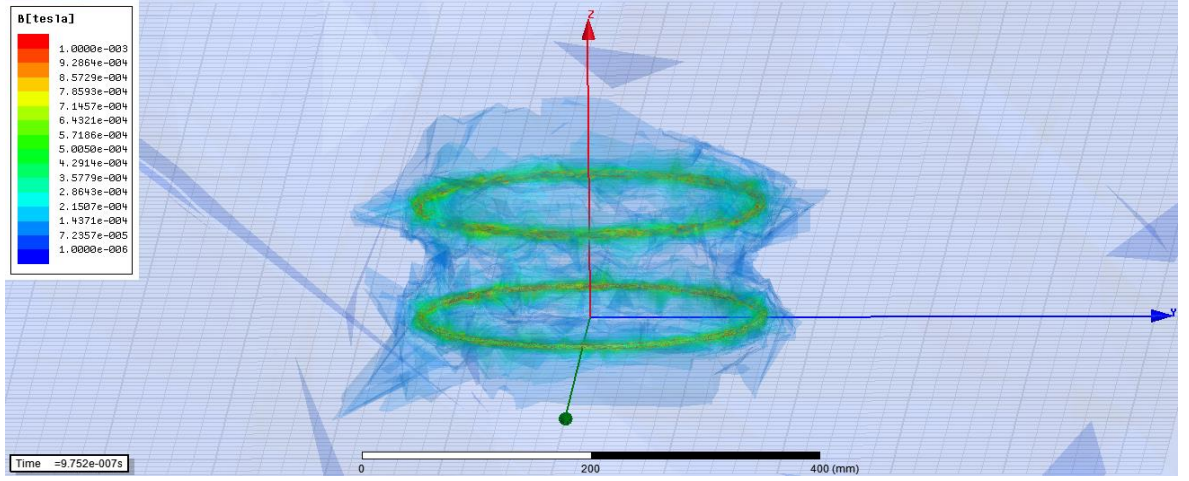


Şekil 4.49 Maxwell 3D 5cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

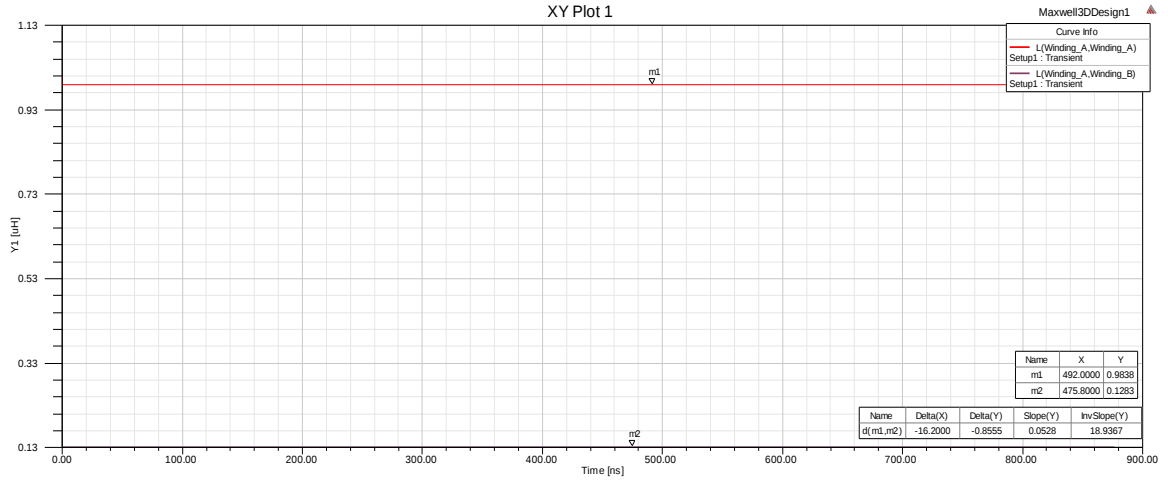
4.6.3 Hava aralığı 10 cm Z=5 Ω



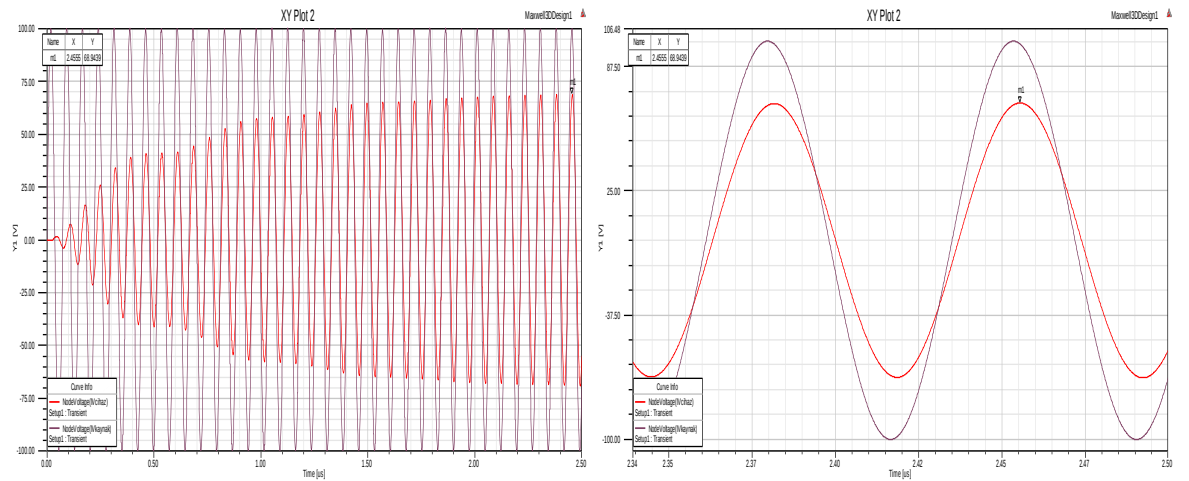
Şekil 4.50 Maxwell 3D ile 10cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler



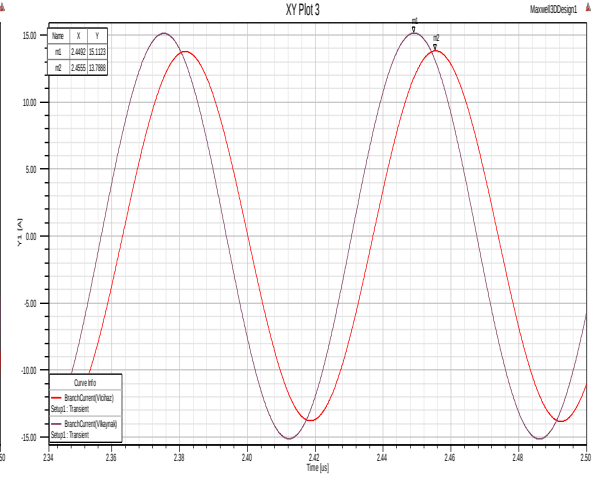
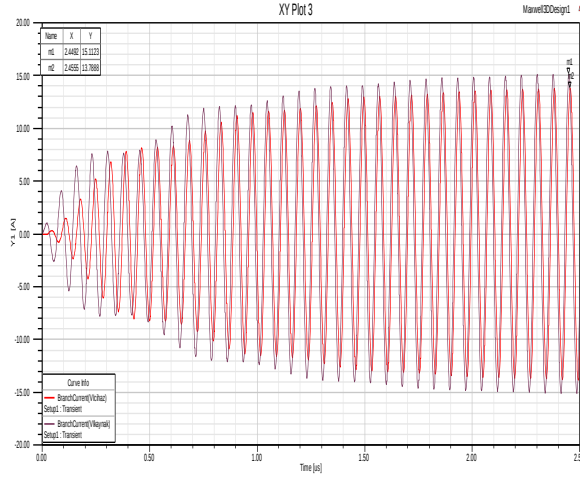
Şekil 4.51 Maxwell 3D ile 10cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu



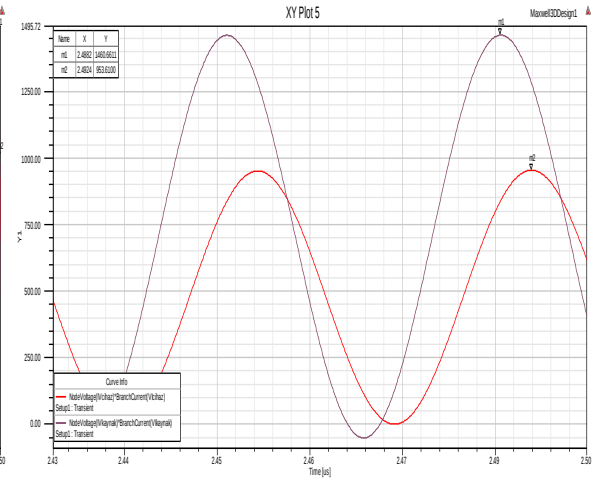
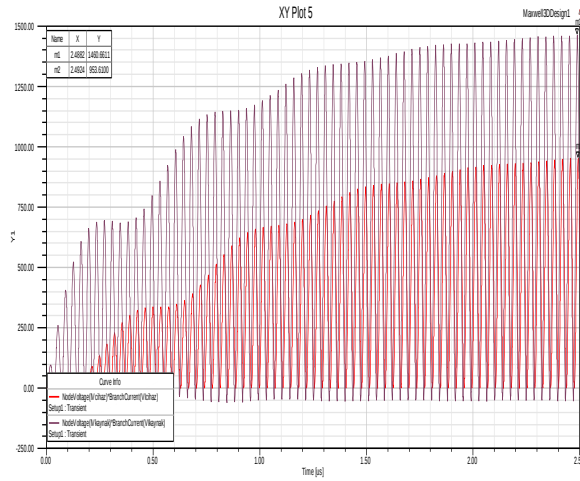
Şekil 4.52 Maxwell 3D ile 15 cm yarıcapında bobinin endüktansı ve 10cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı



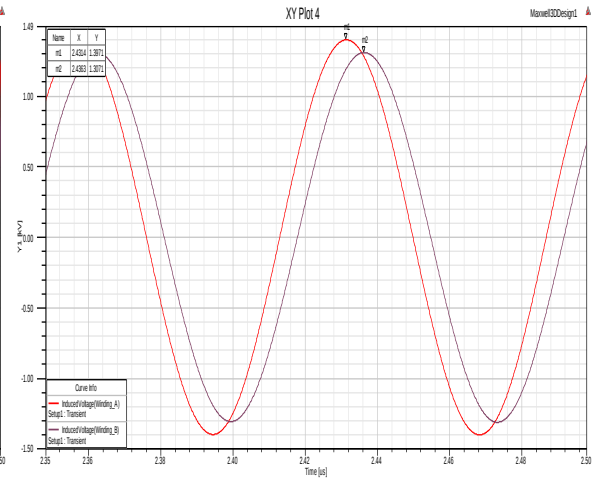
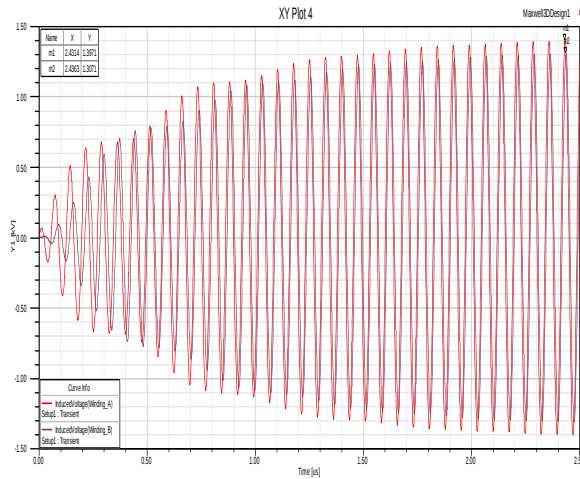
Şekil 4.53 Maxwell 3D 10cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi



Şekil 4.54 Maxwell 3D 10cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış akımı

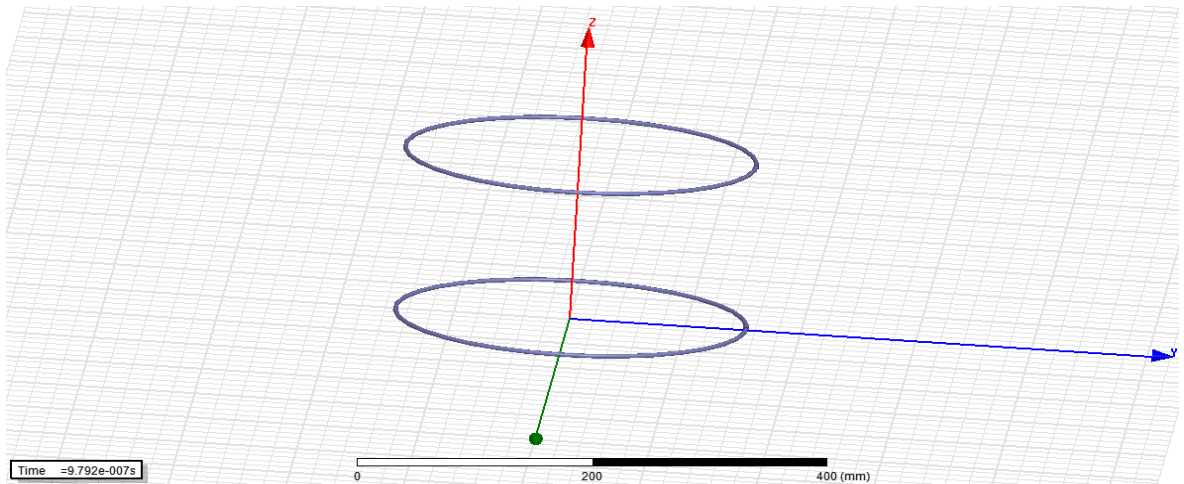


Şekil 4.55 Maxwell 3D 10cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gücü

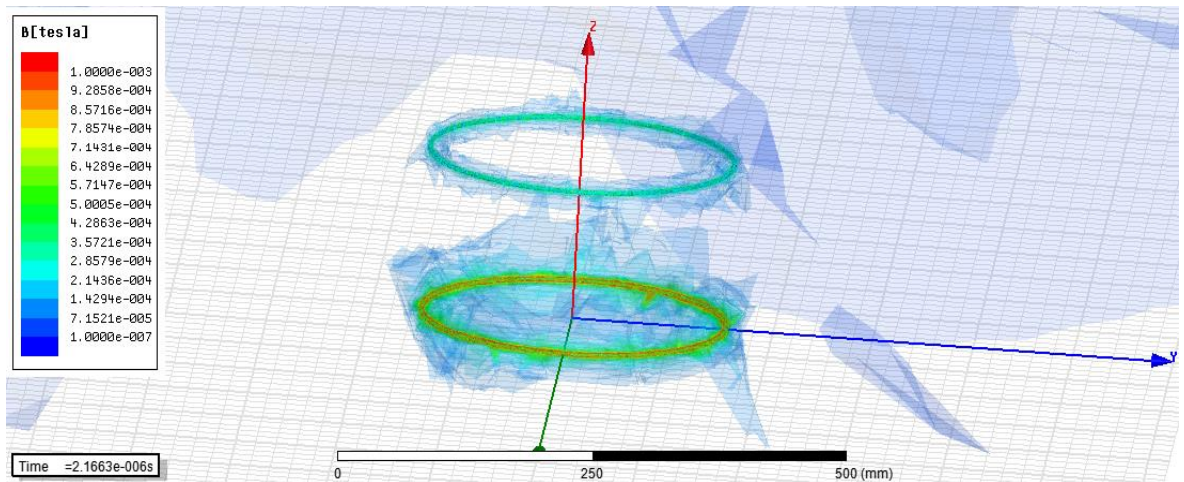


Şekil 4.56 Maxwell 3D 1cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

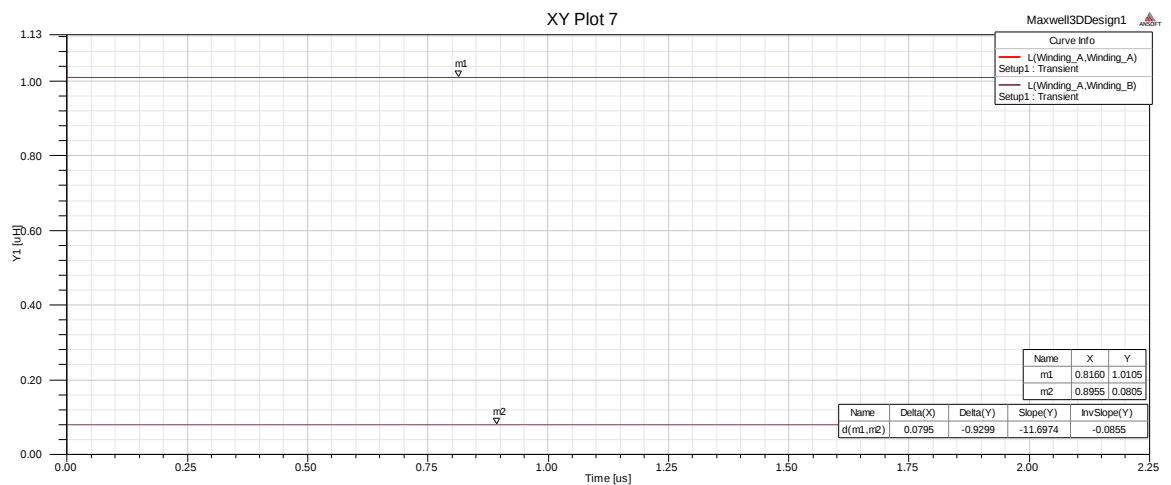
4.6.4 Hava araligi 15 cm Z=5 Ω



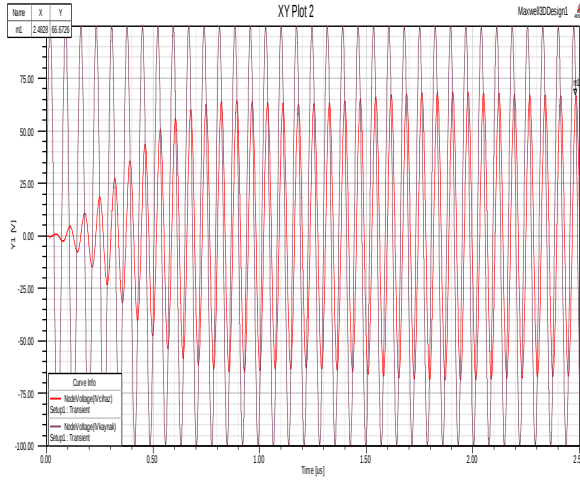
Şekil 4.57 Maxwell 3D ile 15cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler



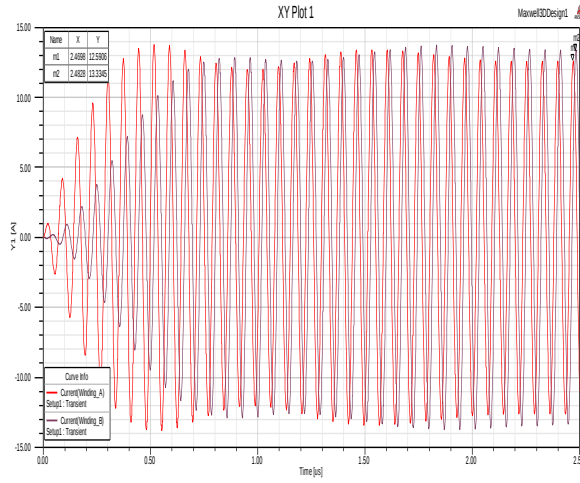
Şekil 4.58 Maxwell 3D ile 15cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu



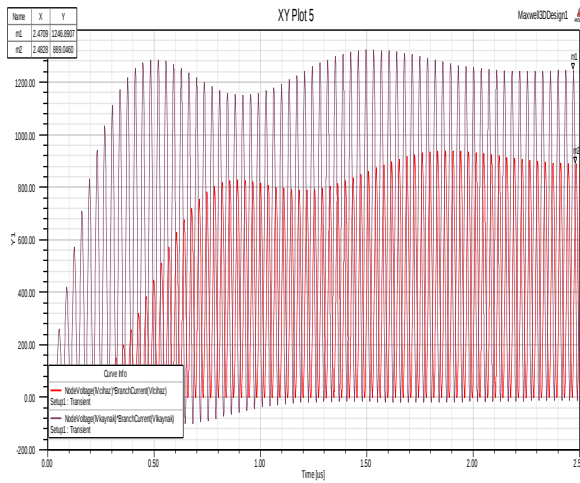
Şekil 4.59 Maxwell 3D ile 15 cm yarıcapında bobinin endüktansı ve 15cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı



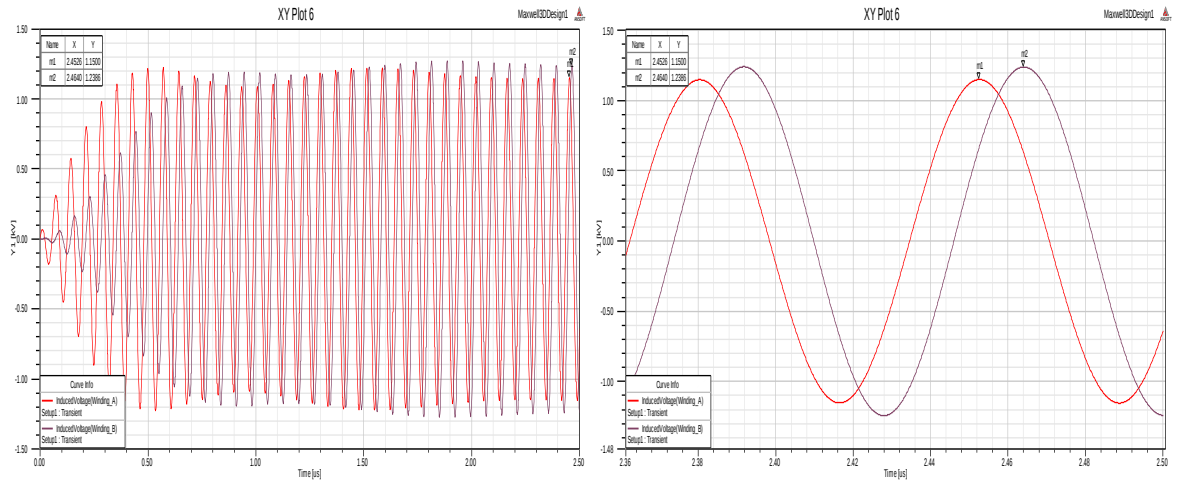
Şekil 4.60 Maxwell 3D 15cm hava aralığı ve 5Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi



Şekil 4.61 Maxwell 3D 15cm hava aralığı ve 5Ω yük için giriş ve çıkış akımı

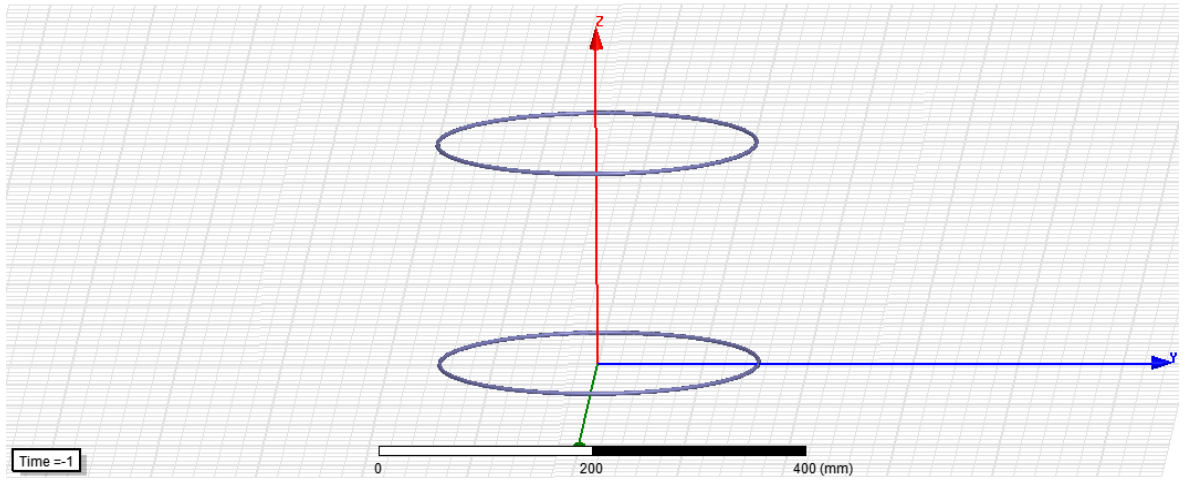


Şekil 4.62 Maxwell 3D 15cm hava aralığı ve 5Ω yük için giriş ve çıkış gücü

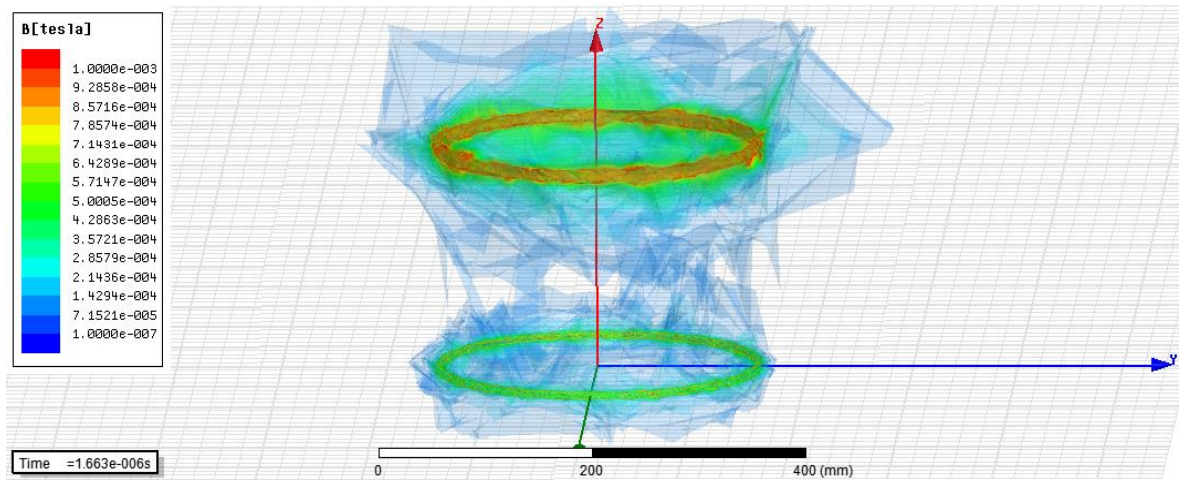


Şekil 4.63 Maxwell 3D 15cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

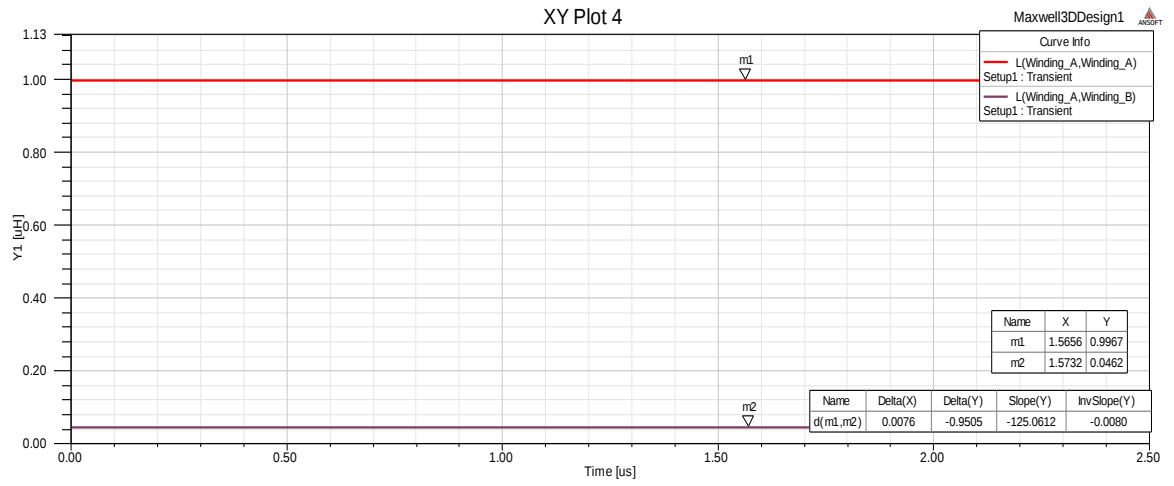
4.6.5 Hava araligi 20 cm Z=5 Ω



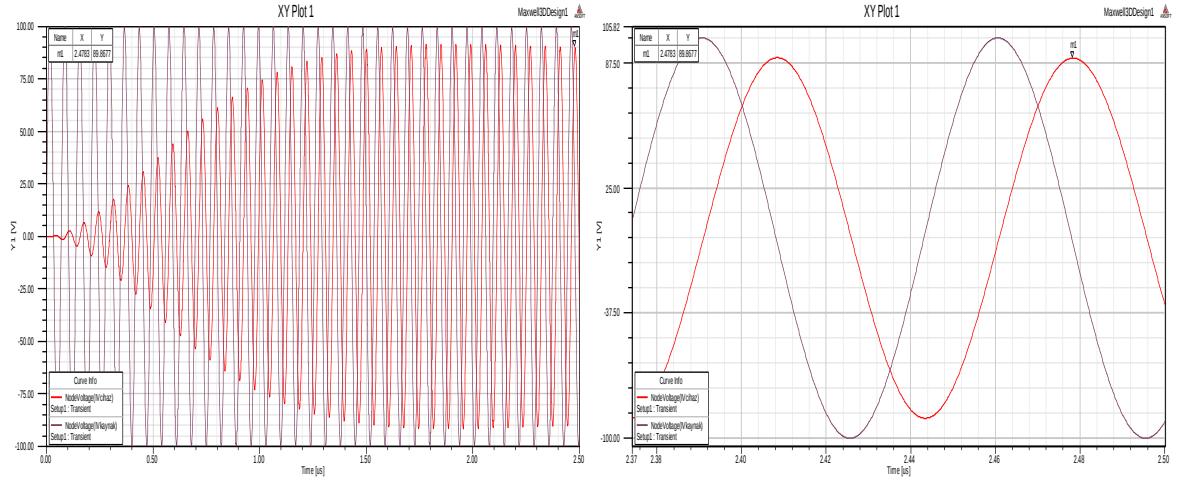
Şekil 4.64 Maxwell 3D ile 20cm hava aralığında alıcı ve verici bobinler



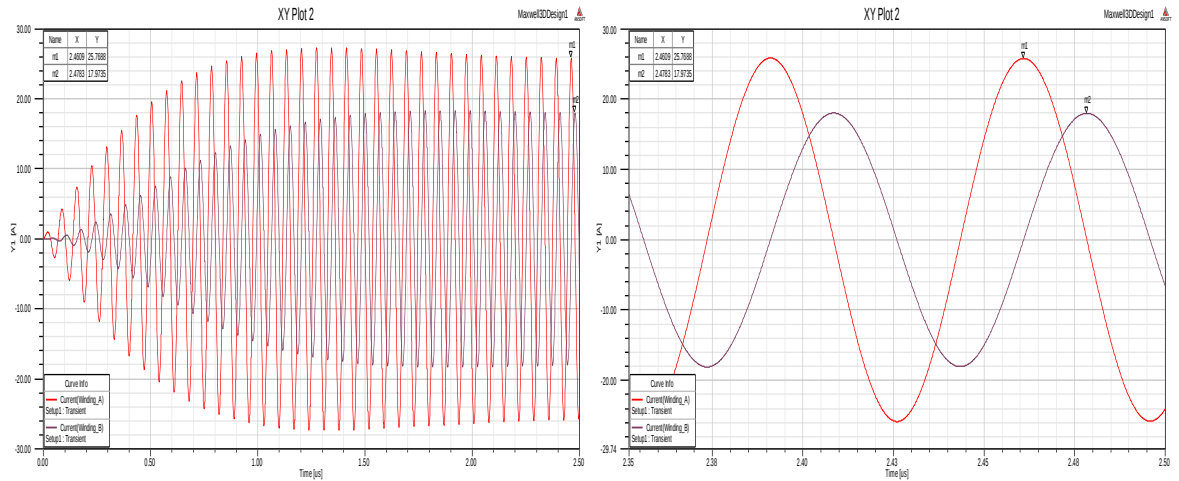
Şekil 4.65 Maxwell 3D ile 20cm hava aralığında alıcı ve verici bobini manyetik akı yoğunluğu



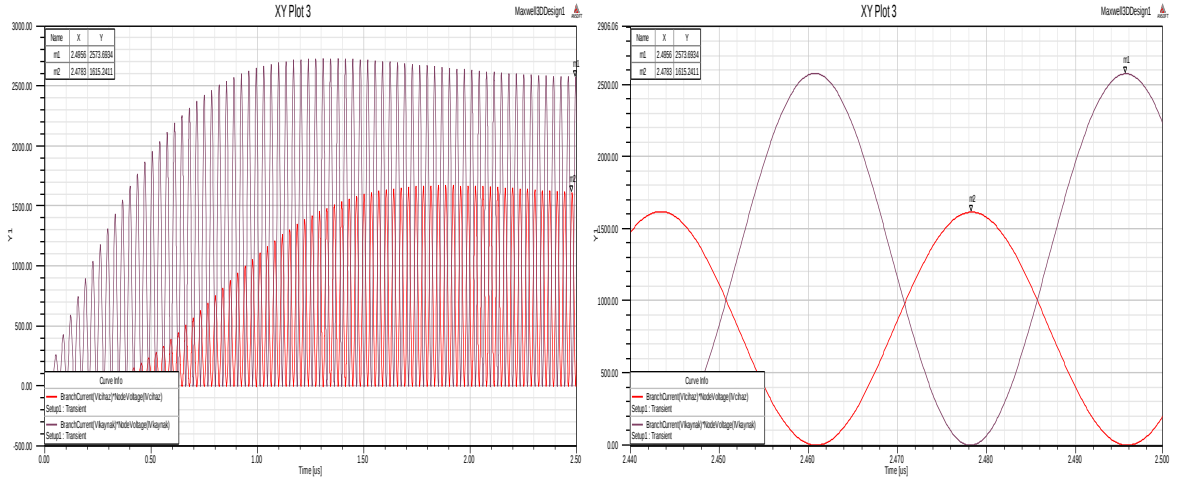
Şekil 4.66 Maxwell 3D ile 15 cm yarıcapında bobinin endüktansı ve 20cm hava aralığındaki bu iki bobinin karşıt endüktansı



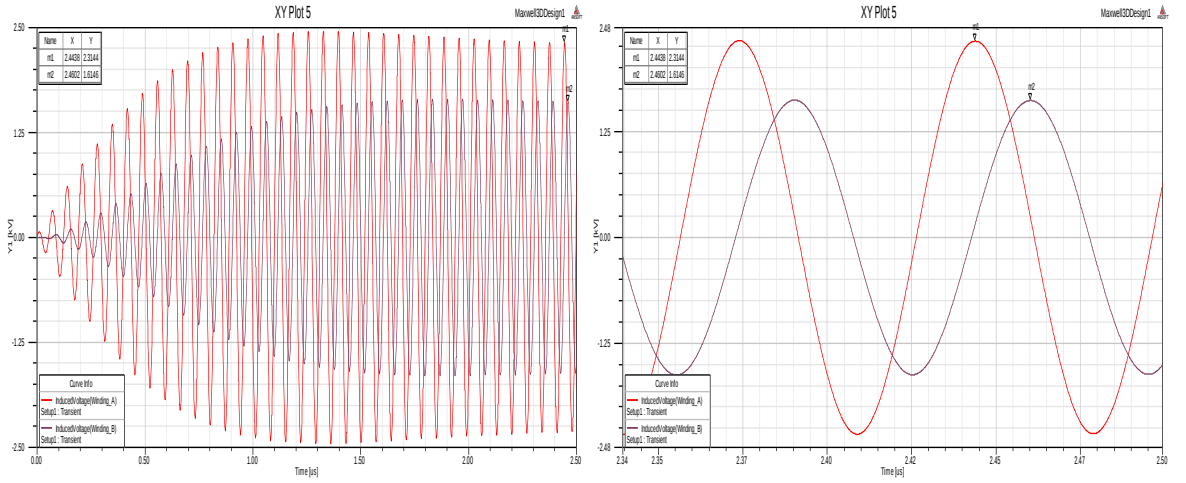
Şekil 4.67 Maxwell 3D 20cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gerilimi



Şekil 4.68 Maxwell 3D 20cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış akımı



Şekil 4.69 Maxwell 3D 20cm hava aralığı ve 5 Ω yük için giriş ve çıkış gücü



Şekil 4.70 Maxwell 3D 20cm hava aralığı ve 5 Ω yük için birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

4.7 Verim tablosu

Çizelge 4.2 Z=5 Ω için farklı hava aralıklarında verimin karşılaştırılması

	Hava aralığı				
Kullanılan programlar	1cm	5cm	10cm	15cm	20cm
MATLAB verim denklemi sonuçları	%91.7484	%91.7483	%91.7485	%91.7485	%87.1529
PSIM sonuçları	%90.9362	%91.9260	%91.9310	%91.8043	%89.8025
Maxwell 3D sonuçları	%66.8886	%67.7929	%65.2862	%71.3010	%62.7596

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, magnetik rezonanslı kuplaj yöntemi kullanılarak kablosuz enerji transferine ait benzetim çalışmaları yapılmış ve farklı simulasyon platformlarının farklı yetkin özellikleri kullanılarak KET sistemi oluşturulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir.

Maksimum verim ile hava aralığı arasındaki bağıntılar, manyetik rezonans kuplaj eşdeğer devre kullanılarak oluşturulmuştur. Bu denklemler ile çeşitli hava aralıkları ve farklı karakteristik empedanslar için devre parametrelerinin değişimine göre maksimum verimi sağlayan rezonans frekansları belirlenmiş ve yüksek verimli kablosuz enerji aktarımı sağlanmıştır.

İlk olarak 2mm yarıçaplı iletken kesitli, 15cm yarıçaplı dairesel 1 turluk dairesel alıcı ve verici bobin tasarlanmış ve Maxwell 3D programıyla sonlu elemanlar yöntemine göre bobinlerin endüktansları ve hava aralığı değişimine göre aralarındaki karşıt endüktanslar hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, bobin endüktansı yaklaşık 1uH olarak bulunmuştur. Karşıt endüktanslar; 1cm hava aralığı için 562.5 nH, 5cm hava aralığı için 241.8 nH, 10cm hava aralığı için 128.6 nH, 15cm hava aralığı için 80.5 nH, 20cm hava aralığı için 46.2 nH olarak hesaplanmıştır.

Kablosuz enerji aktarımını sağlayacak olan devre topolojisi için seri rezonans seçilmiştir. Alıcı ve verici bobinlere seri olarak 124 pF'lık kondansatörler bağlanmıştır. Alıcı rezonans devresinin ucuna seri bir karakteristik empedans ve verici rezonans devresinin başına ise yüksek frekanslı sinüzoidal kaynak yerleştirilerek Şekil 3.2'deki rezonans sistemi oluşturulmuştur. Yüksek frekanslı sinüzoidal kaynağın rezonans frekansı, çeşitli hava aralıkları ve çeşitli karakteristik empedanslar için, rezonans devresine ait denklem

(3.22)'de verilen verim denklemini maksimum yapan frekanslarda saptanmıştır. Çeşitli hava aralıklarına ve karakteristik empedanslara göre rezonans frekanslarının tablosu Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ayrıca farklı hava aralıklarında ve farklı karakteristik empedanslarda tek ve çift rezonans frekansı olduğu görülmüştür. Yakın mesafe uygulamalarda ve düşük karakteristik empedanslarda sistemin çift rezonansa girdiği gözlemlenmiştir. Mesafenin ve karakteristik empedansın artmasıyla sistemin tek rezonans frekansına geçtiği ve tek rezonans frekansındaki sistemlerde hava aralığı ile karakteristik empedansın daha da artmasıyla verimin hızlı bir şekilde düştüğü Şekil 4.1 ile gözlemlenmiştir.

Şekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8 ile çeşitli karakteristik empedanslarda; karşıt endüktansların ve frekansların oluşturduğu verimler 3 boyutlu grafiklerle incelenmiştir. Karakteristik empedansın 1Ω olduğu durumda sistemin en kararsız ve en verimsiz durum olduğu görülmüştür. Karakteristik empedansın arttıkça sistemin yüksek verimde çalışması için daha yüksek karşıt endüktans yani daha düşük hava aralıklarında çalışmak zorunda olduğu saptanmıştır.

Çalışmada PSIM programıyla magnetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarım sistemi ideal olarak modellenmiştir. $Z=5\Omega$ koşulu için 1cm, 5cm, 10cm, 15cm ve 20cm hava aralıklarında Çizelge 4.1'deki rezonans frekanslarına göre kaynak frekansları ayarlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca $Z=1\Omega$, $Z=10\Omega$, $Z=25\Omega$, $Z=50\Omega$ ve $Z=100\Omega$ karakteristik empedansları için 1cm, 5cm, 10cm, 15cm ve 20cm hava aralıklarındaki simülasyon sonuçları EK-B içerisinde verilmiştir. PSIM simülasyonlarında; giriş ile çıkış gücü, giriş gerilimi ile çıkış gerilimi, giriş ile çıkış akımları, birincil ile ikincil sargılarda endüklenen uç gerilimleri ve birincil taraf ile ikincil taraf kondansatörlerin uç gerilimleri arasındaki ilişki gözlemlenmiştir.

Maxwell 3D programında magnetik rezonanslı kuplaj kablosuz enerji aktarım sistemi sonlu elemanlar yöntemiyle (FEM) çözdürülmüştür. $Z=5\Omega$ koşulu için 1cm, 5cm, 10cm, 15cm ve 20cm hava aralıklarında Çizelge 4.1'deki rezonans frekanslarına göre kaynak frekansları ayarlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Maxwell 3D simülasyonlarında; giriş ve çıkış gücü arasındaki ilişki, giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki, giriş ve çıkış akımları arasındaki ilişki ve birincil ile ikincil sargılarda endüklenen uç gerilimleri arasındaki ilişki

arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Ayrıca 3 boyutlu düzlemde alıcı ile verici bobinin ve havanın manyetik akı yoğunluğu gösterilmiştir.

Son olarak $Z=5\Omega$ için MATLAB verim denklemi sonuçları, PSIM simülasyonundan alınan verim sonuçları ve Maxwell 3D programından alınan verim sonuçları Çizelge 4.2’de karşılaştırılmıştır. MATLAB verim denklemi sonuçları, tamamen teorik sistemin eşdeğer devresine göre çıkartılan verim denkleminde hesaplanmıştır. Çizelge 4.2 incelendiğinde PSIM programının sonuçları da MATLAB verim denklemiyle elde edilen sonuçlar ile çok yakındır. Çünkü PSIM simülasyon platformu, bütün elemanları ideal kabul edilerek sistemi çözmektedir. Ancak Maxwell 3D’ye göre verim sonuçları, PSIM ve MATLAB sonuçlarına göre biraz daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi, MATLAB verim denkleminde ve PSIM simülasyon platformunda sistemin hesaplanmayan yüksek frekanstaki deri etkisi kayıpları ve yakınlık etkisi kayıplarıdır.

Bu çalışmada magnetik rezonanslı kuplaj ile kablosuz enerji aktarımı teorik olarak ve çeşitli gerçeğe en yakın simülasyon programlarıyla 1cm ile 20 cm hava aralığı için farklı karakteristik empedanslarda incelenmiştir. Hava aralığının ve karakteristik empedansın verime etkileri gözlemlenmiştir.

Bu çalışma sayesinde KET sistemler için rezonans frekansın saptanmasının önemi görülmüş ve diğer frekanslardaki verimin değişimi gözlemlenmiştir. KET sistemler için frekans kontrolünün gerekliliği ortaya çıkmıştır. İlerideki çalışmalara yönelik KET sistemler için değişken hava aralığı ve değişken karakteristik empedans için uygun rezonans frekansını yakalayacak algoritmalar geliştirmek gerekmektedir.

PSIM ve Maxwell 3D sonuçları incelendiğinde yüksek kalite faktöründen dolayı kondansatör gerilimin giriş gerilimine göre çok yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu tip yüksek kalite faktörlü çalışmalar için yüksek çalışma gerilimine sahip kondansatörler seçilmelidir. Kondansatör gerilim değeri seçilirken denklem (3.7) dikkate alınmalıdır. Ayrıca yüksek verimli bir çalışma için; kalite faktörü yüksek seçilirken, kondansatör uçlarındaki geriliminin kalite faktörü üst limitini sınırlayıcı bir etken olarak dikkate alınması ve KET sisteminin bu kıstaslara göre tasarlanması gerekmektedir.

- [1] Tesla, N., (1900)“Apparatus for Transmission of Electrical Energy”, U.S. Patent No. 649,621, May 15, 1900.
- [2] Tesla, N., (1901)“Means for Increasing the Intensity of Electrical Oscillations,” U.S. Patent No. 685,012, Oct. 22, 1901.
- [3] Tesla, N., (1905) “Art of Transmitting Electrical Energy through Natural Mediums,” U.S. Patent No. 787,412, April 18, 1905.
- [4] Brown, W. C., (1965) “Experimental Airborne Microwave Supported Platform,” Raytheon Co Burlington, MA Microwave and Power Tube Div, Dec. 1965.
- [5] Sahai, A. ve Graham, D., (2011). “Optical wireless power transmission at long wavelengths”, IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), Santa Monica, 2011, 164–170.
- [6] Zaho, J., (2012).“A Contrastive Studies between Magnetic Coupling Resonance and Electromagnetic Induction in Wireless Energy Transmission”, Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF), Dalian-China, 2012, 1-4
- [7] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, ve M. Soljacic, (2007). “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” Science, 317, 83–86,
- [8] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, ve M. Soljacic, (2008). “Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer,” Ann. Phys., 323, 34–48,
- [9] Neves, A., Sousa, D.M., Roque A., ve Terras, J.M., (2011)“Analysis of an inductive charging system for a commercial electric vehicle”, Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on, Birmingham, 2011, 1-10
- [10] Thrimawithana, D.j., Madawala U.K., (2010). “A primary side controller for inductive power transfer systems”, Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, Vi a del Mar, 661-666
- [11] Wang C., Cpv,c G.A., ve Stielau O.H., (2004). “Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 51(1): 148-157

- [12] Low, Z.N., Casanova, J.J., Maier, P.H., ve Taylor, J.A., (2010) "Method of Load/Fault Detection for Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System With Power Delivery Tracking", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(4): 1478-1486
- [13] Sample A.P., Mayer D.A, ve Smith J.R., (2011). "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 58(2): 544-554
- [14] Imura T. ve Hori Y., (2011). "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58(10): 4746-4752
- [15] Koma, R., Nakamura, S., Ajisaka, S., ve Hashimoto, H., (2011) "Basic Analysis of the Circuit Model Using Relay Antenna in Magnetic Resonance Coupling Position Sensing System", *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*, Budapest, 25-30
- [16] Cannon B.L., Hoburg J.F., Stancil D.D., ve Goldstein S.C., (2009). "Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 24(7): 1819-1825
- [17] Cheon, S., Kim, Y.H., Kang, S.Y., ve Lee, M.L., (2011). "Circuit-Model-Based Analysis of a Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 58(7): 2906-2914,
- [18] Ho, S.L., Wang J., Fu, W.N., ve Mingui, S., (2011). "A Comparative Study Between Novel Witricity and Traditional Inductive Magnetic Coupling in Wireless Charging", *Magnetics, IEEE Transactions on*, 47(5): 1522-1525,
- [19] Kusaka, K.; Itoh, J., (2012)"Input impedance matched AC-DC converter in wireless power transfer for EV charger," *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012 15th International Conference on* , 1-6
- [20] Nam, I.; Dougal, R.; Santi, E.,(2012) "Novel control approach to achieving efficient wireless battery charging for portable electronic devices," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE* , 2482-2491
- [21] Zhang Chao; Guoqiang Liu; Xiaoyu Xu; Huijuan Bai; Yanhong Li; Yan Zhuo,(2012) "Simulations and Experiments on Cubic Film Resonator for Wireless Energy Transfer System," *Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF), 2012 Sixth International Conference on*, 1-4
- [22] Phokhaphan, N.; Choeisai, K.; Noguchi, K.; Araki, T.; Kusaka, K.; Orikawa, K.; Itoh, J.-I., (2013) "Wireless power transfer based on MHz inverter through PCB antenna," *Future Energy Electronics Conference (IFEEC), 2013 1st International* , 126-130
- [23] Christ, A.; Douglas, M.G.; Roman, J.M.; Cooper, E.B.; Sample, A.P.; Waters, B.H.; Smith, J.R.; Kuster, N., (2013) "Evaluation of Wireless Resonant Power Transfer Systems With Human Electromagnetic Exposure Limits," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on* , 55(2):265-274,
- [24] Like Gao; Wenshan Hu; Xiongwei Xie; Qijun Deng; Zhiding Wu; Hong Zhou; Yan Jiang,(2013) "Optimum design of coil for wireless energy transmission system based on

resonant coupling," Control and Automation (ICCA), 2013 10th IEEE International Conference on, 190-195

[25] Dukju Ahn; Songcheol Hong,(2014) "A Transmitter or a Receiver Consisting of Two Strongly Coupled Resonators for Enhanced Resonant Coupling in Wireless Power Transfer," Industrial Electronics, IEEE Transactions on ,61(3), 1193-1203

[26] Tesla, N., (1908). "The Future of the Wireless Art," Wireless Telegraphy and Telephony, 67-71

[27] Berkeley University,

<http://www.path.berkeley.edu/PATH/Publications/PDF/PRR/94/PRR-94-07.pdf>, 24 Mayıs 2014.

[28] Primove Şirketi <http://primove.bombardier.com/application/light-rail/>, 24 Ocak 2014.

[29] J.D. Joannopoulos, A. Karalis, ve M. Soljacic, (2007). "Wireless Non-Radiative Energy Transfer", U.S. Patent Numbers 7,741,734; 8,022,576; 8,084,889; and 8,076,800

[30] A. Karalis, A.B. Kurs, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P.H. Fisher, ve M. Soljacic, (2007). "Wireless Energy Transfer", U.S. Patent Numbers 7,825,543 and 8,097,093.

[31] A. Karalis, R.E. Hamam, J.D. Joannopoulos, ve M. Soljacic, (2007). "Wireless Energy Transfer Including Interference Enhancement", U.S. Patent Number 8,076,801.

[32] B. Fincan ve Ö. Üstün, (2012) "Kablosuz Enerji Transferinde Bazı Kısıtlar ve Çözümler", ELECO Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 455-459

MATLAB Sonuçları

A-1 MATLAB ile U fonksiyona göre optimum enerji aktarımı verimi grafiği kodları

```
clc

clear all

f=0

while f<1000

    f=f+1;

    u=f*0.1;

    %y(f)=(f*0.1);

    y(f)=log10(f*0.1);

    s(f)=(u^2)/((1+sqrt(1+(u^2)))^2);

    f2(f)=f;

end

s;

f2=f2;

plot(y,s)

xlabel('U(10^x)')

ylabel('^n opt')
```

A-2 MATLAB ile verim denklemi ve grafikleri

```
clc

clear all
```

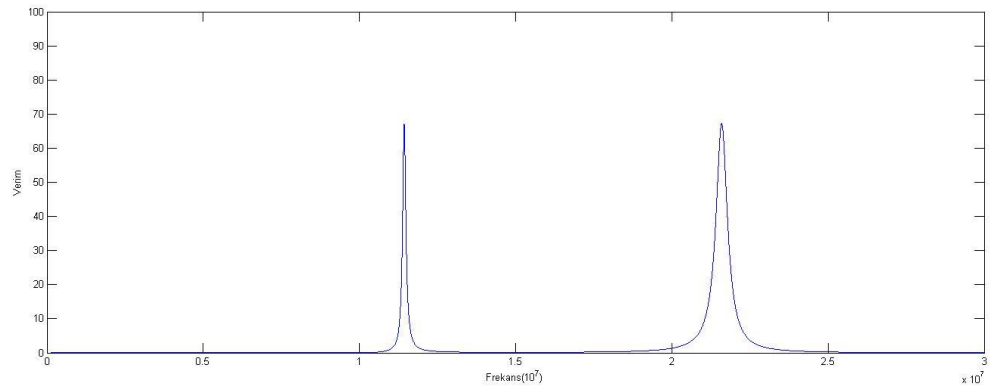
```

Lm=input(' Karşıt endüktans değeri giriniz ')
R=input(' iç direnç değeri giriniz ');
L=input(' endüktans değeri giriniz ');
Zc=input(' karakteristik empedans değeri giriniz ');
C=input(' kondansatör değeri giriniz ');
f=0
while f<30000
    f=f+1
    w=2*pi*f*1000;
    s(f)=100*abs((((i*w*Lm)/(i*w*L+(1/(i*w*C))+Zc+R))^2)*(Zc/((1/(i*w*C))+i*(L-
Lm)*w+R+(((i*Lm*w)*(i*(L-Lm)*w+(Zc+R+(1/(i*w*C)))))/(i*L*w+(Zc+R+(1/(i*w*C)))))))));
    f2(f)=f;
end
s;
f2=f2*1000;
plot(f2,s)
xlabel('Frekans(10^7)')
ylabel('Verim')
Lm

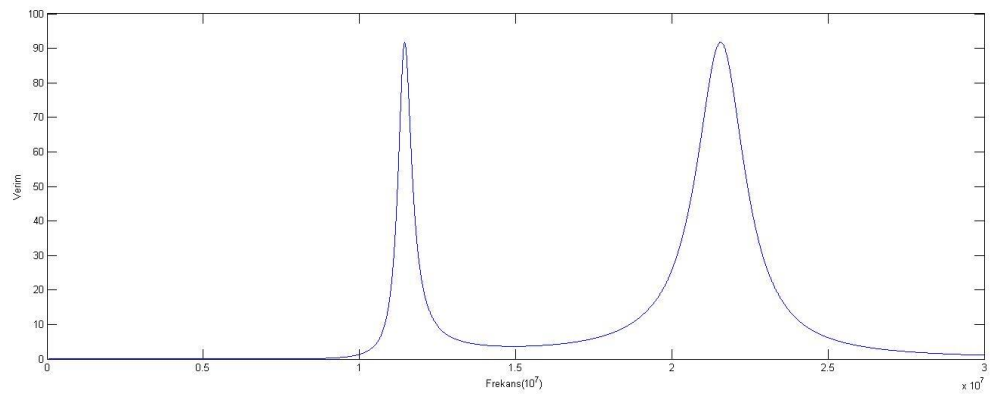
```

1) Hava aralığı:1cm, $L=1004 \text{ nH}$, $C=124 \text{ pF}$, $L_m=562.5 \text{ nH}$ $R=0.22 \Omega$

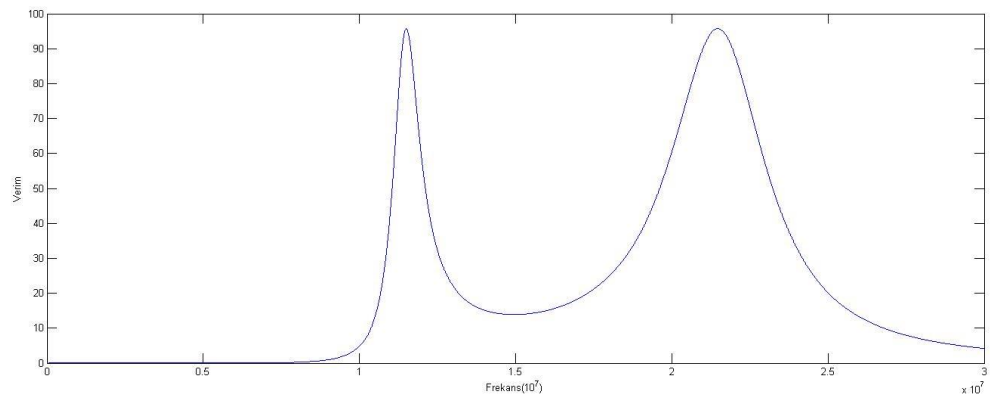
a) $z=1$



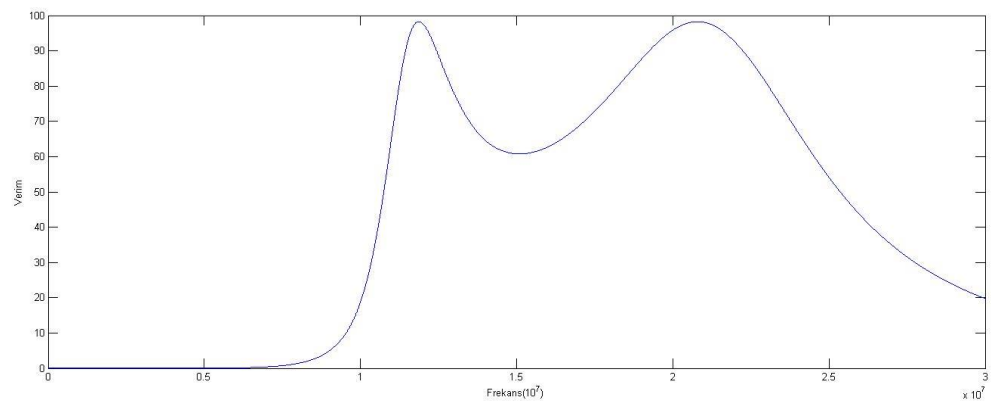
b) $z=5$



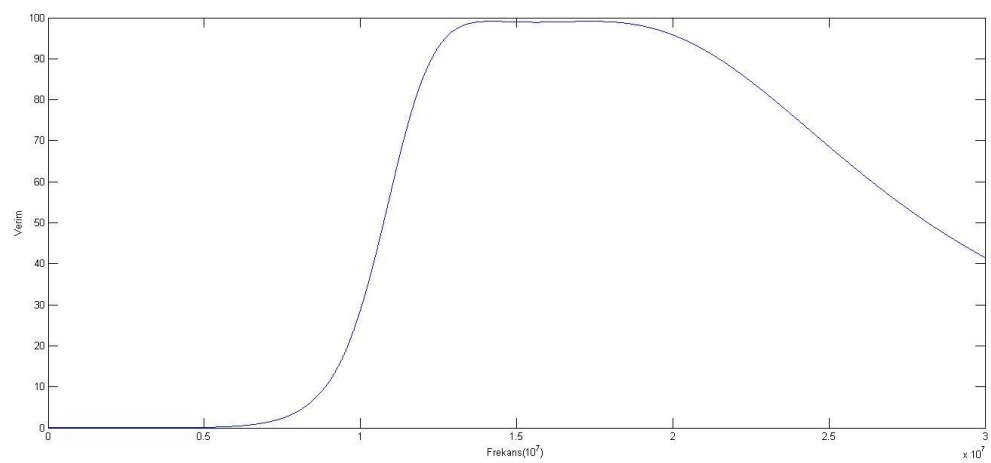
c) $z=10$



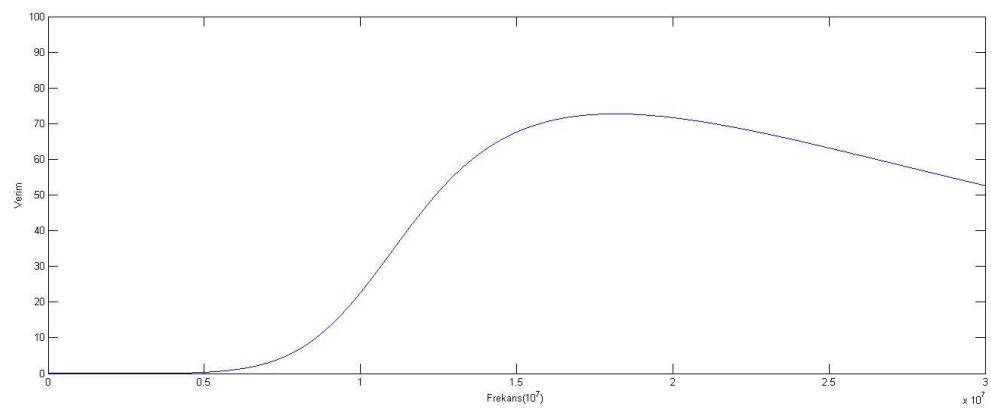
d) $z=25$



e) $z=50$

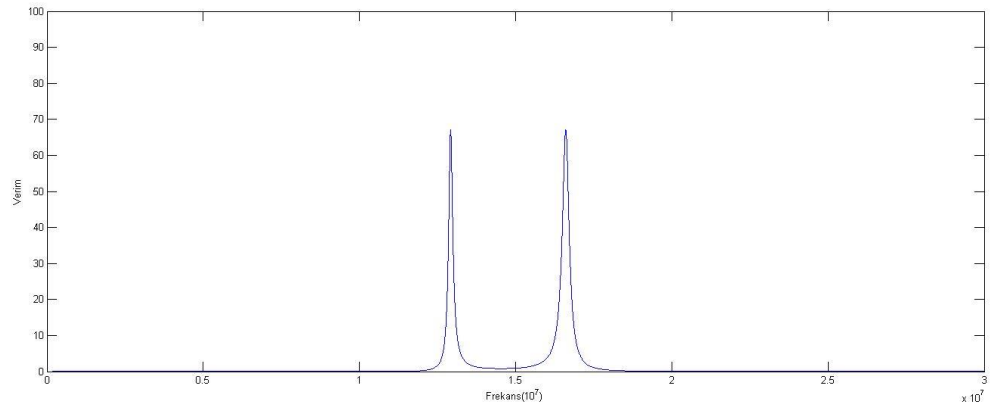


f) $z=100$

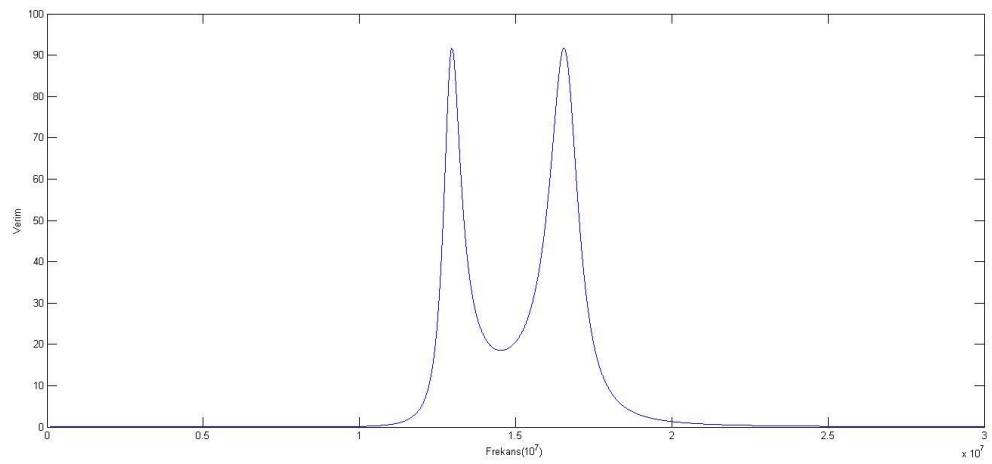


2) Hava aralığı:5cm, $L=982.4$ nH, $C=124$ pF, $L_m=241.8$ nH $R=0.22$ Ω

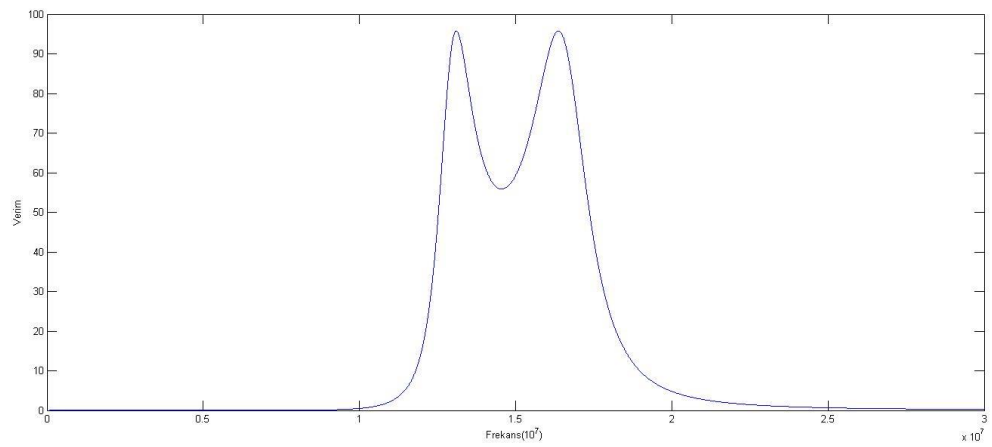
a) $z=1$



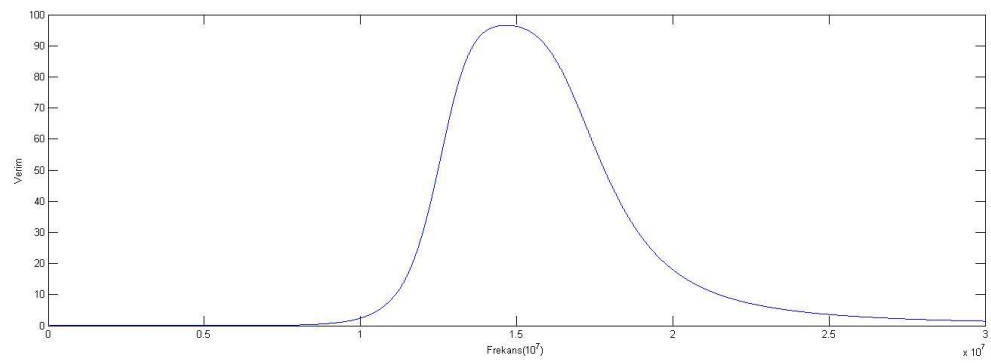
b) $z=5$



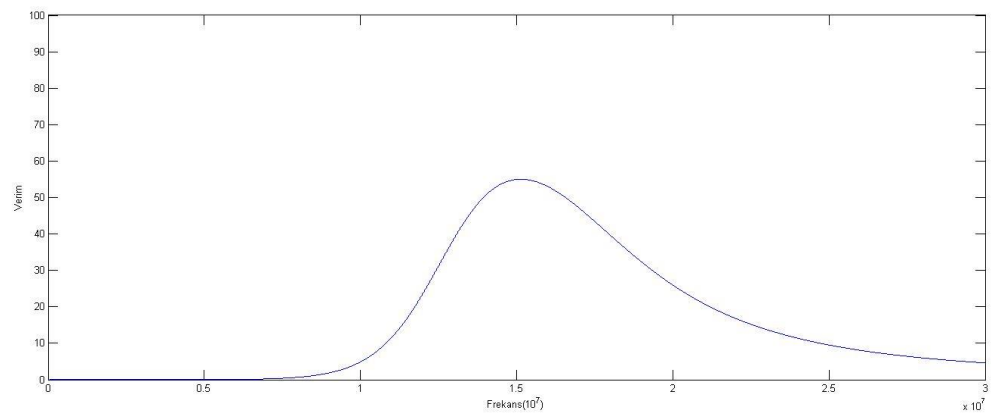
c) $z=10$



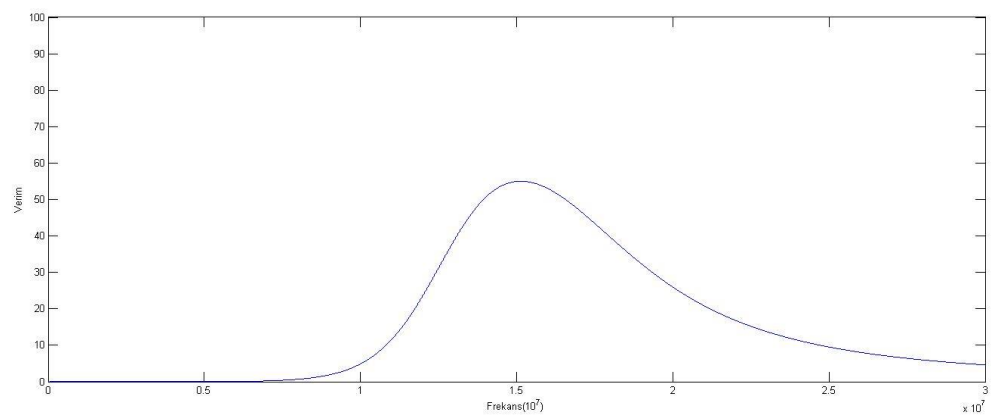
d) $z=25$



e) $z=50$

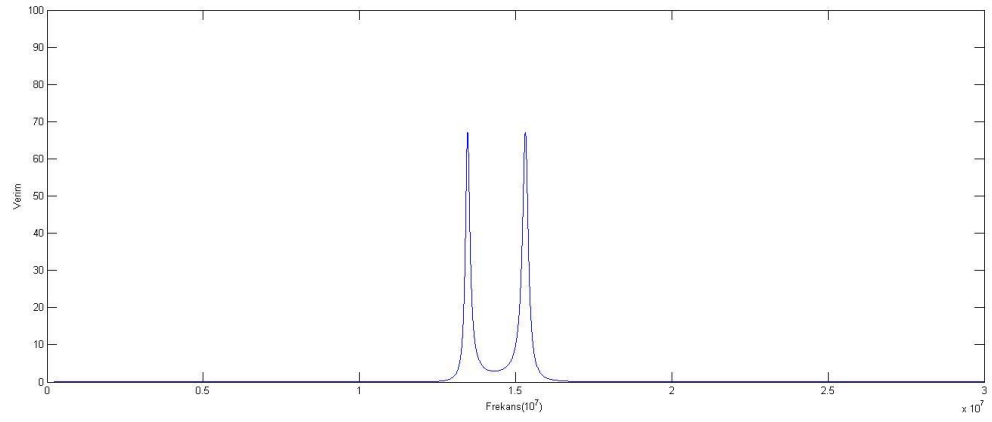


f) $z=100$

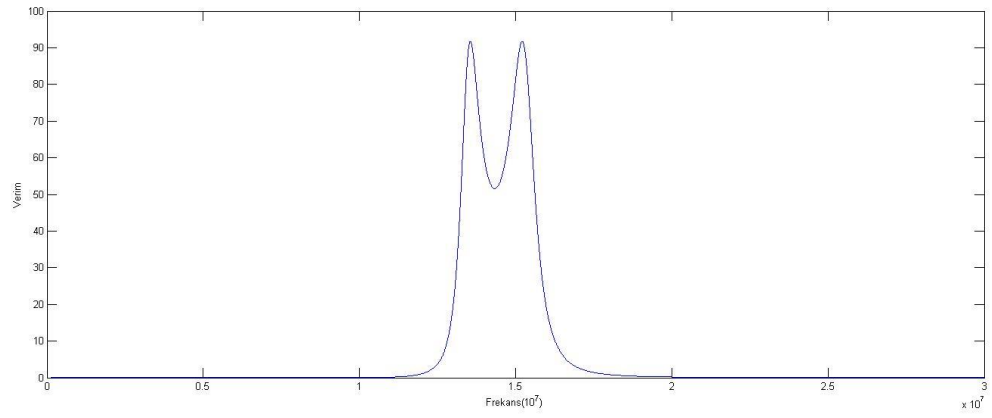


3) Hava aralığı:10cm, L=999.2 nH, C=124 pF, Lm=128.6 H R=0.22 Ω

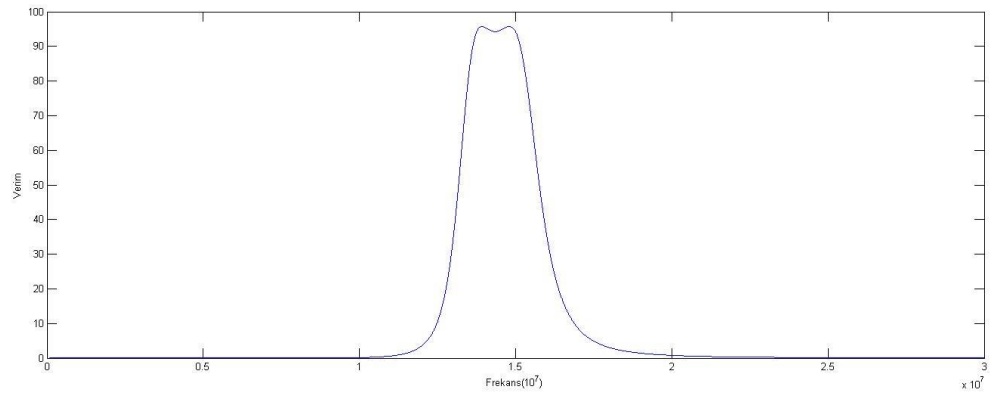
a) $z=1$



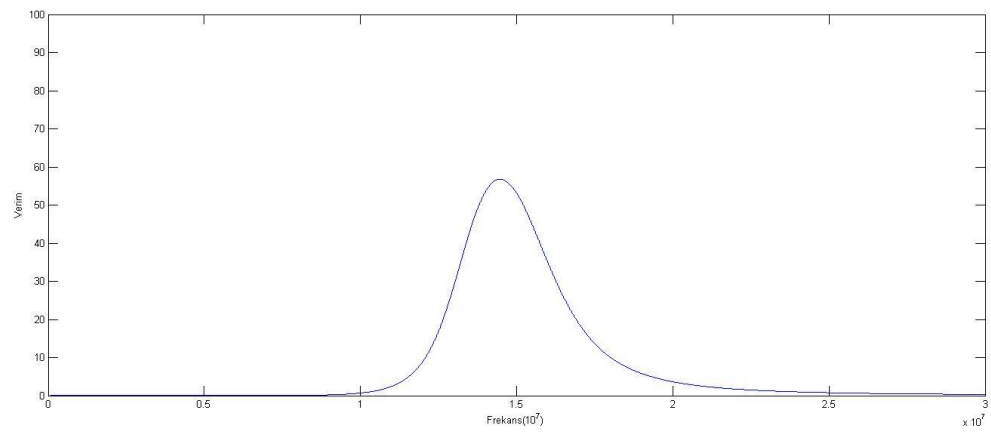
b) $z=5$



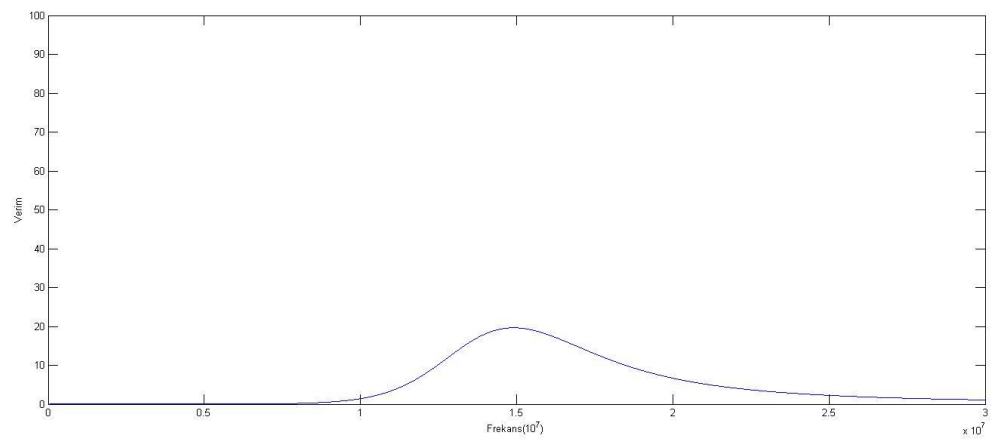
c) $z=10$



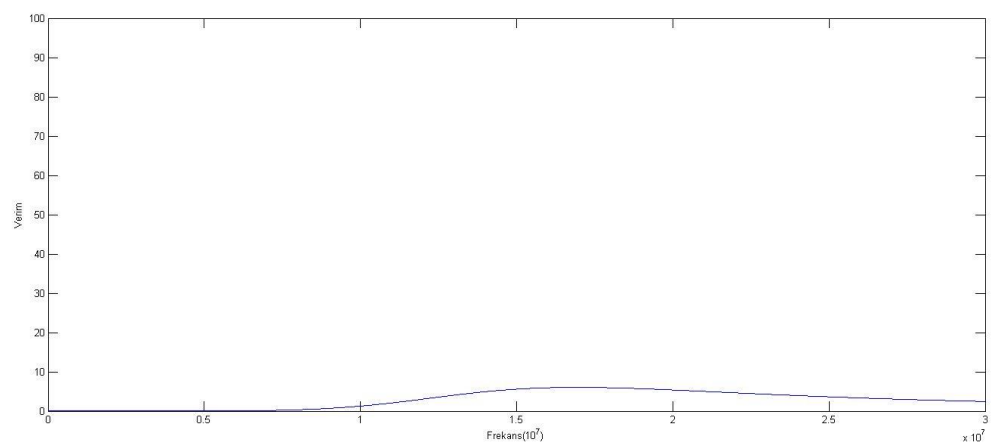
d) $z=25$



e) $z=50$

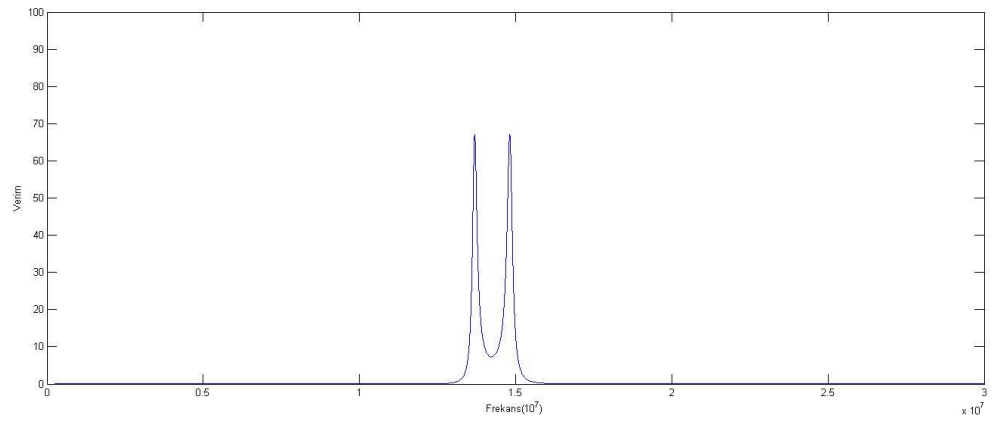


f) $z=100$

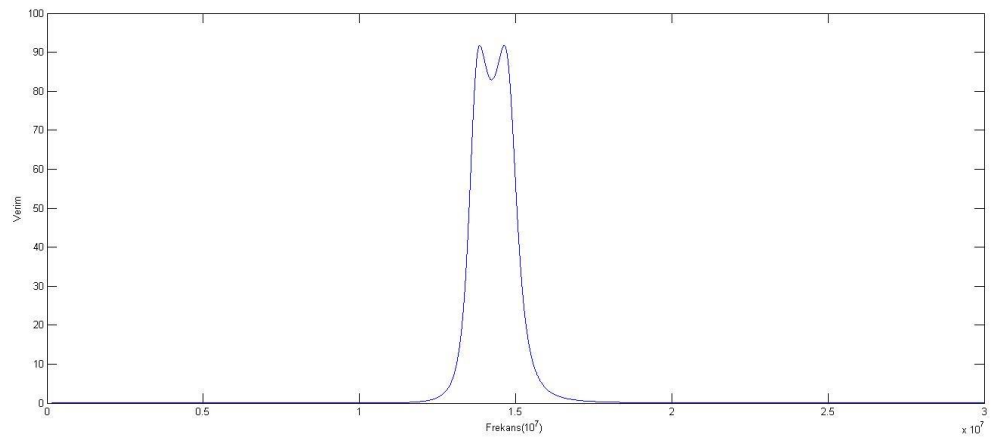


4) Hava aralığı:15cm, L=1010.5 nH, C=124 pF, Lm=80.5 nH R=0.22 Ω

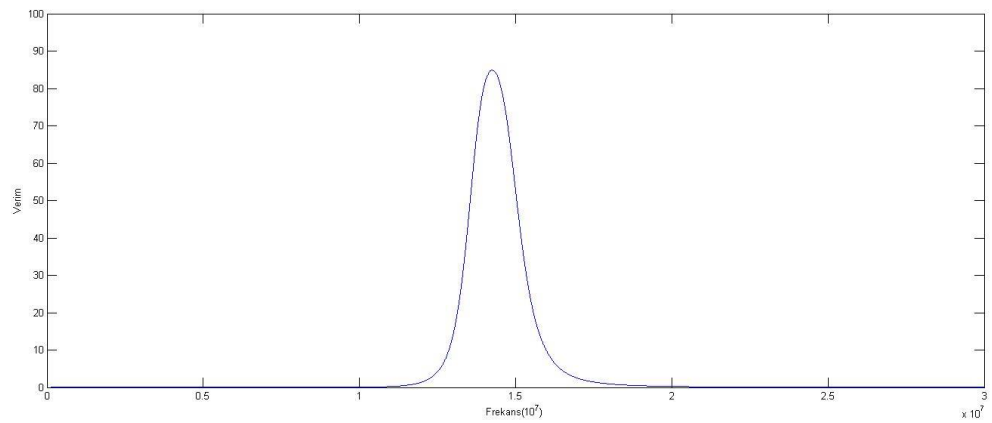
a) z=1



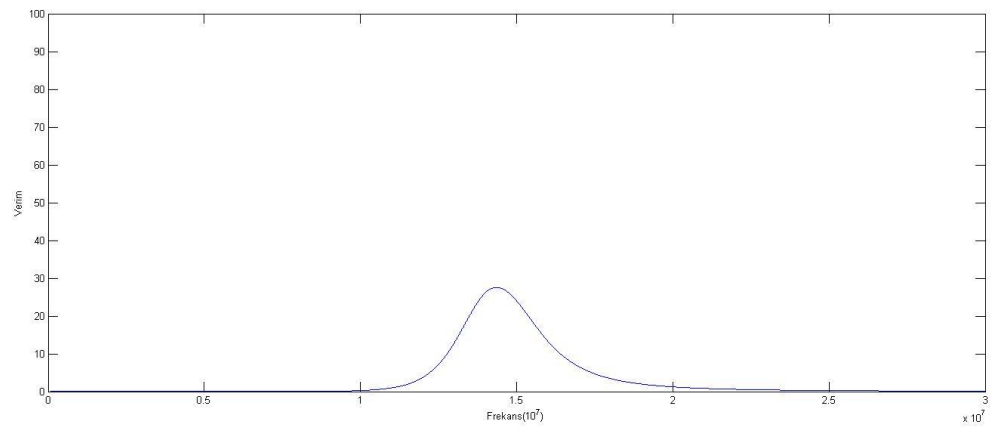
b) z=5



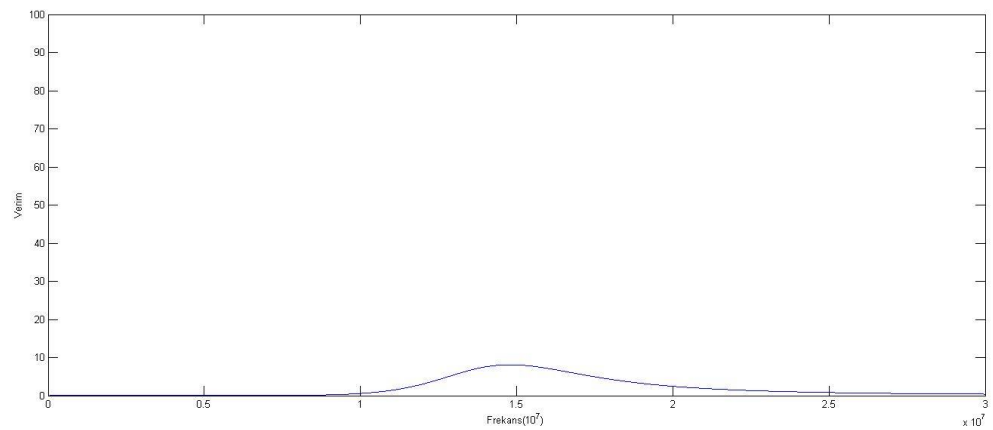
c) z=10



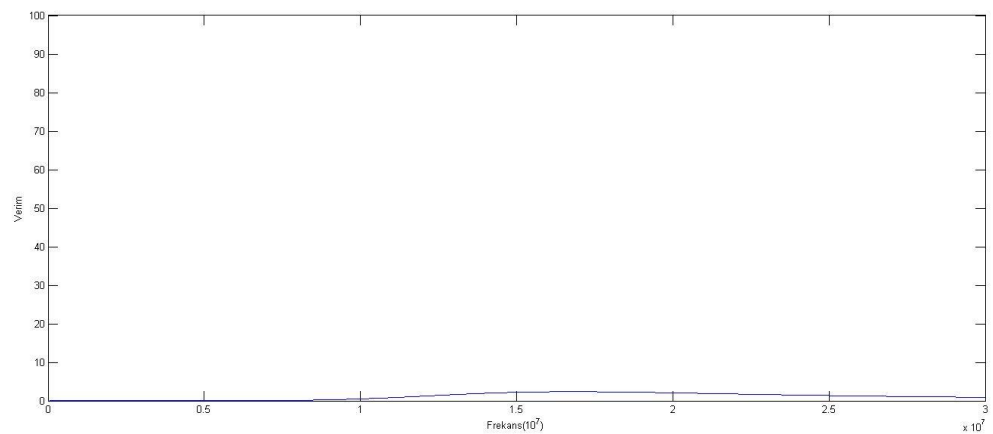
d) $z=25$



e) $z=50$

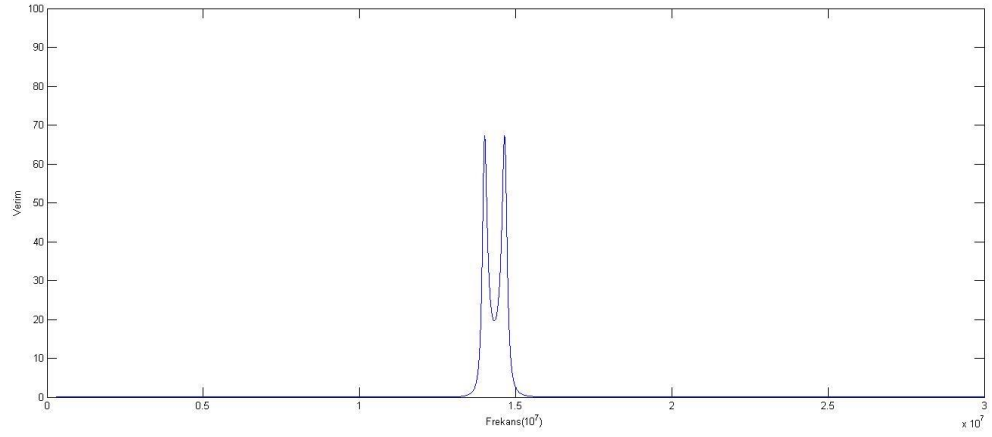


f) $z=100$

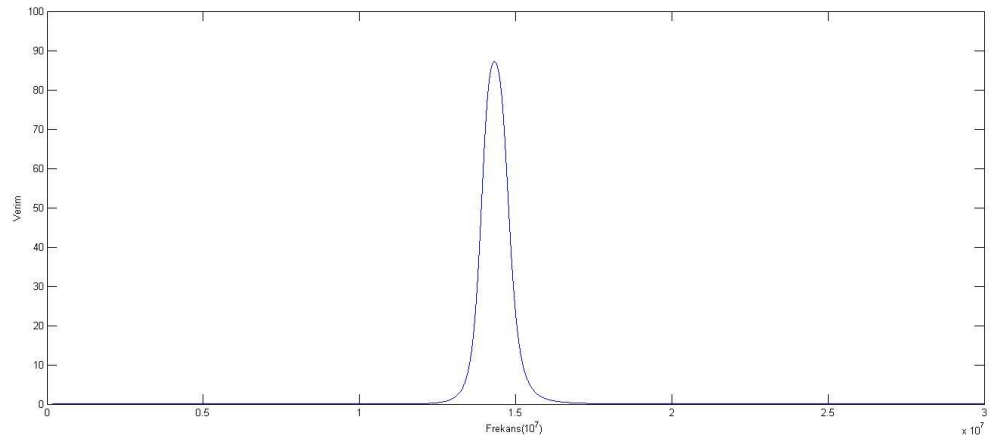


5) Hava aralığı:20cm, L=996.7 nH, C=124 pF, Lm=46.2 nH R=0.22 Ω

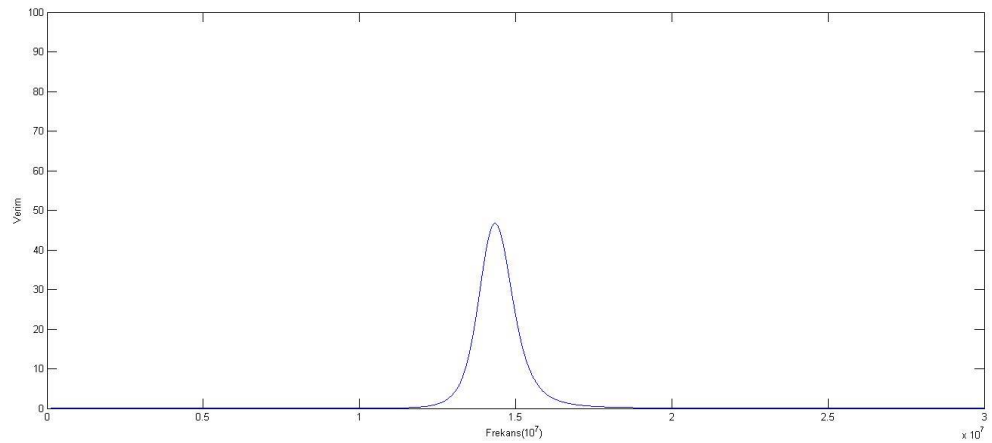
a) z=1



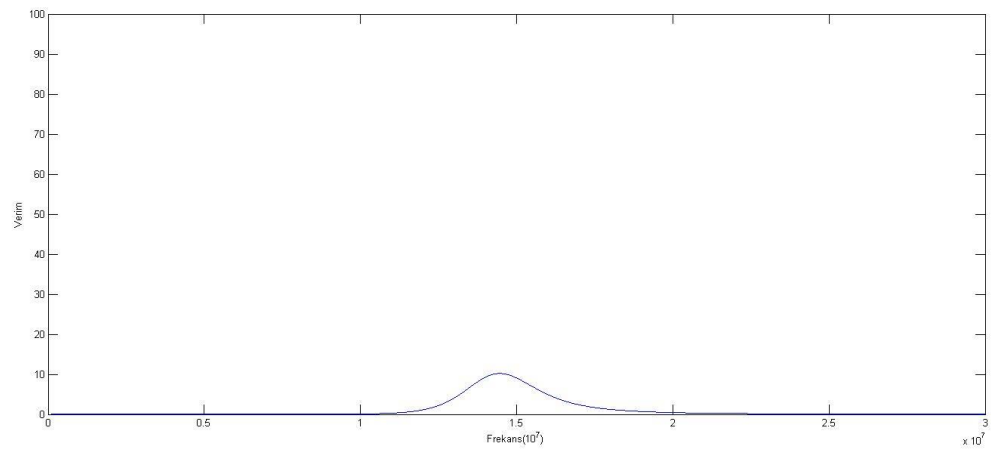
b) z=5



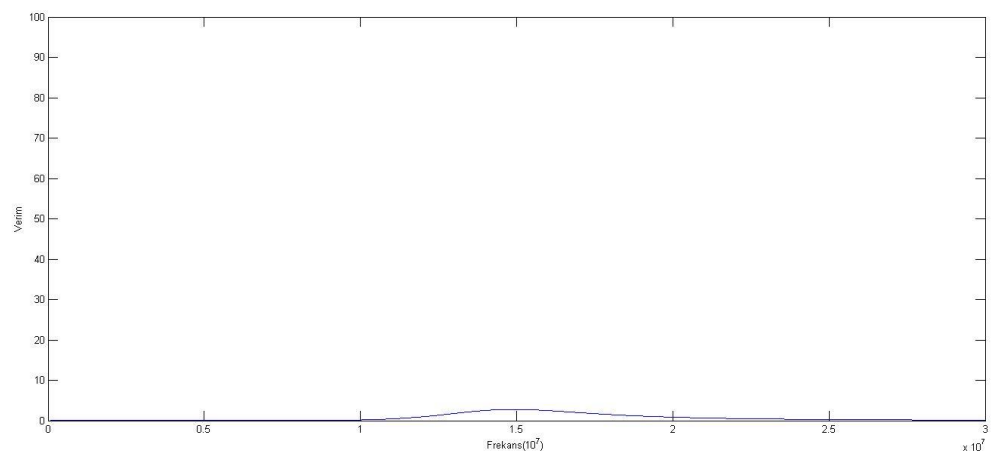
c) z=10



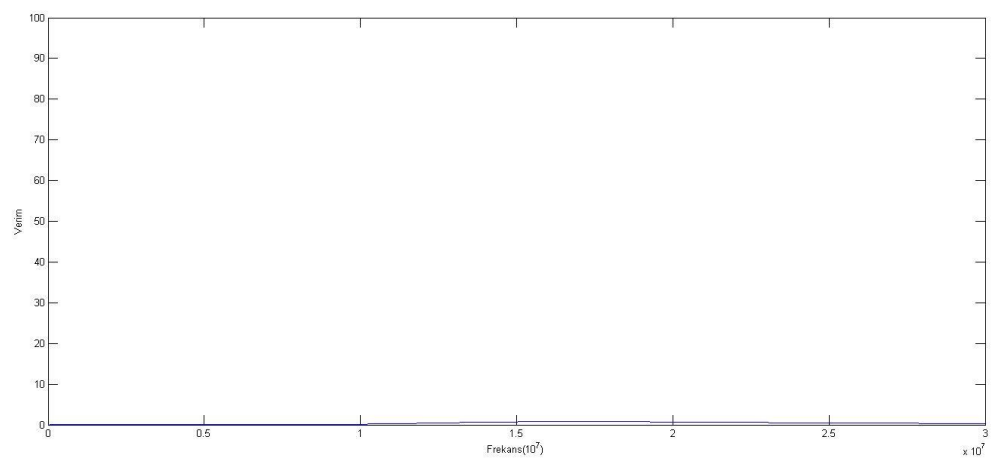
d) $z=25$



e) $z=50$



f) $z=100$



A-3 MATLAB Z eşdeğer denklemi ve grafikleri

```
clc
```

```
clear all
```

```
Lm=input(' Karşıt endüktans değeri giriniz ')
```

```
L=input(' endüktans değeri giriniz ');
```

```
Zc=input(' karakteristik empedans değeri giriniz ');
```

```
C=input(' kondansatör değeri giriniz ');
```

```
f=0
```

```
while f<30000
```

```
    f=f+1
```

```
    w=2*pi*f*1000;
```

```
    s(f)=abs((1/(i*w*C))+i*(L-Lm)*w+(((i*Lm*w)*(i*(L-Lm)*w+(Zc+(1/(i*w*C)))))/(i*L*w+(Zc+(1/(i*w*C))))));
```

```
    f2(f)=f;
```

```
end
```

```
s;
```

```
f2=f2*1000;
```

```
plot(f2,s)
```

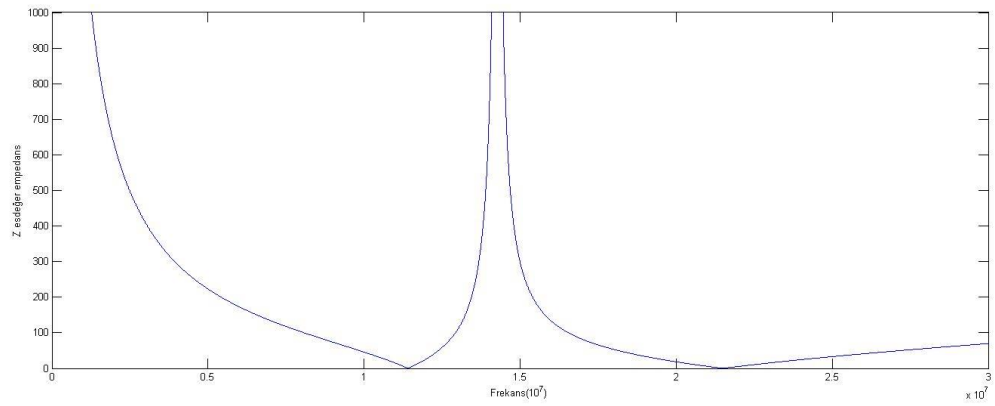
```
xlabel('Frekans(10^7)')
```

```
ylabel('Z esdeğer empedans')
```

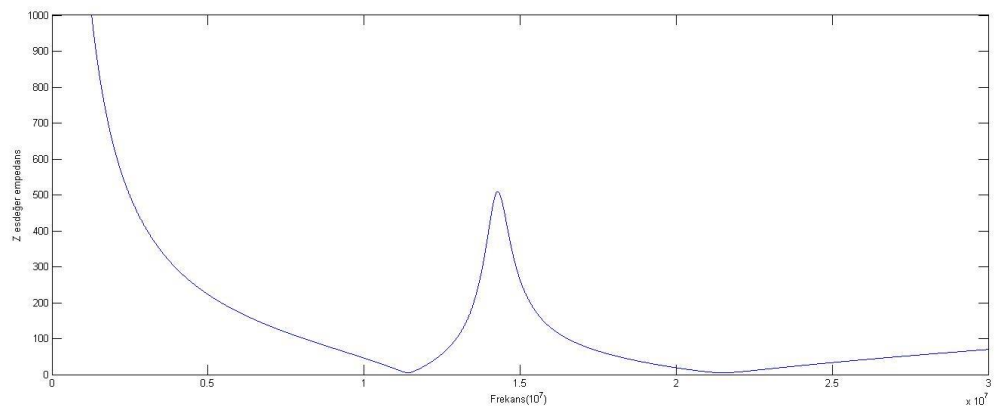
```
Lm
```

1) Hava aralığı:1cm, L=1004 nH, C=124 pF, Lm=562.5 nH

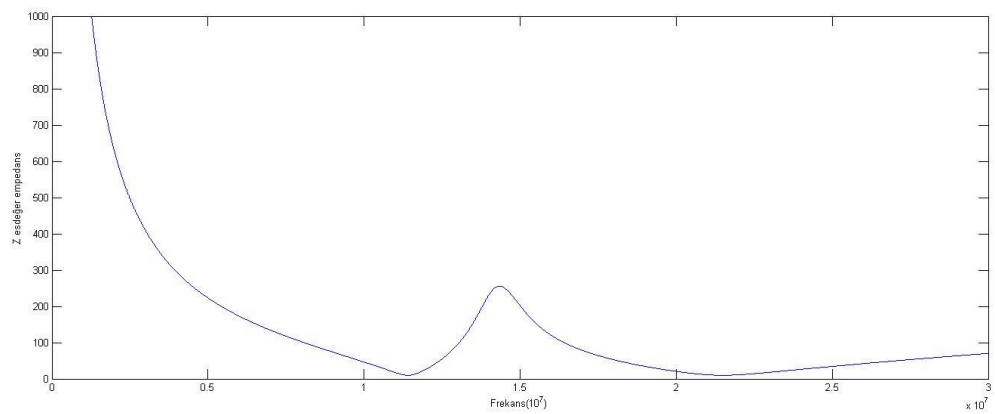
a) $z=1$



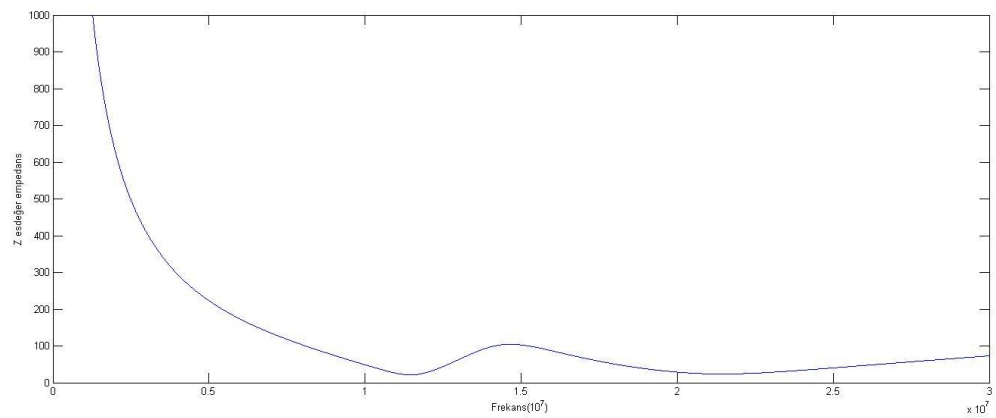
b) $z=5$



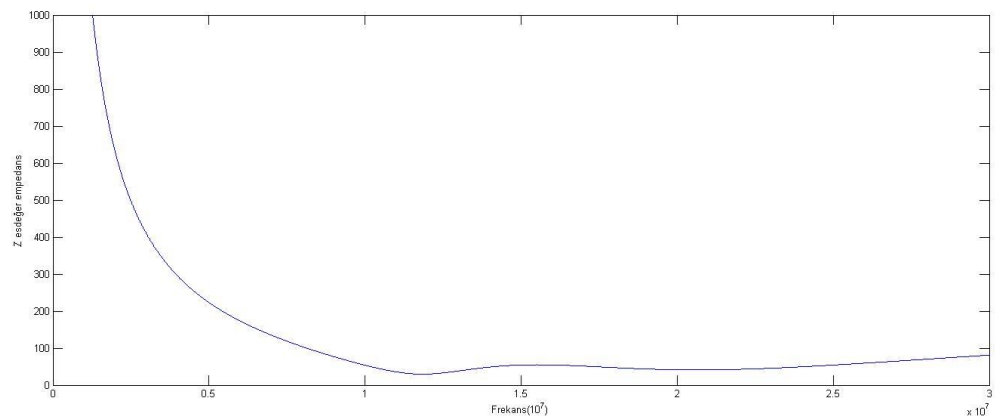
c) $z=10$



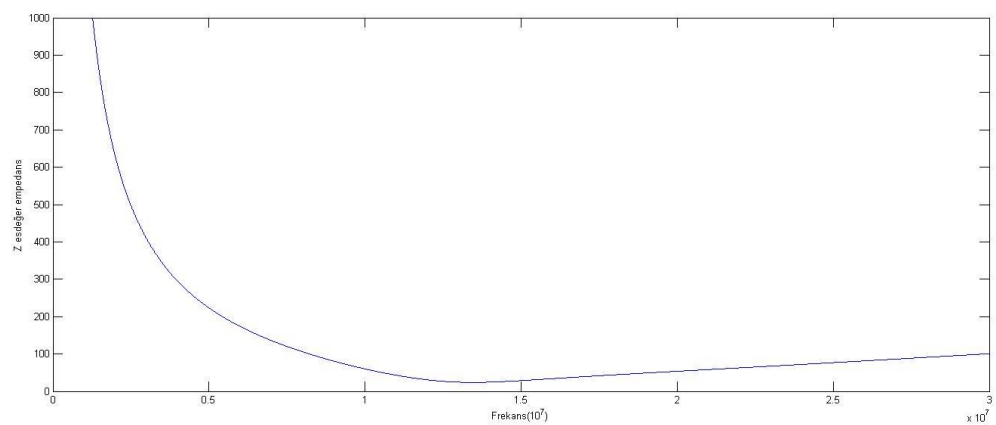
d) $z=25$



e) $z=50$

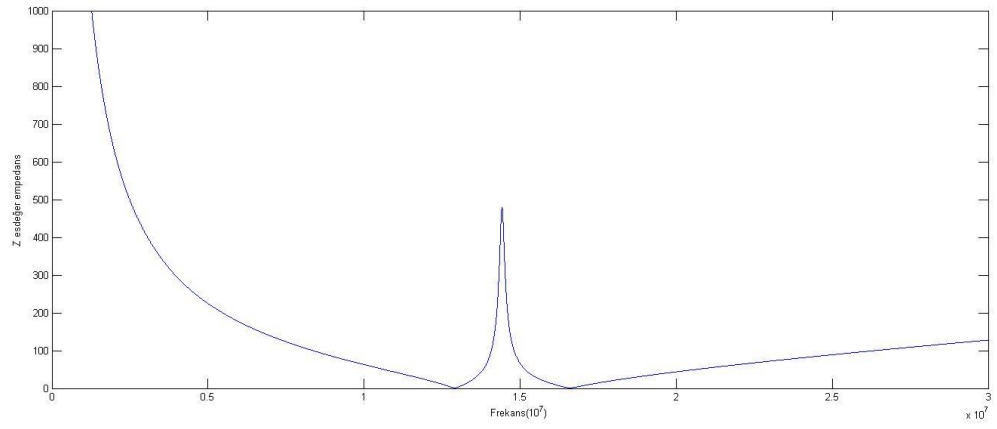


f) $z=100$

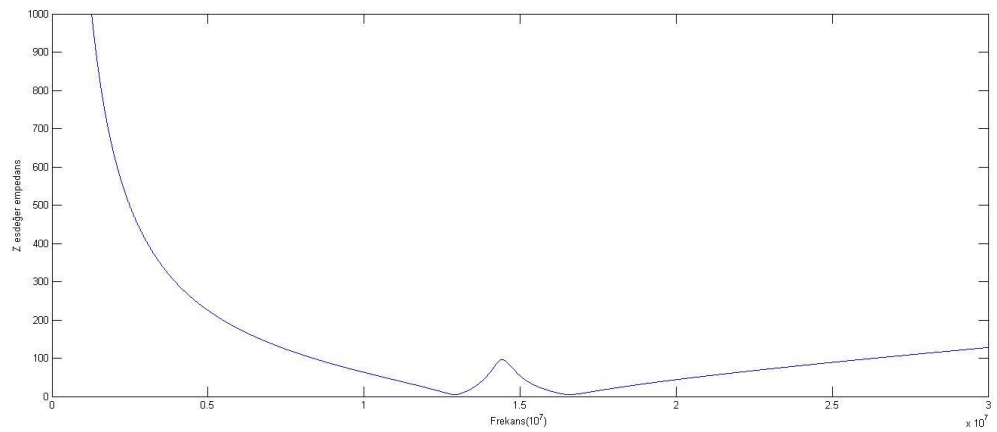


2) Hava aralığı:5cm, $L=982.4$ nH, $C=124$ pF, $L_m=241.8$ nH

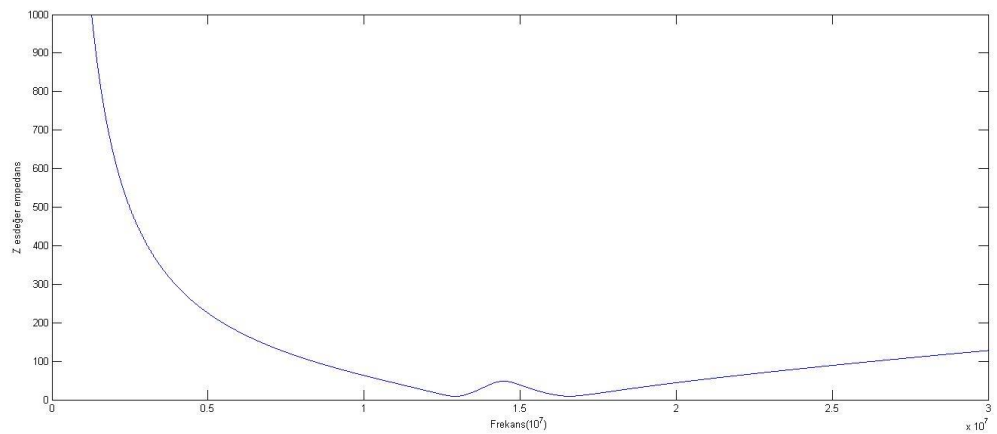
a) $z=1$



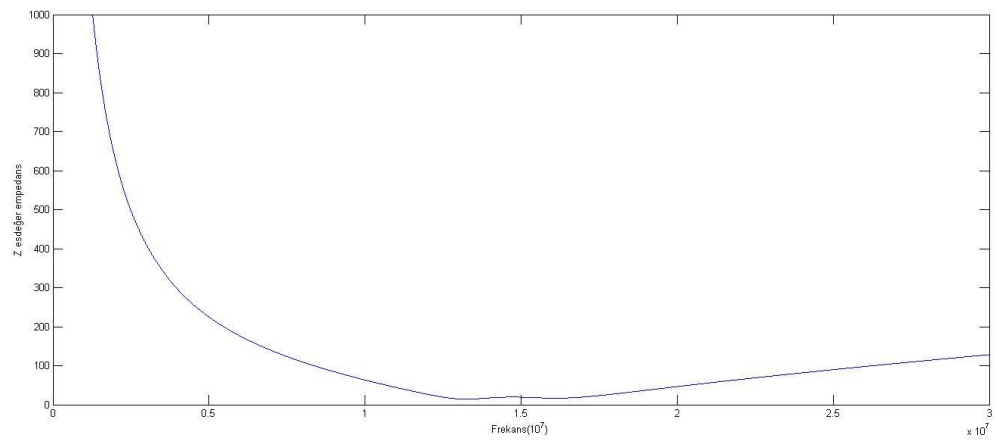
b) $z=5$



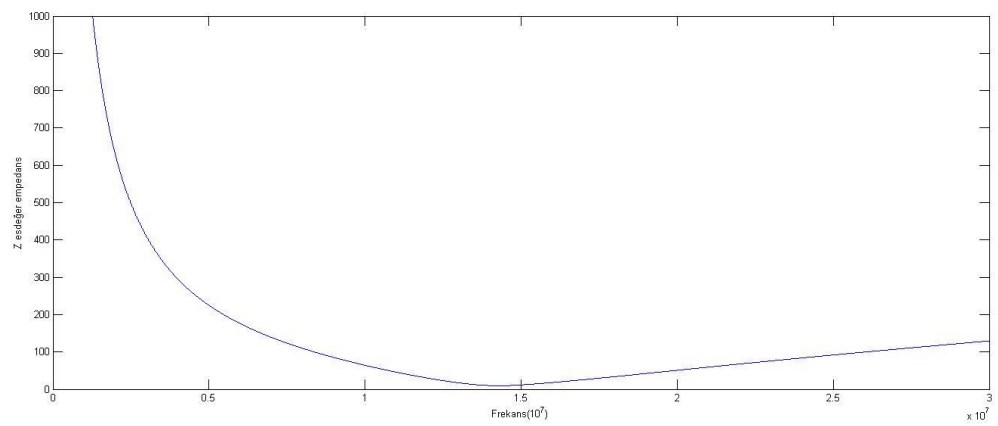
c) $z=10$



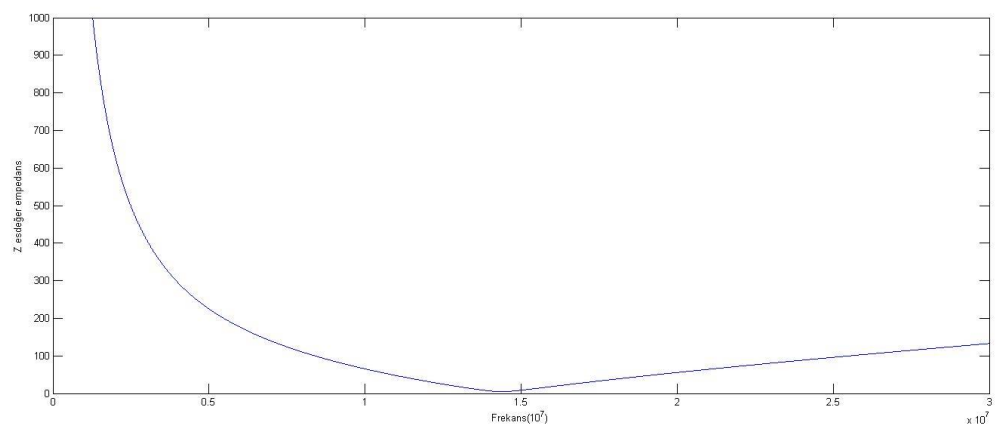
d) $z=25$



e) $z=50$

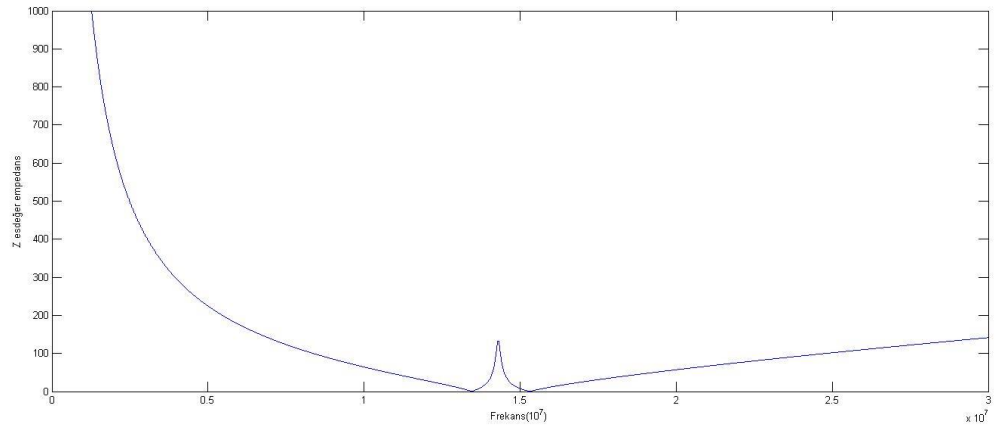


f) $z=100$

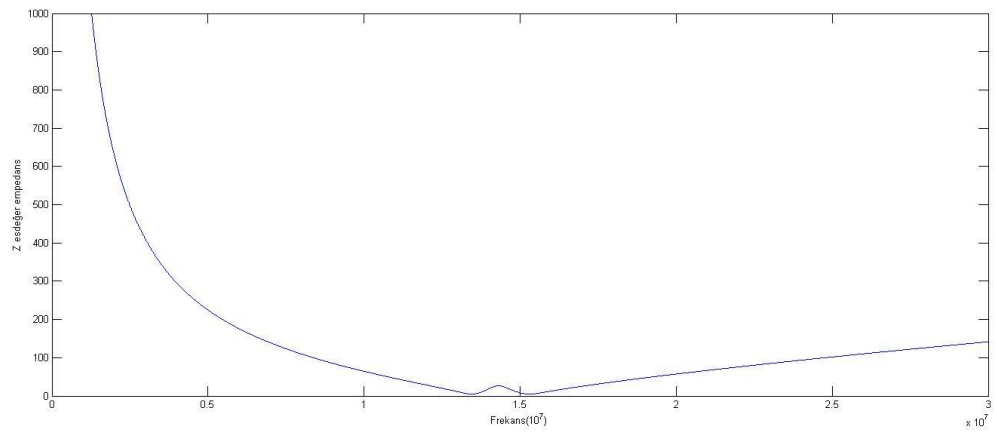


3) Hava aralığı:10cm, L=999.2 nH, C=124 pF, Lm=128.6 H

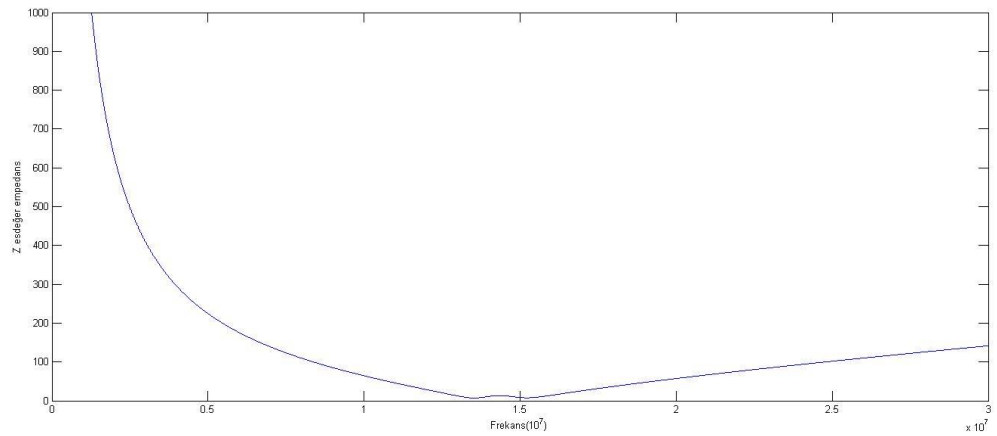
a) $z=1$



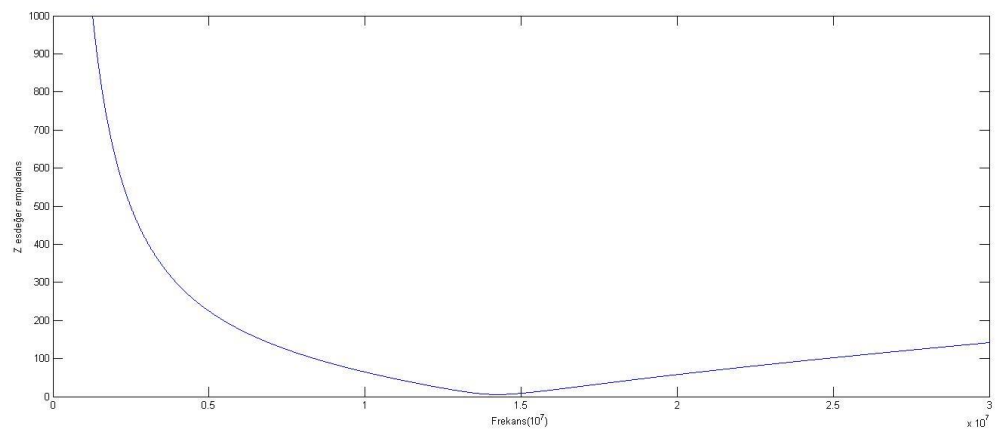
b) $z=5$



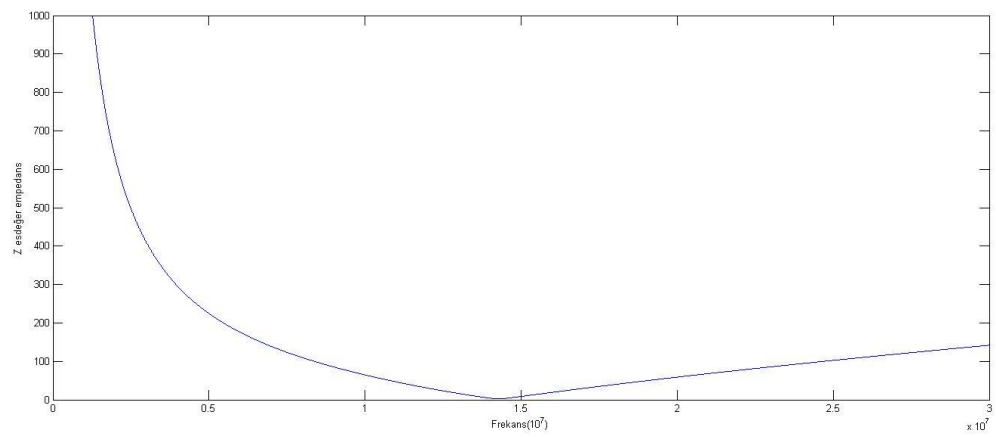
c) $z=10$



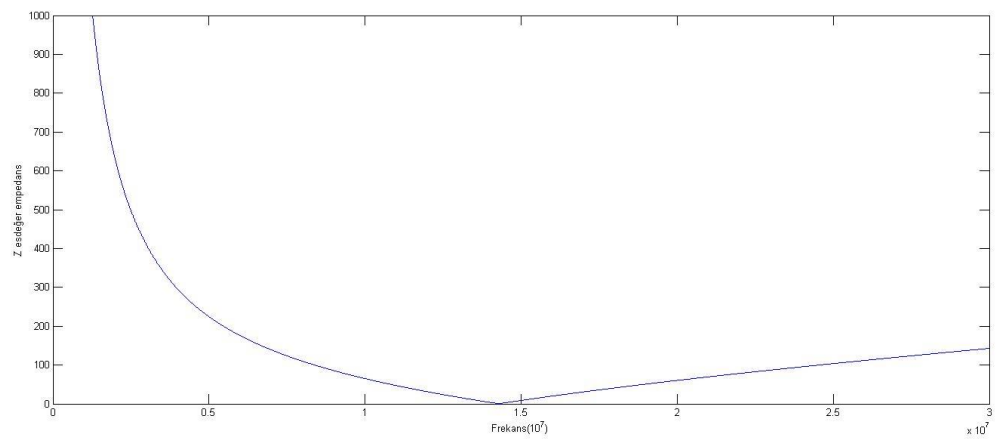
d) $z=25$



e) $z=50$

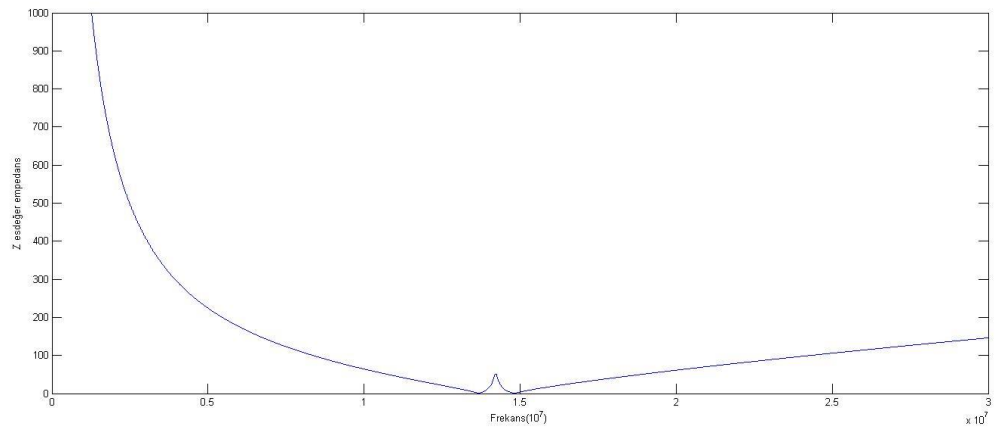


f) $z=100$

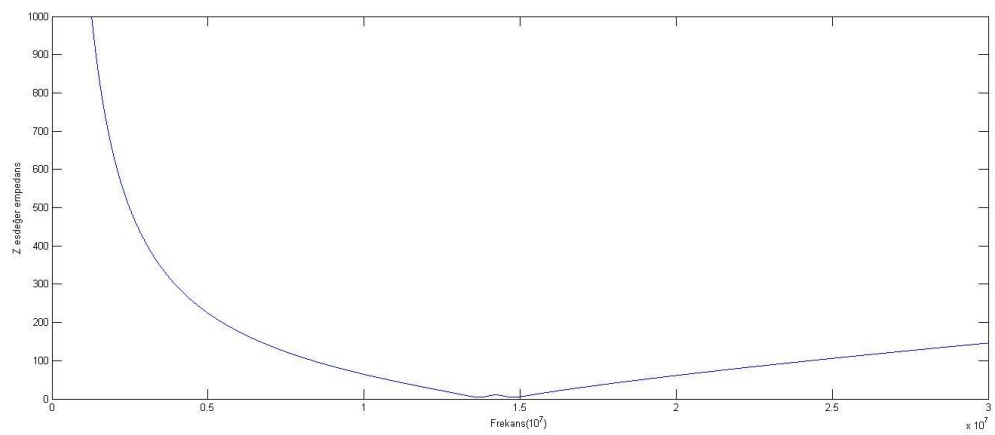


4) Hava aralığı:15cm, L=1010.5 nH, C=124 pF, Lm=80.5 nH

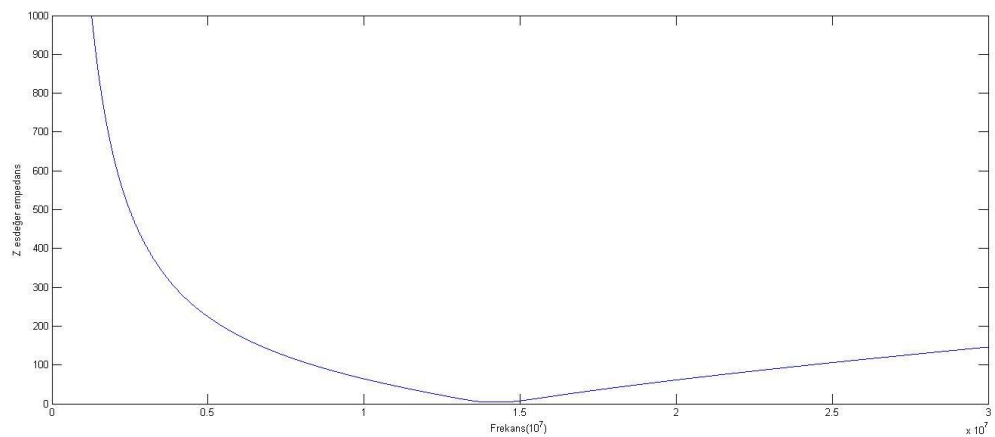
a) $z=1$



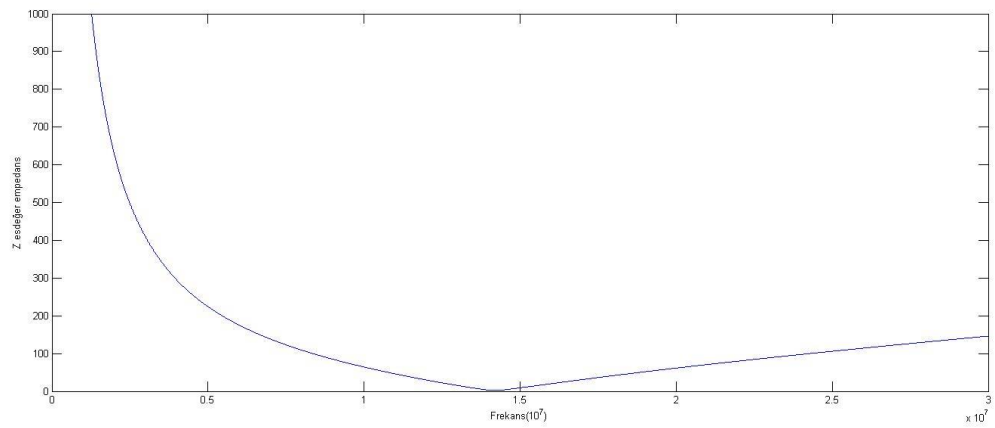
b) $z=5$



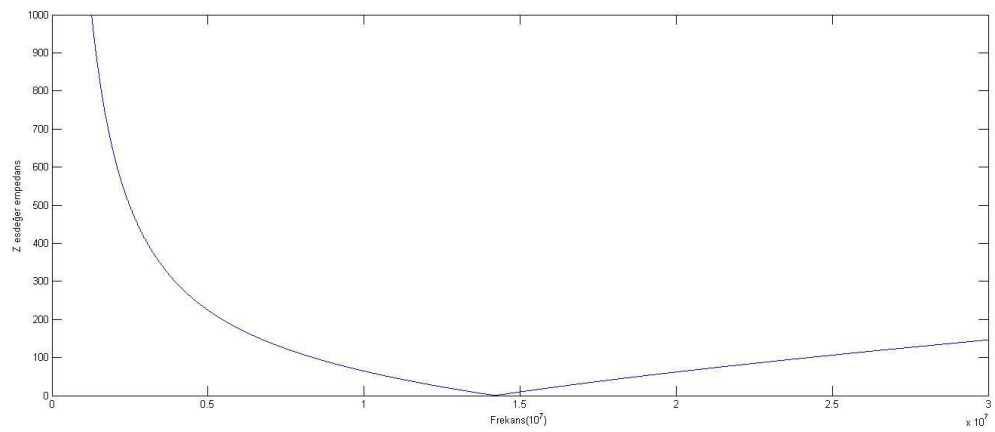
c) $z=10$



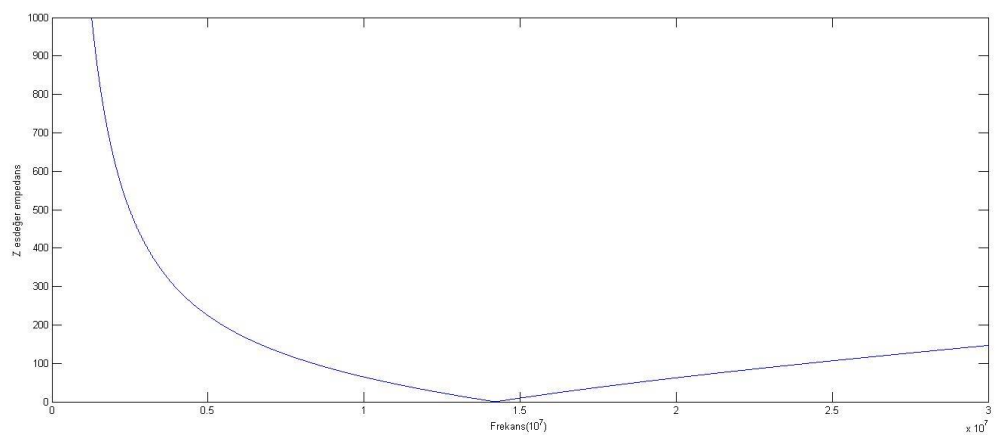
d) $z=25$



e) $z=50$

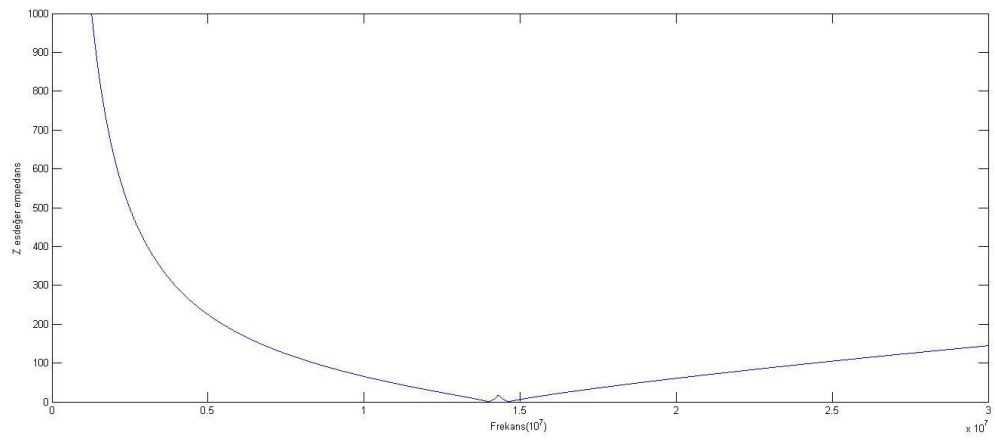


f) $z=100$

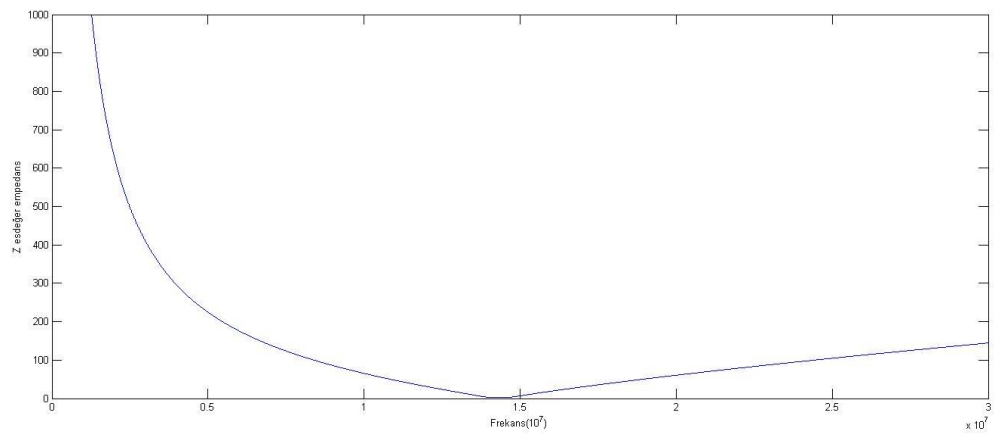


5) Hava aralığı:20cm, L=996.7 nH, C=124 pF, Lm=46.2 nH

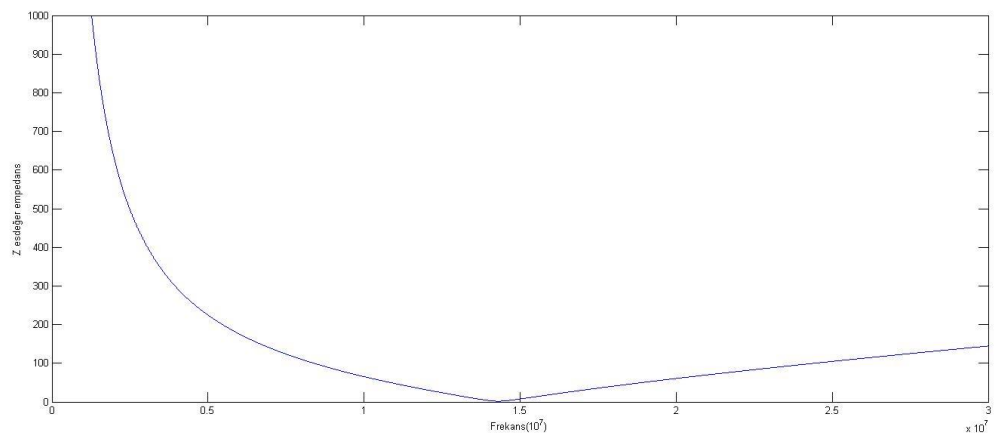
a) $z=1$



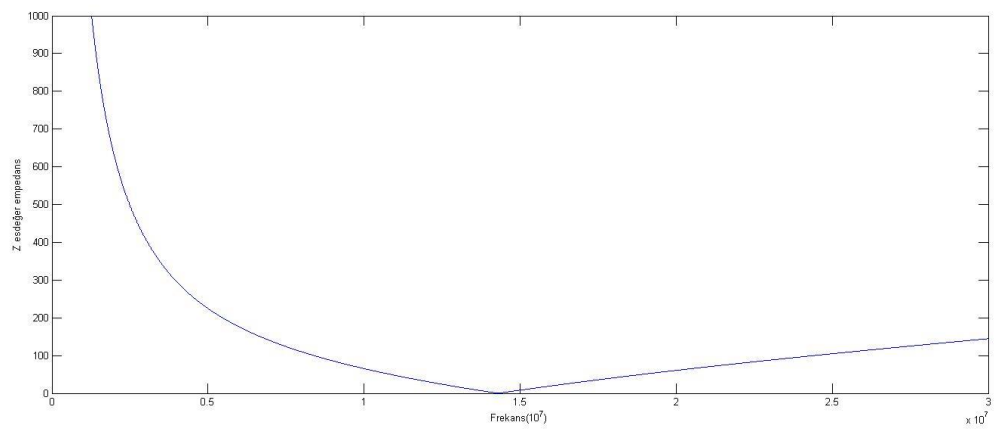
b) $z=5$



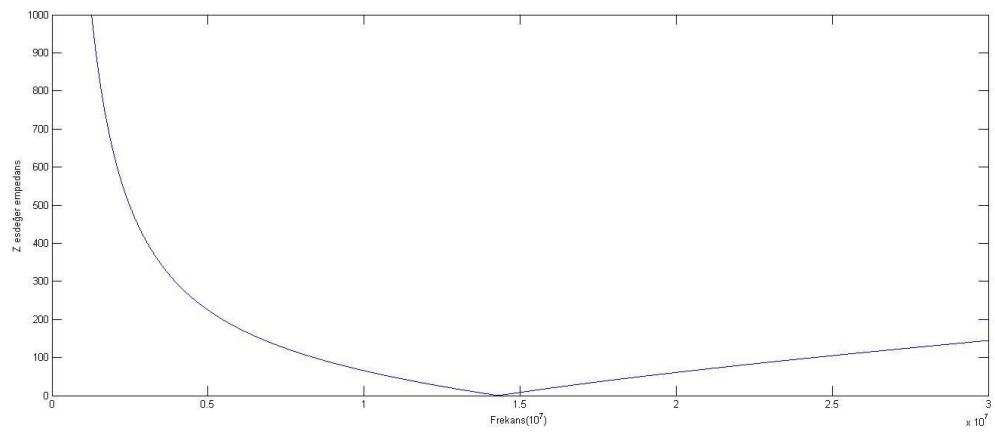
c) $z=10$



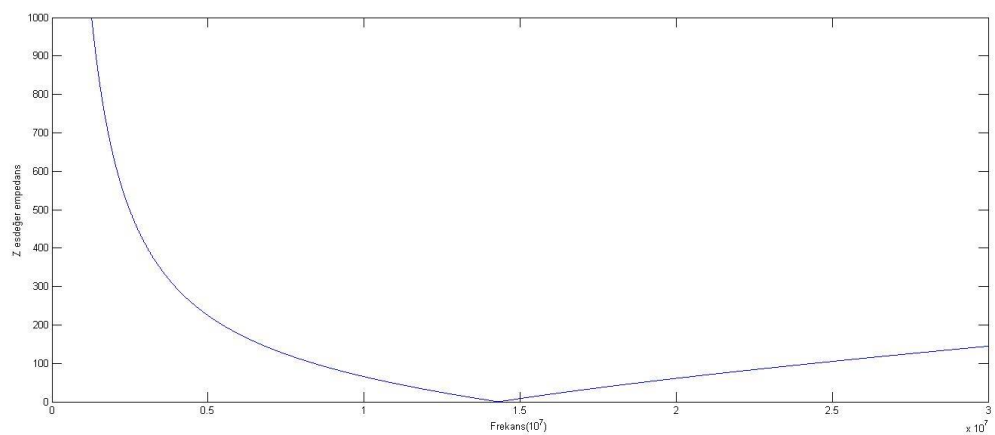
d) $z=25$



e) $z=50$



f) $z=100$



A-4 MATLAB ile Hava aralığı ve frekansa göre verimin değişiminin üç boyutlu grafikleri

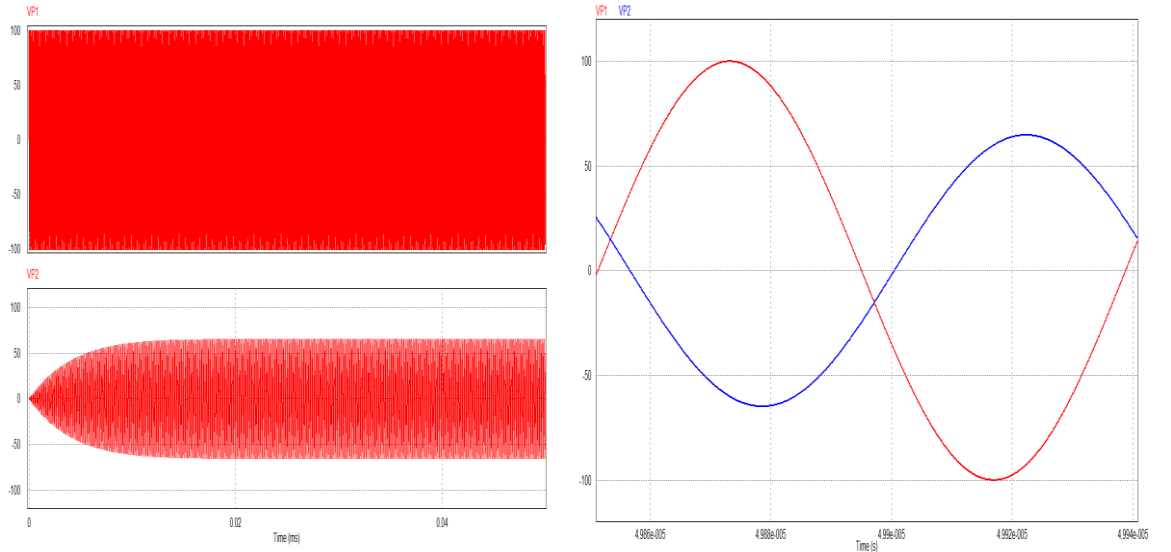
```
clc
clear all
r=0.15;
g=0;
sayac=0
while sayac<4000
    syms x y
    sayac=sayac+1;
    g=g+0.00005;
    fa=((r^2)*cos(x-y))/(sqrt((2*(r^2))+(g^2)-((2*(r^2))*cos(x-y))));
    K=inline(fa);
    Q=dblquad(K,0,2*pi,0,2*pi);
    hava(sayac)=g;
    Lma(sayac)=Q*(1e-7);
end
Lma
hava
R=0.22;
L=1115e-9;
Zc=10;
C=124e-12
[f,Lm] = meshgrid(0:0.25e5:1e8,Lma);
z=100*((abs((2*i*Lm.*(2*pi*f)*Zc)./(((Lm.^2).*((2*pi*f).^2)))+(Zc+R+1i*(((2*pi*f)*L)-
(1./((2*pi*f)*C))))).^2)).^2);
mesh(f,Lm,z)
xlabel('Karşıt endüktans')
ylabel('Frekans(10^7)')
zlabel('Verim')
```

PSIM Simülasyon Grafikleri

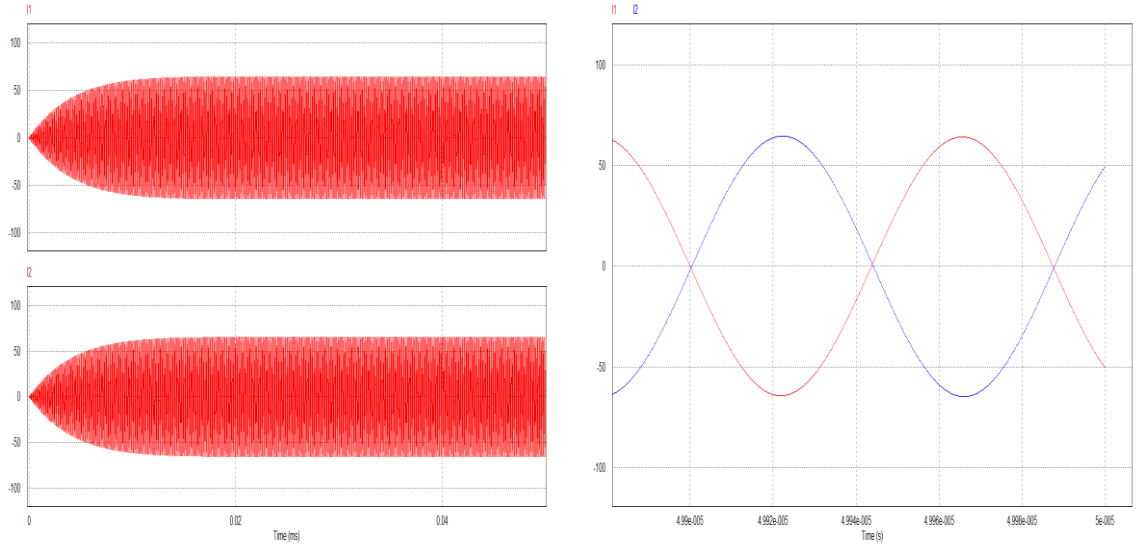
B-1 $Z=1$ ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları

a) Hava aralığı 1cm için;

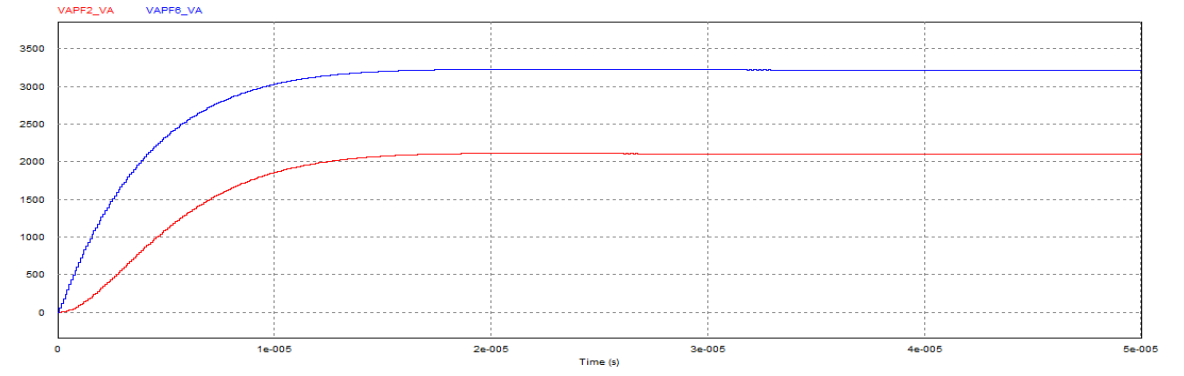
100 V geriliminde 11,434 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1004 nH, karşıt endüktans 562.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 1Ω olarak seçilmiştir.



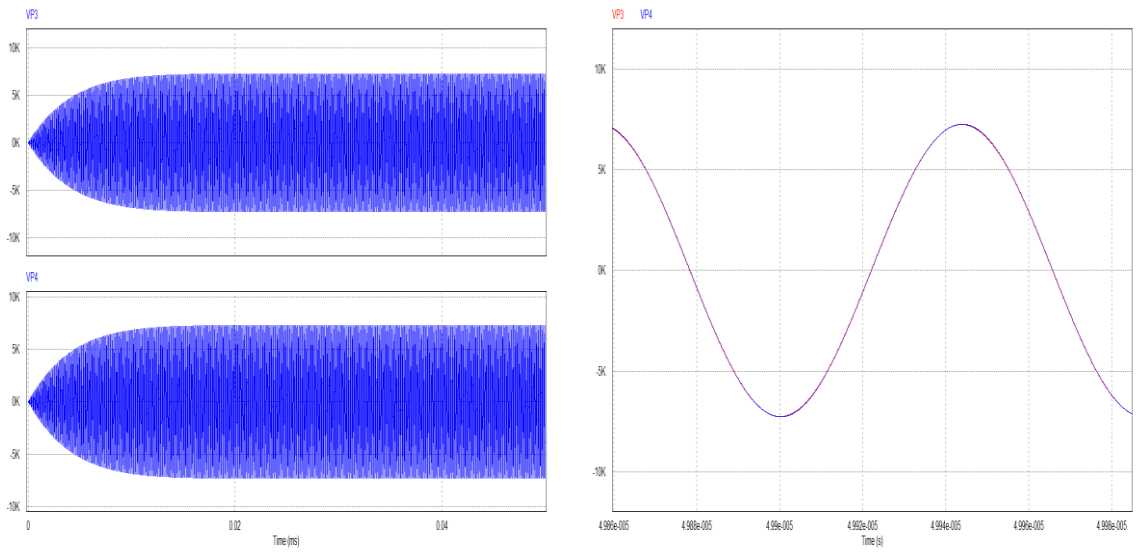
Şekil B.1 Giriş ve çıkış gerilimi



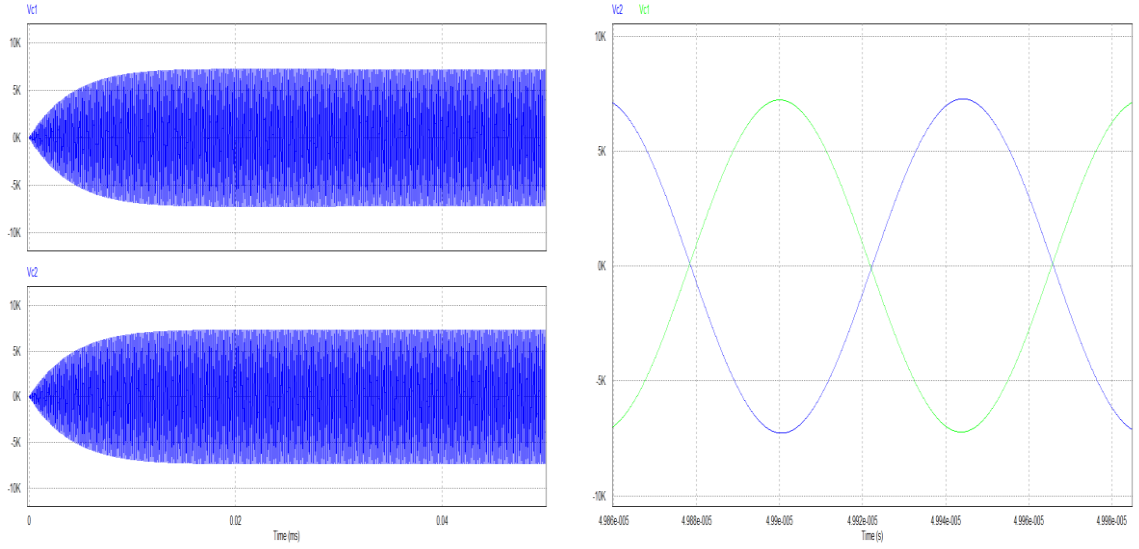
Şekil B.2 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.3 Giriş ve çıkış gücü



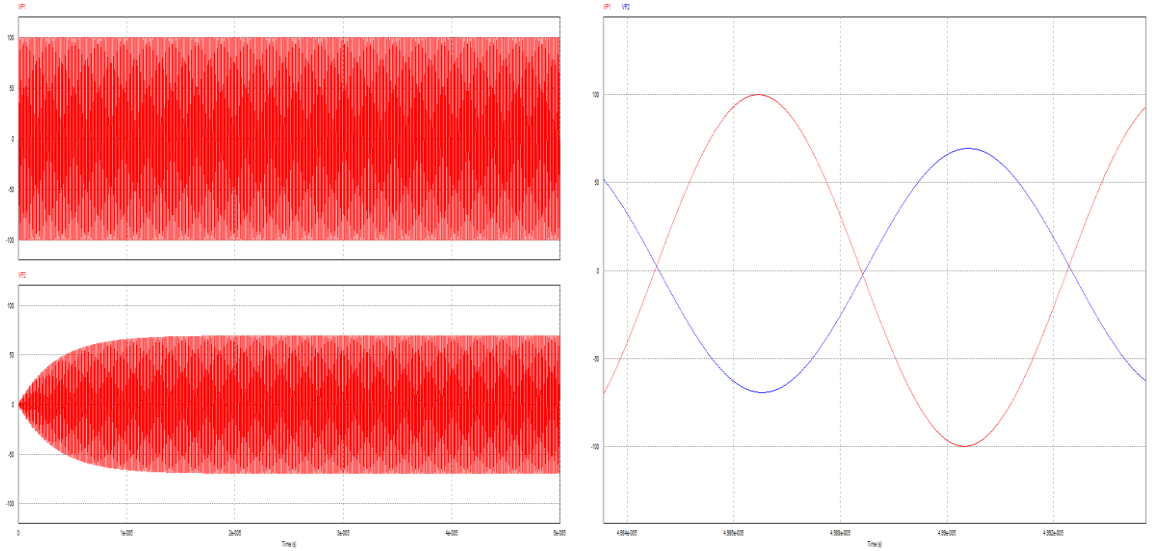
Şekil B.4 Birinci ve ikincil sargı uç gerilimi



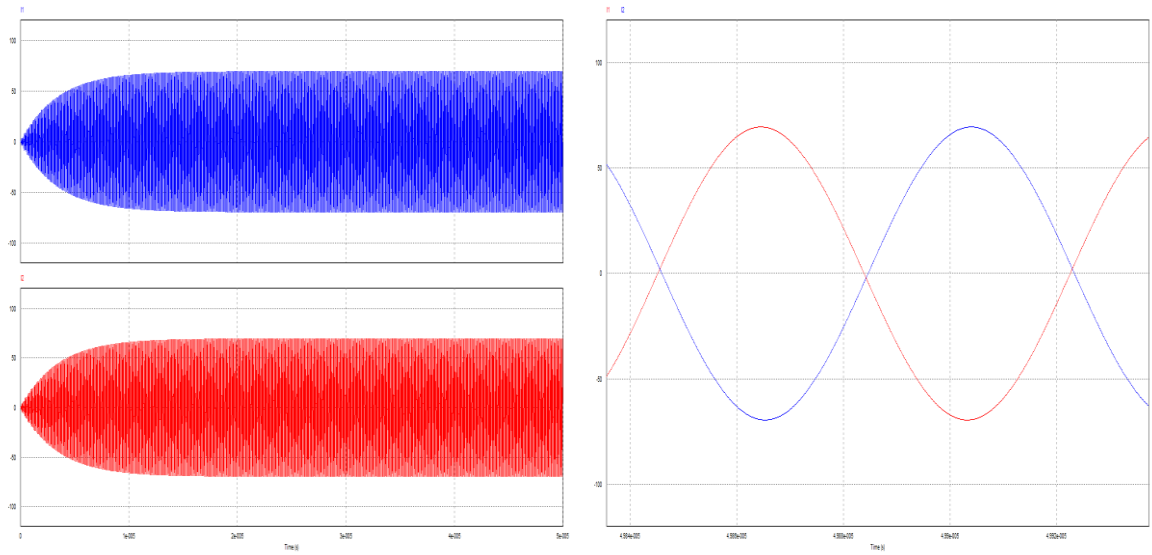
Şekil B.5 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

b) Hava aralığı 5cm için;

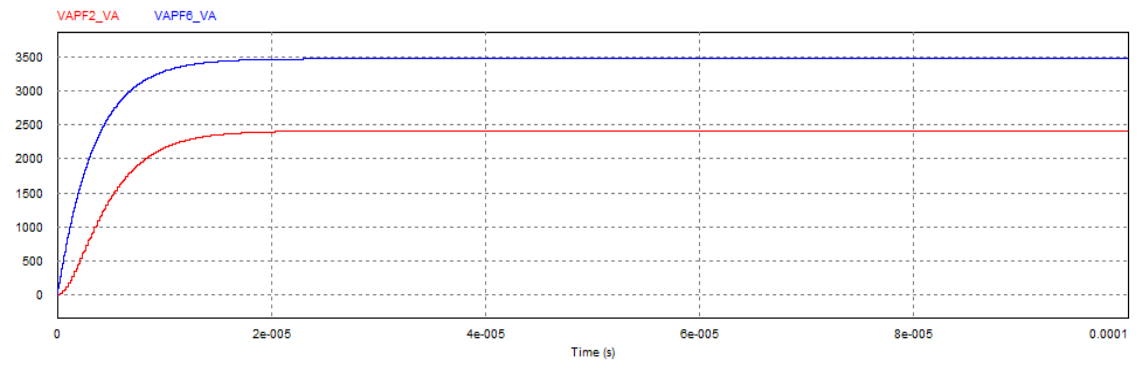
100 V geriliminde 12,920 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1004 nH, karşıt endüktans 241.8 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 1 Ω olarak seçilmiştir.



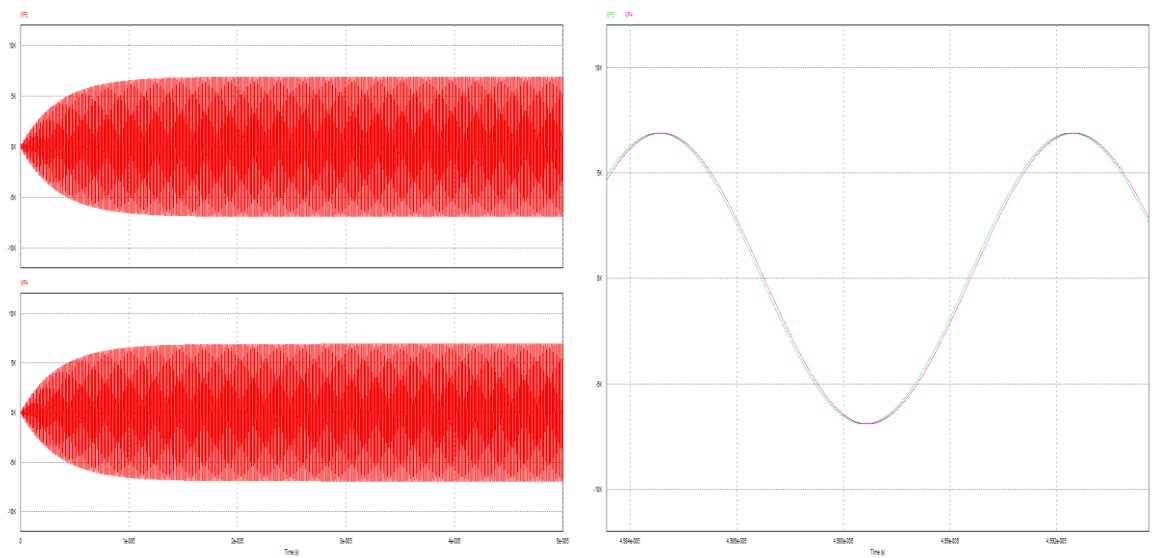
Şekil B.6 Giriş ve çıkış gerilimi



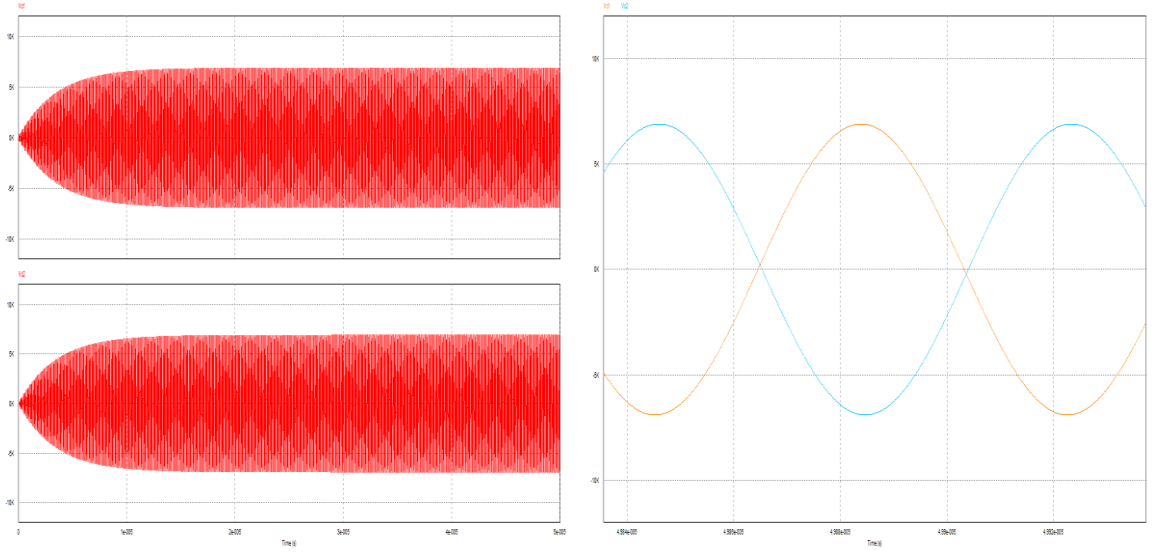
Şekil B.7 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.8 Giriş ve çıkış gücü



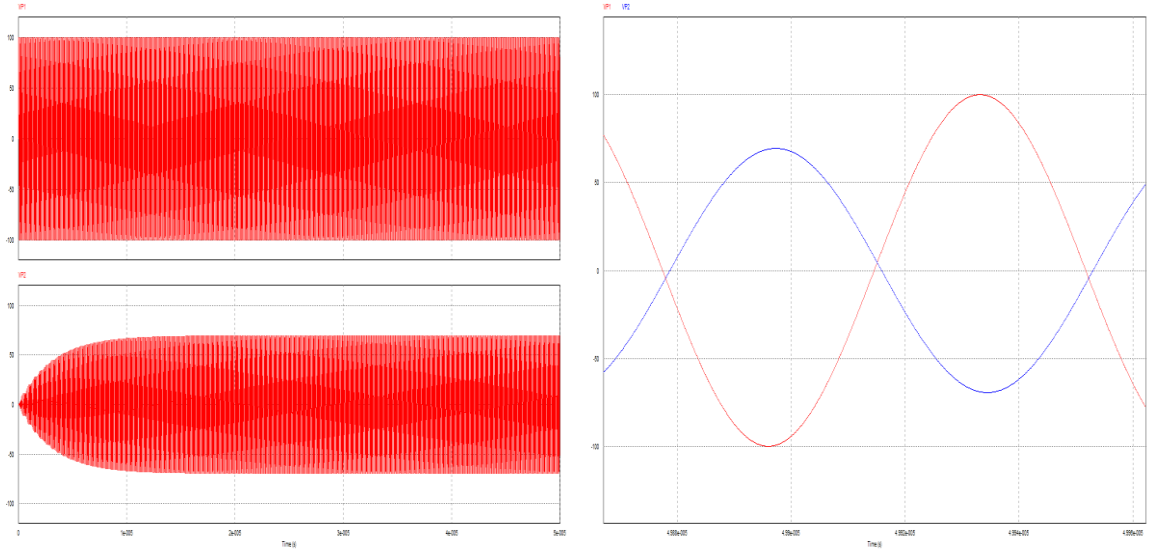
Şekil B.9 Birinci ve ikincil sargı uç gerilimi



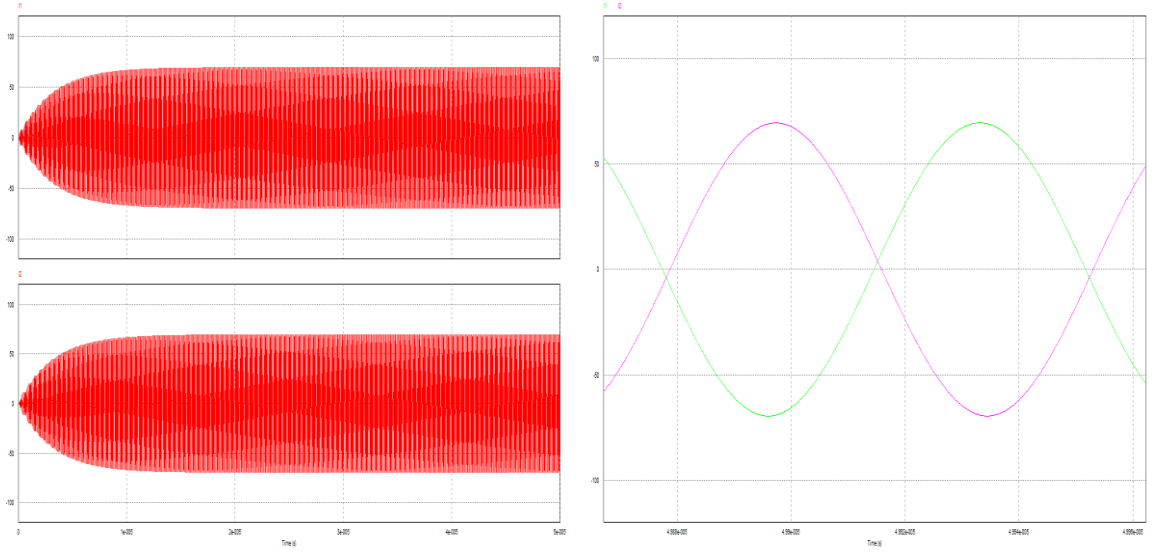
Şekil B.10 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

c) Hava aralığı 10cm için;

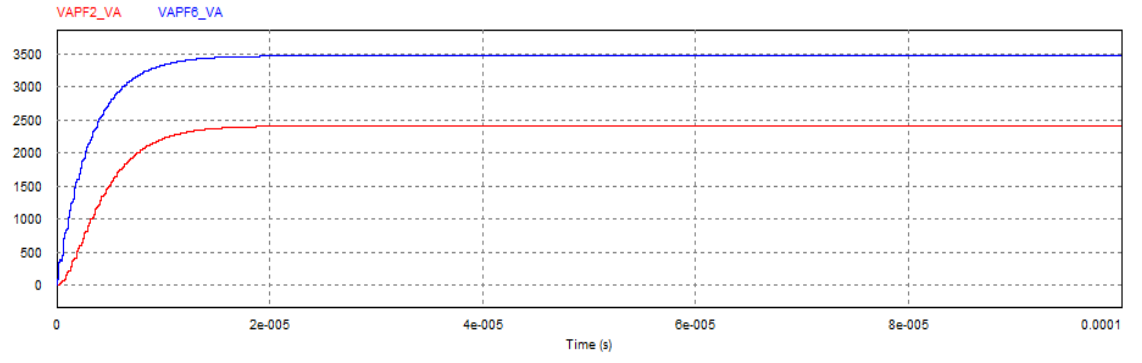
100 V geriliminde 13,463 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 999.2 nH, karşıt endüktans 128.6nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 1 Ω olarak seçilmiştir.



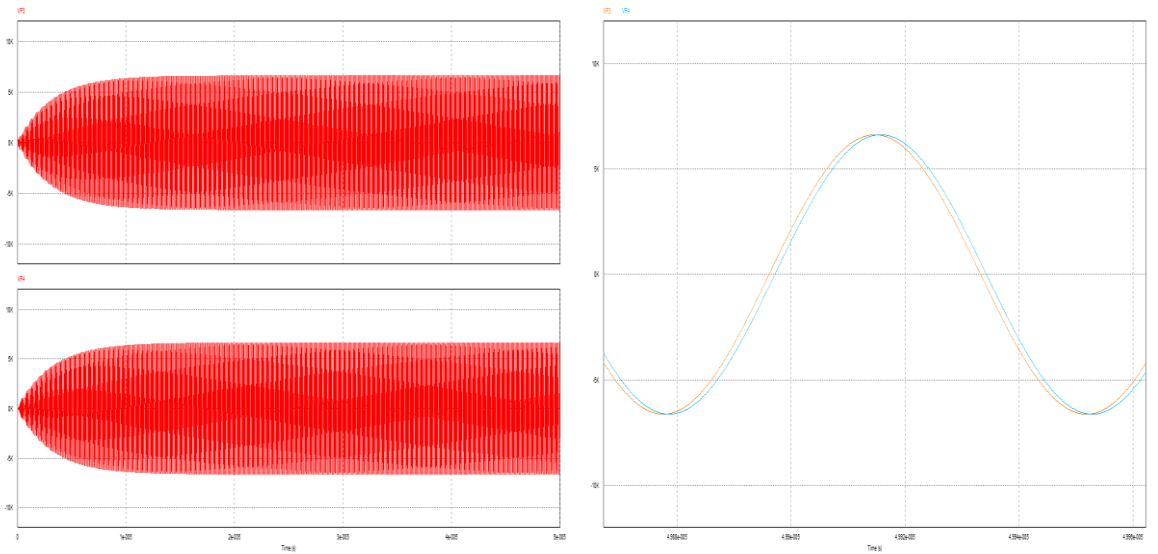
Şekil B.11 Giriş ve çıkış gerilimi



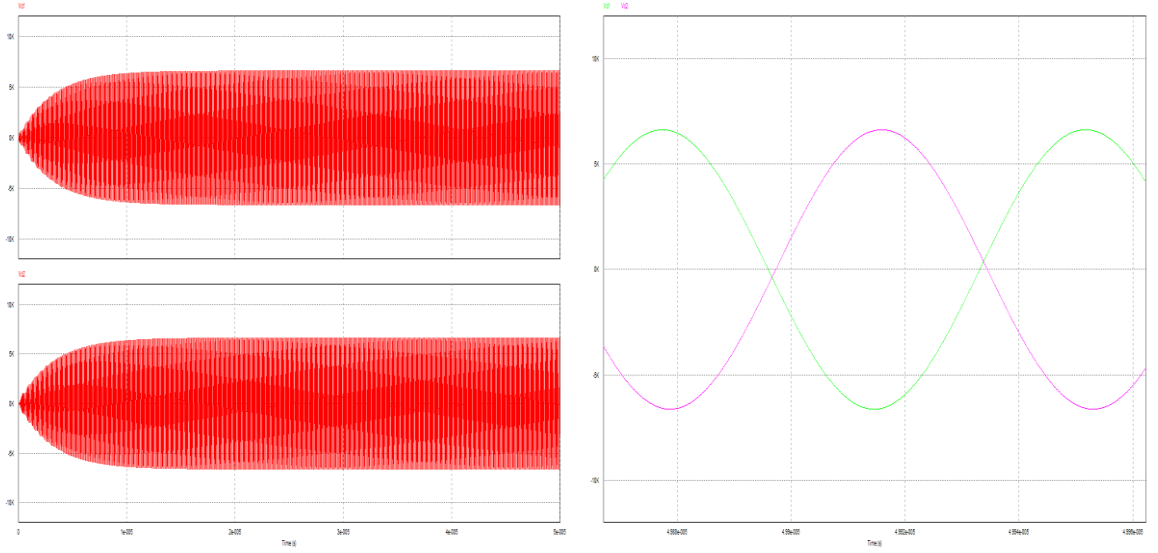
Şekil B.12 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.13 Giriş ve çıkış gücü



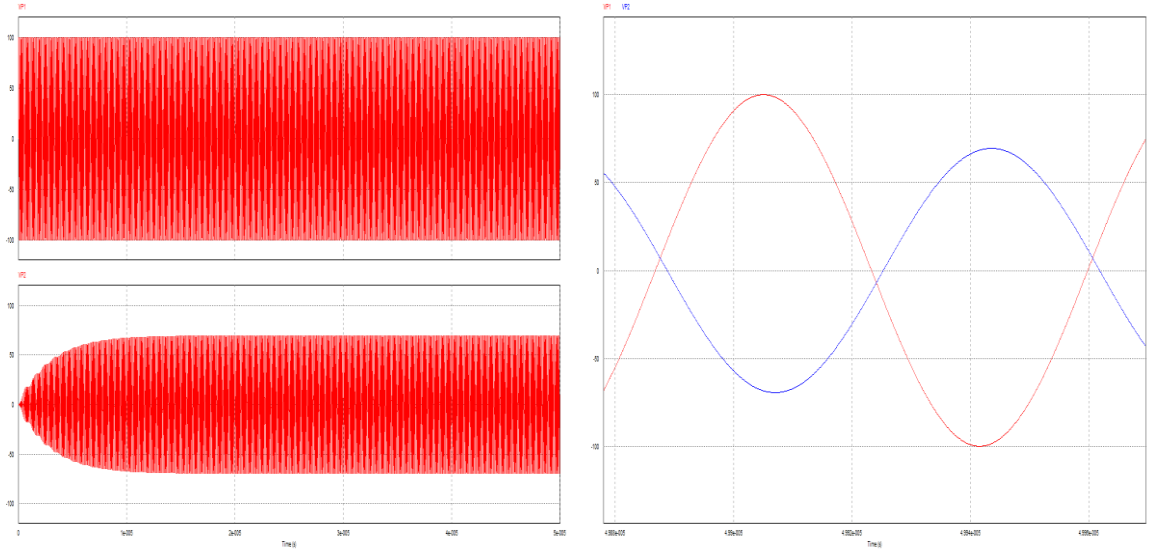
Şekil B.14 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



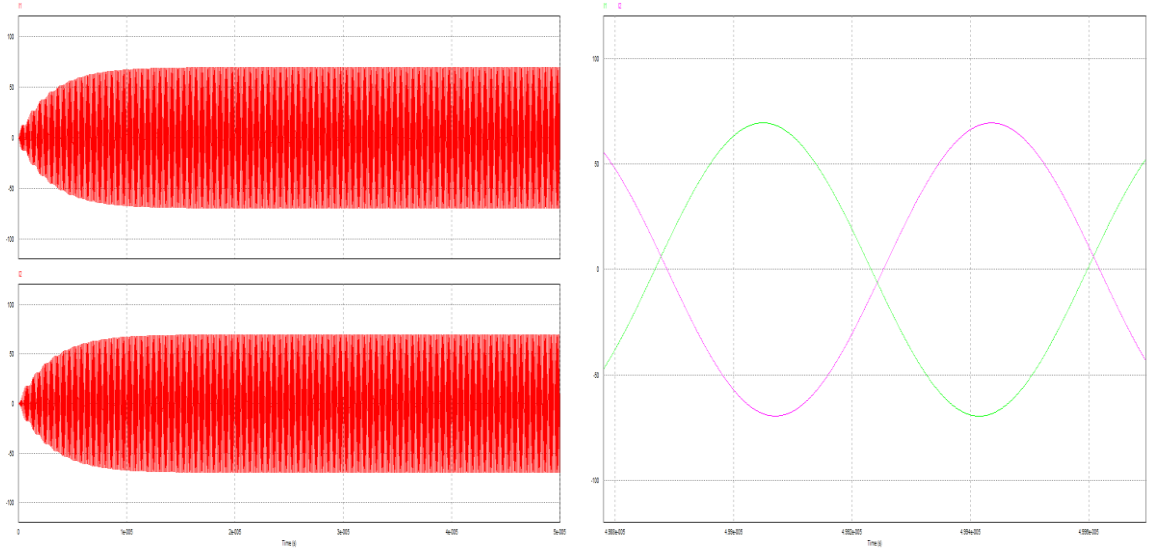
Şekil B.15 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

d) Hava aralığı 15cm için;

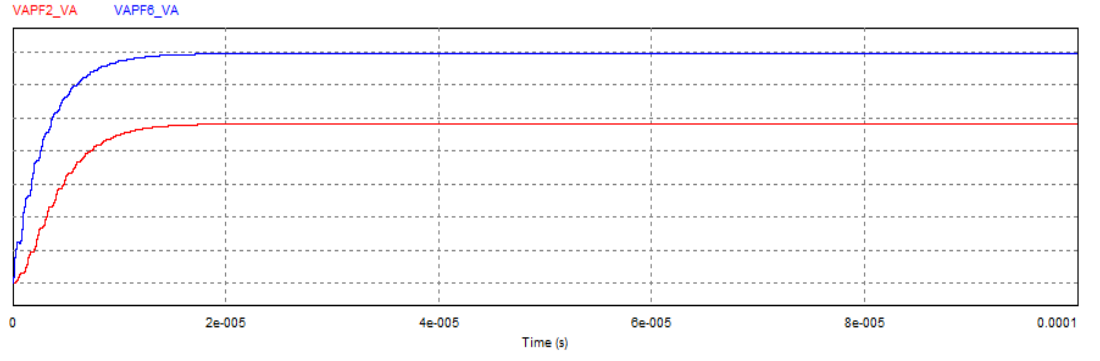
100 V geriliminde 13,691 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1010.5 nH, karşıt endüktans 80.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 1 Ω olarak seçilmiştir.



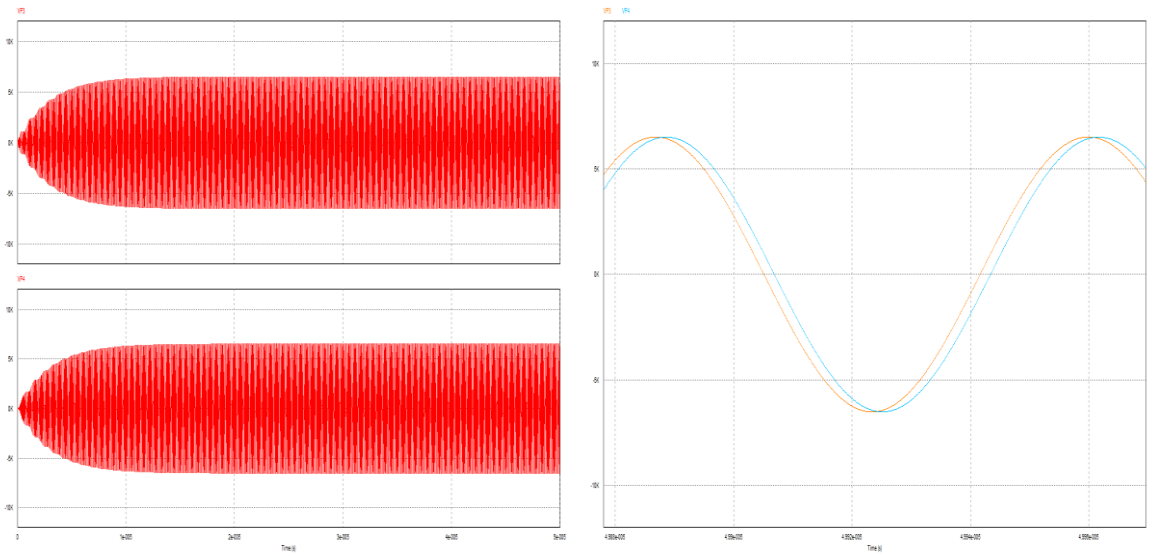
Şekil B.16 Giriş ve çıkış gerilimi



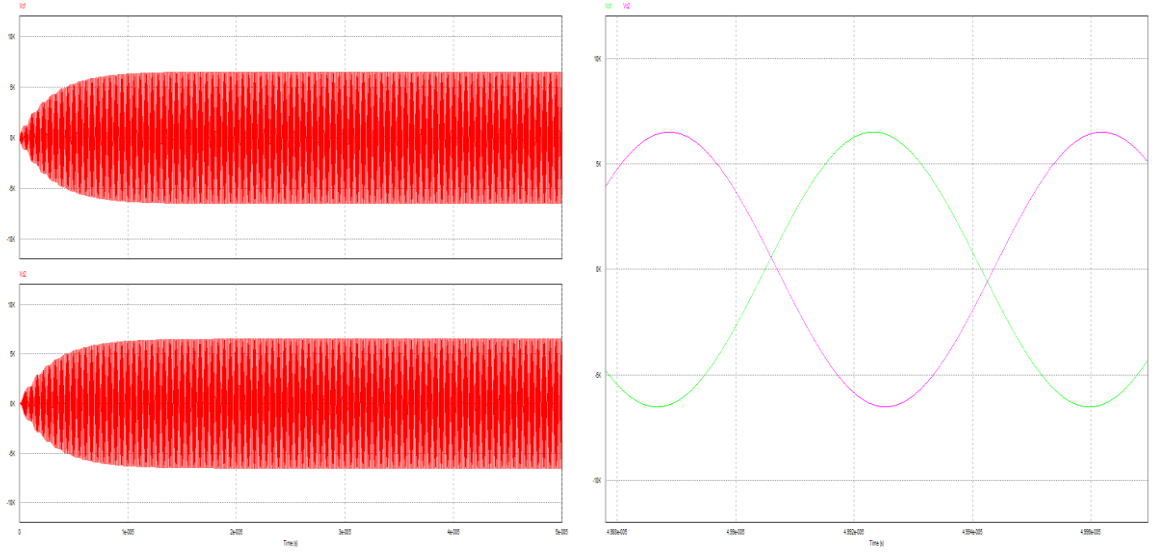
Şekil B.17 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.18 Giriş ve çıkış gücü



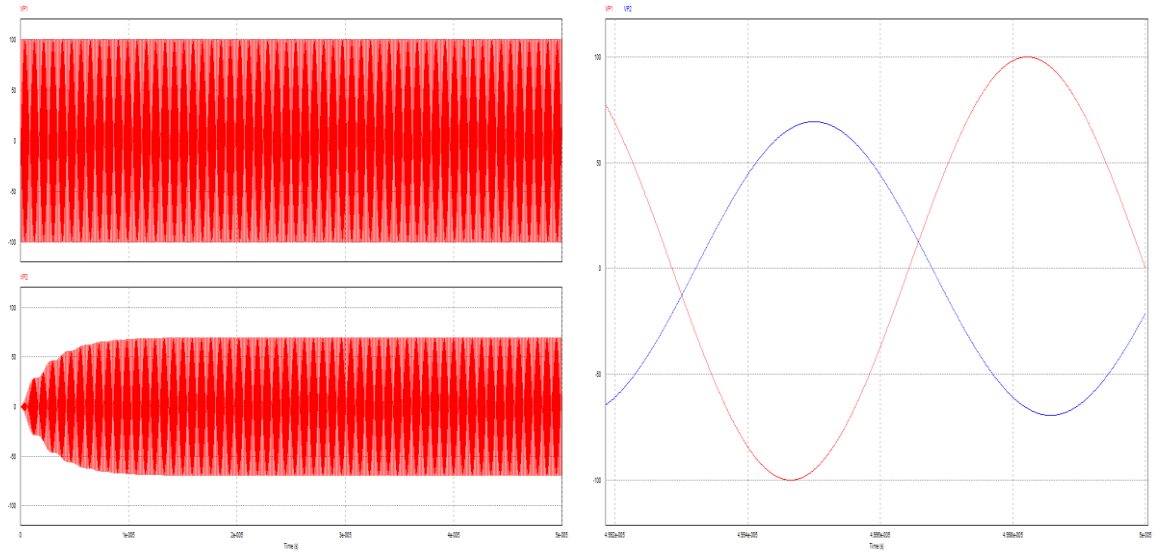
Şekil B.19 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



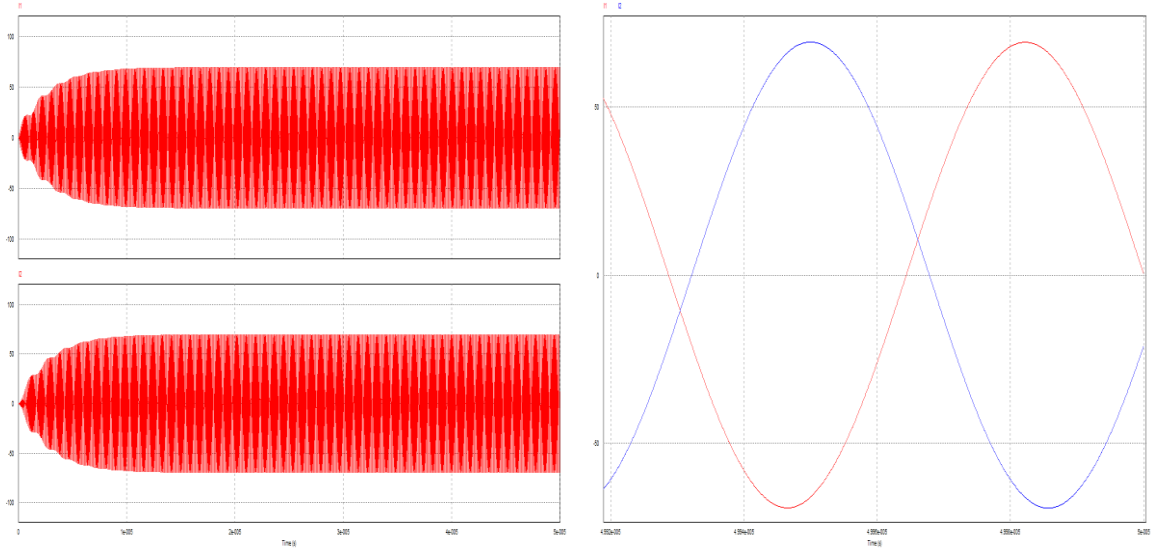
Şekil B.20 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

e) Hava aralığı 20cm için;

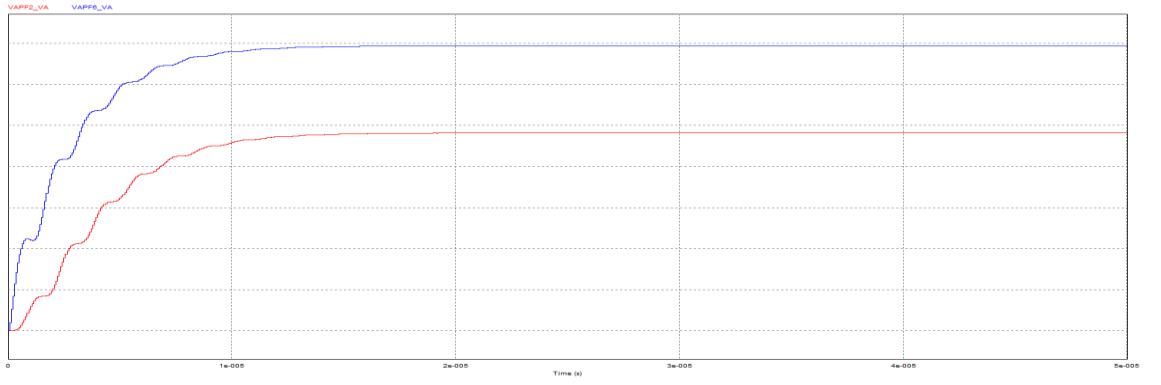
100 V geriliminde 14,010 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 996.7 nH, karşıt endüktans 46.2 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 1 Ω olarak seçilmiştir.



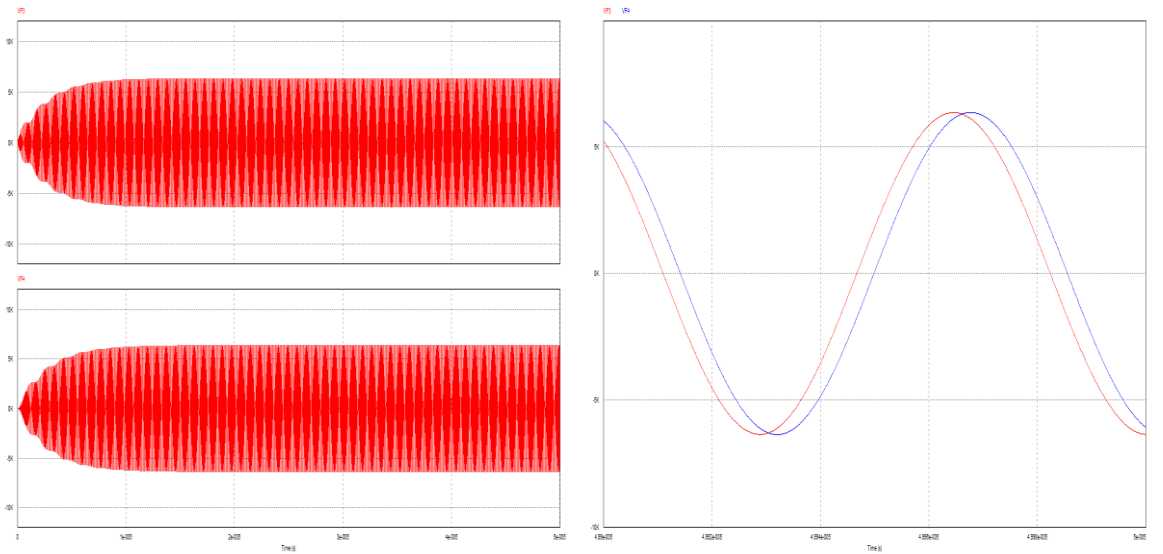
Şekil B.21 Giriş ve çıkış gerilimi



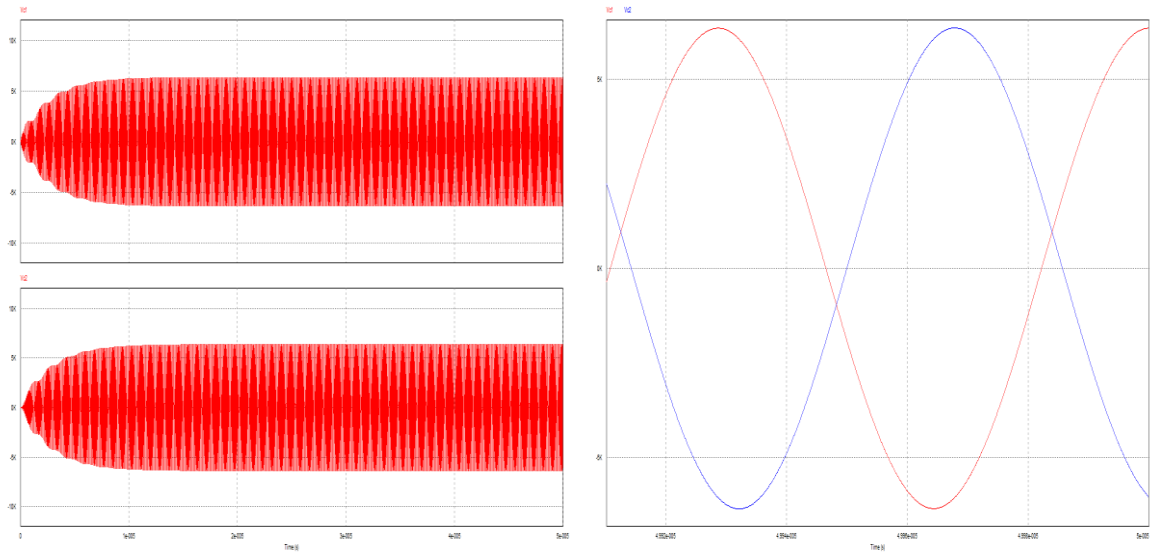
Şekil B.22 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.23 Giriş ve çıkış gücü



Şekil B.24 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

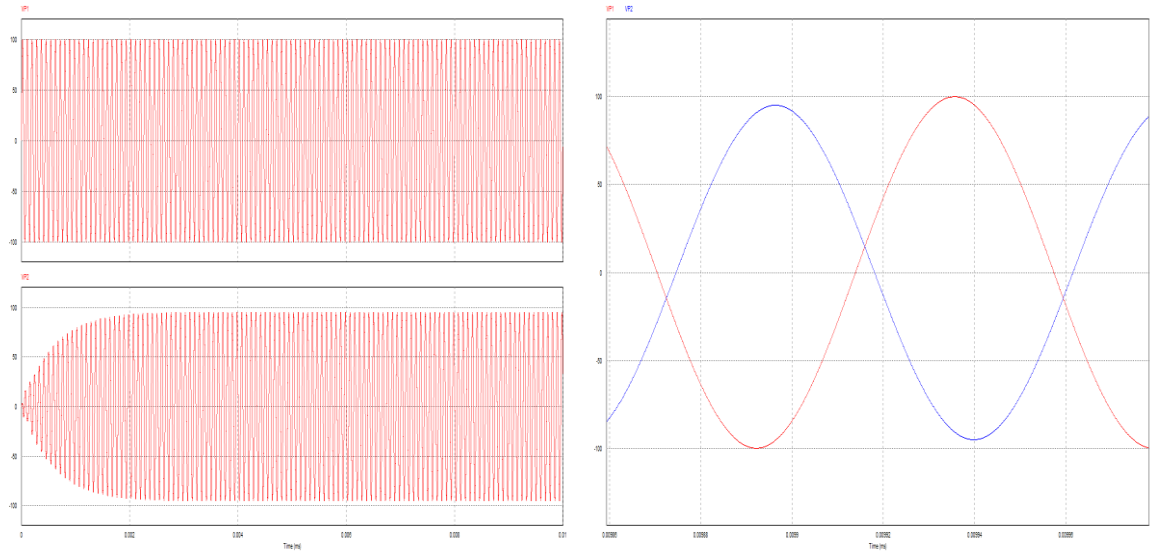


Şekil B.25 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

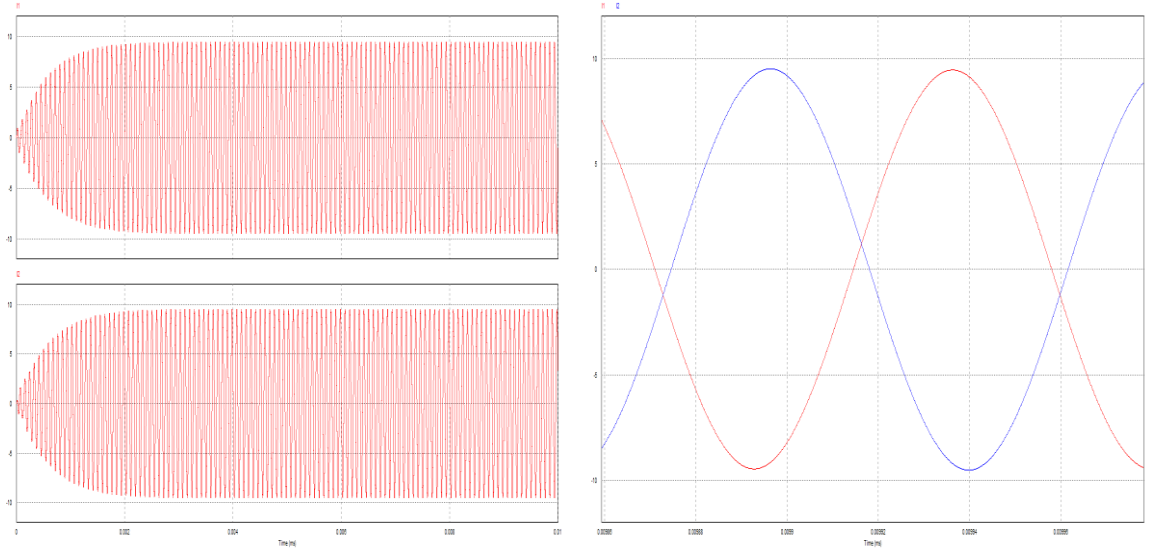
B-2 $Z=10$ ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları

a) Hava aralığı 1cm için;

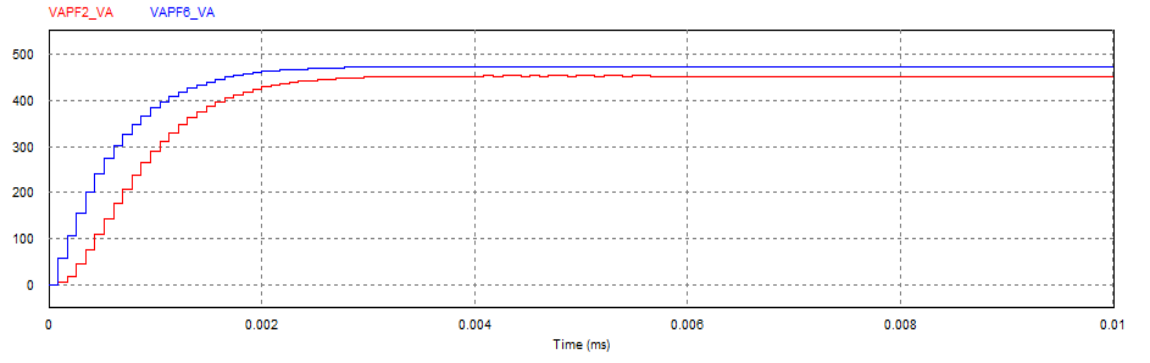
100 V geriliminde 11,499 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1004 nH, karşıt endüktans 562.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 10 Ω olarak seçilmiştir.



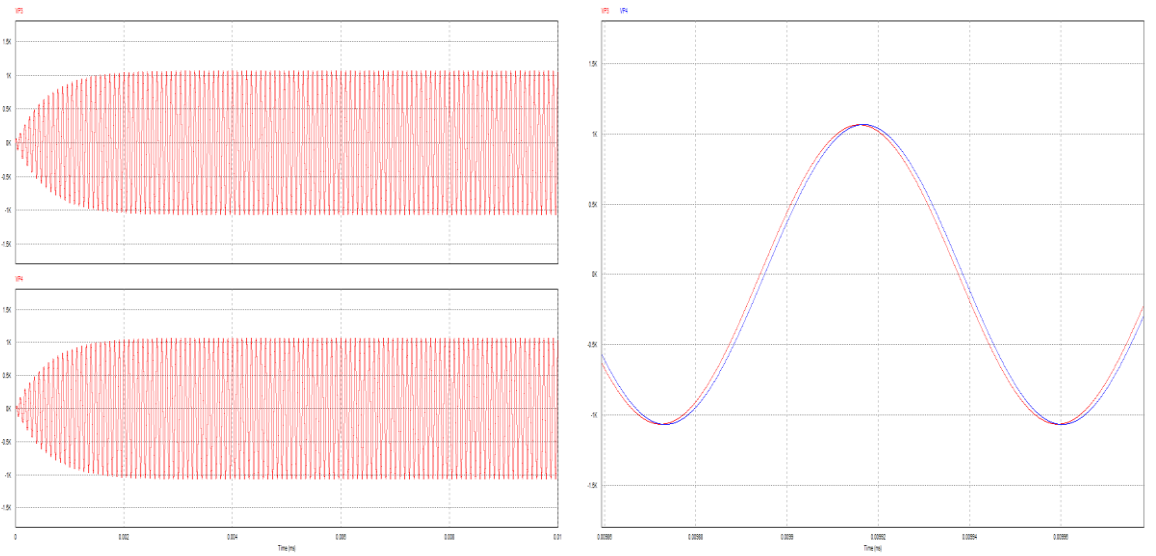
Şekil B.26 Giriş ve çıkış gerilimi



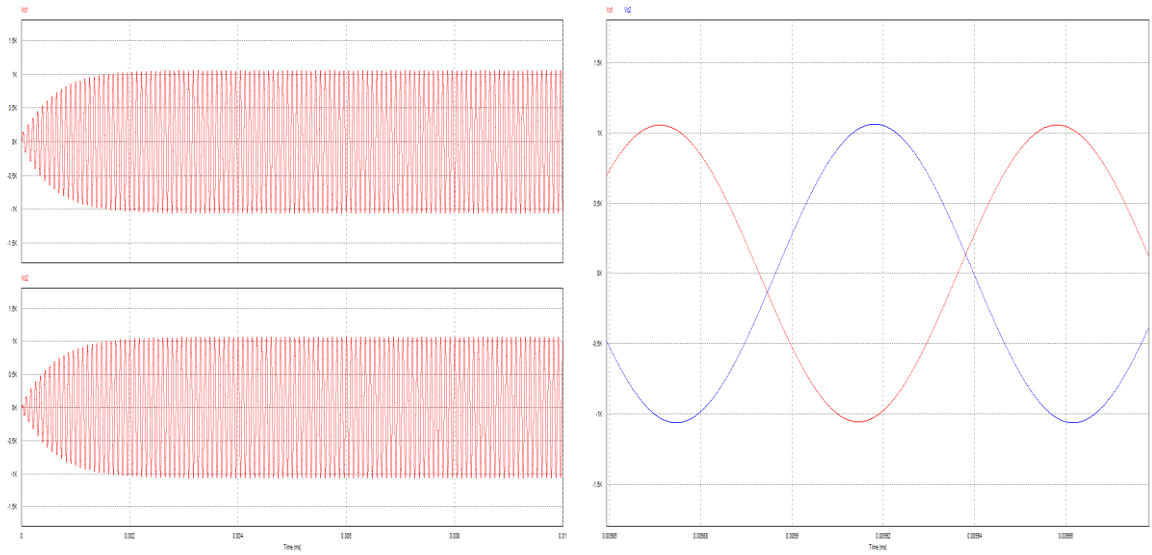
Şekil B.27 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.28 Giriş ve çıkış gücü



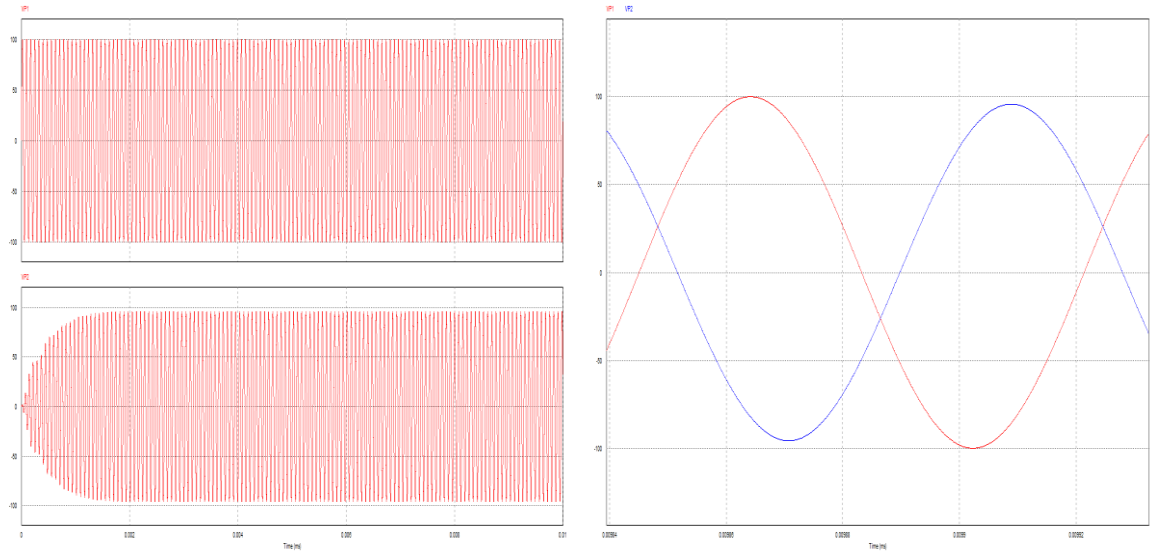
Şekil B.29 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



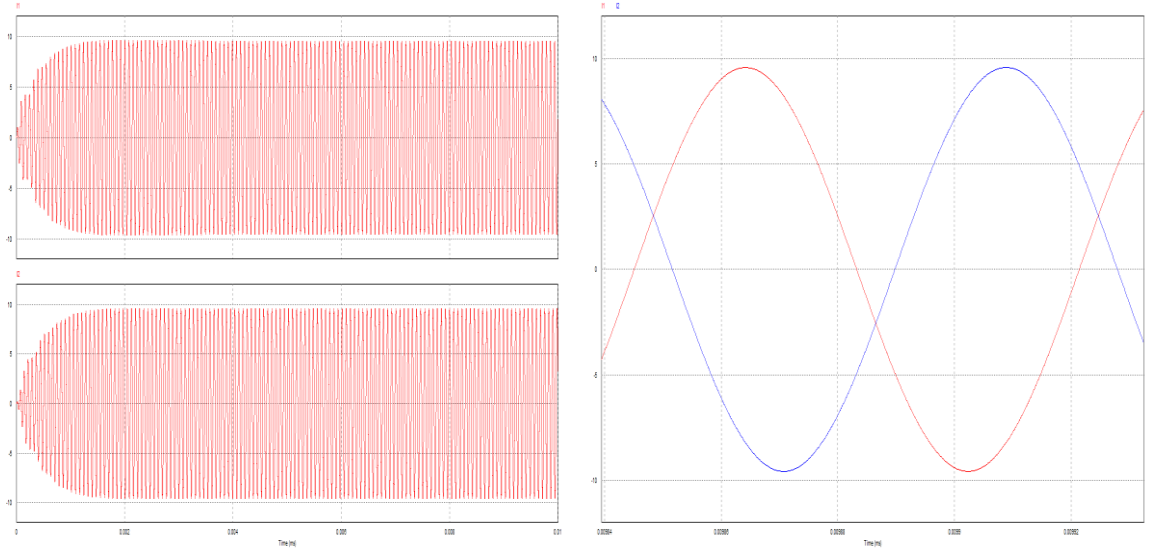
Şekil B.30 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

b) Hava aralığı 5cm için;

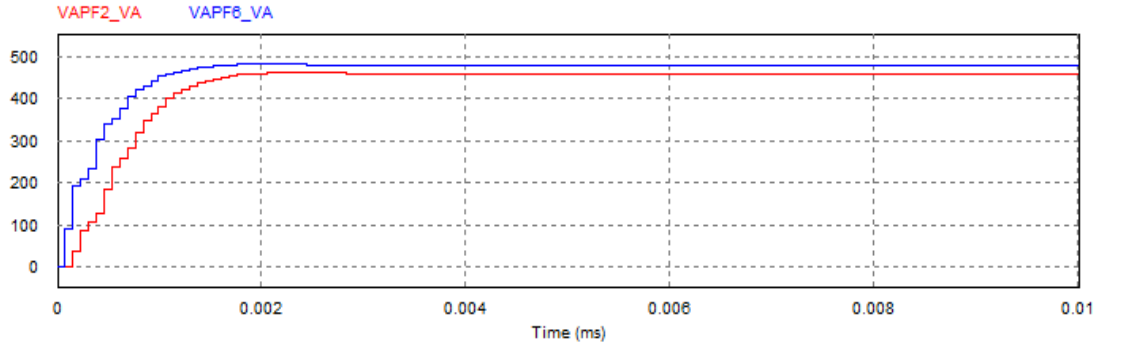
100 V geriliminde 13,103 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 982.4 nH, karşıt endüktans 241.8 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 10 Ω olarak seçilmiştir.



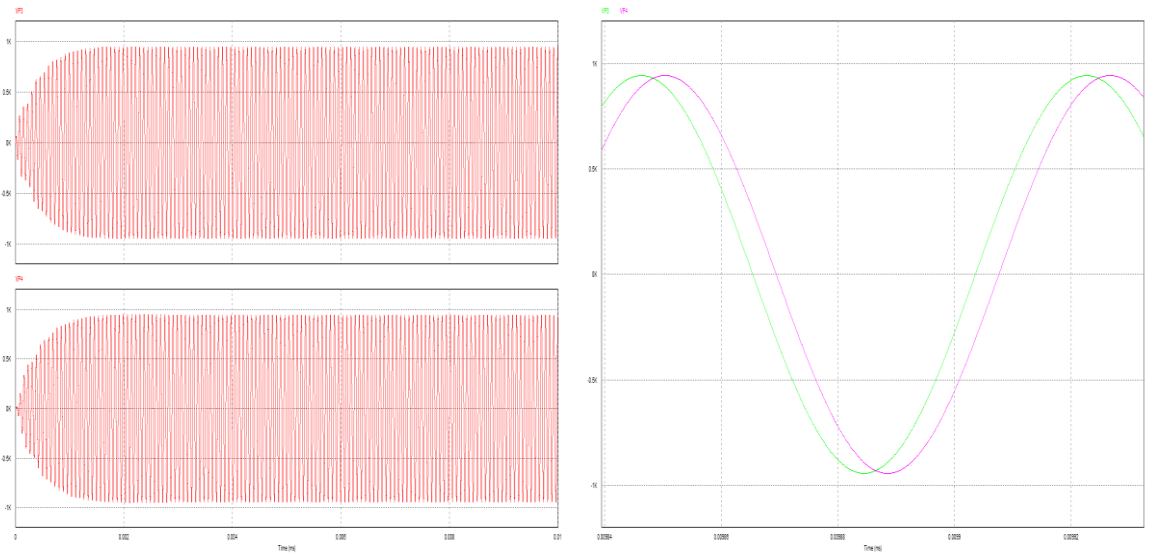
Şekil B.31 Giriş ve çıkış gerilimi



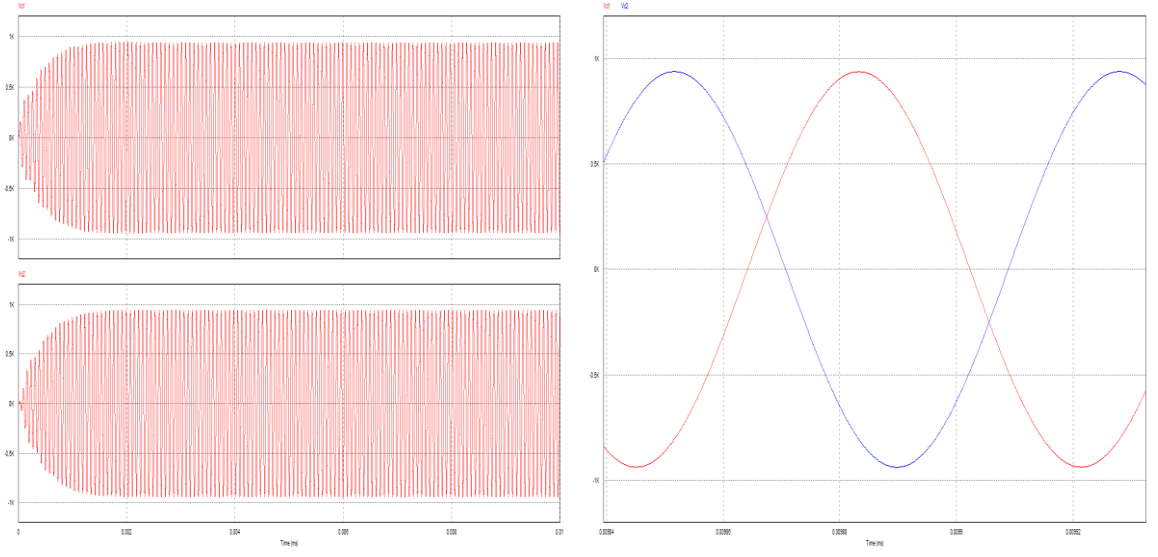
Şekil B.32 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.33 Giriş ve çıkış gücü



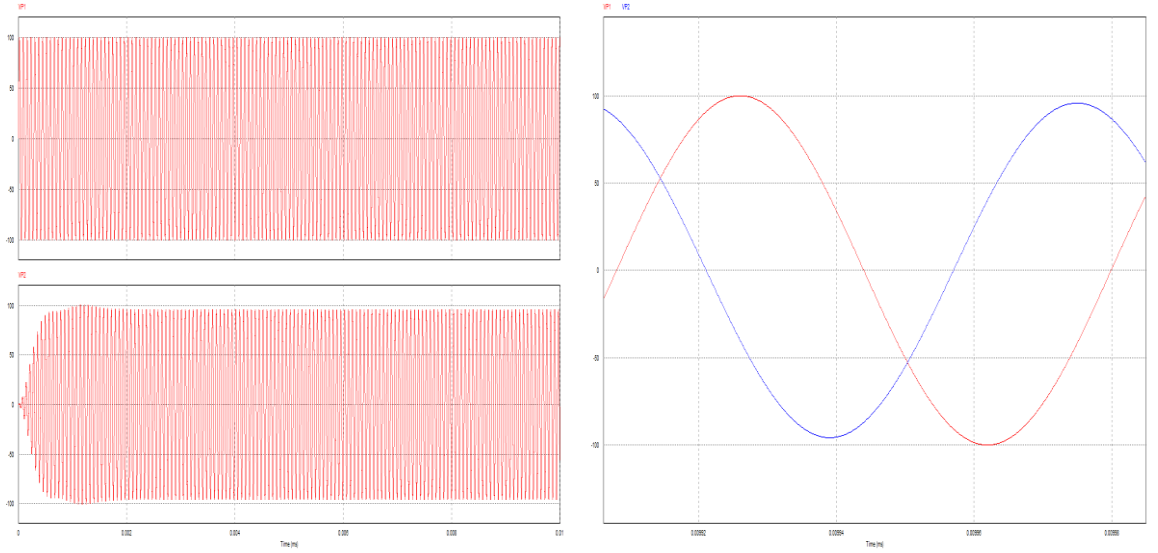
Şekil B.34 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



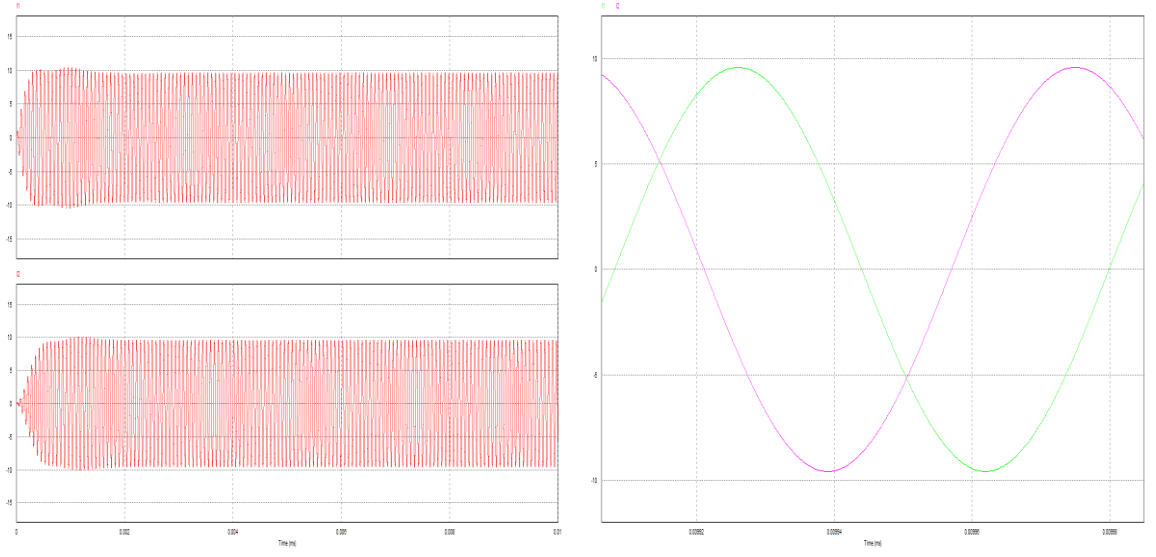
Şekil B.35 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

c) Hava aralığı 10cm için;

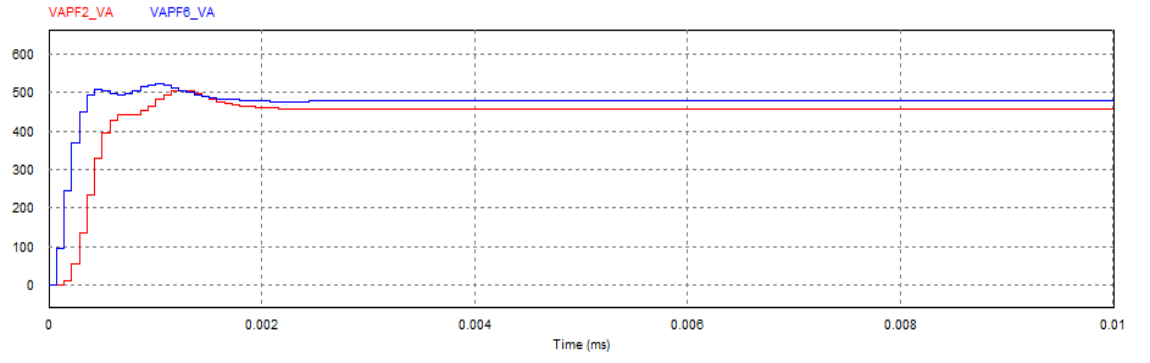
100 V geriliminde 13,928 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 999.2 nH, karşıt endüktans 128.6 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 10 Ω olarak seçilmiştir.



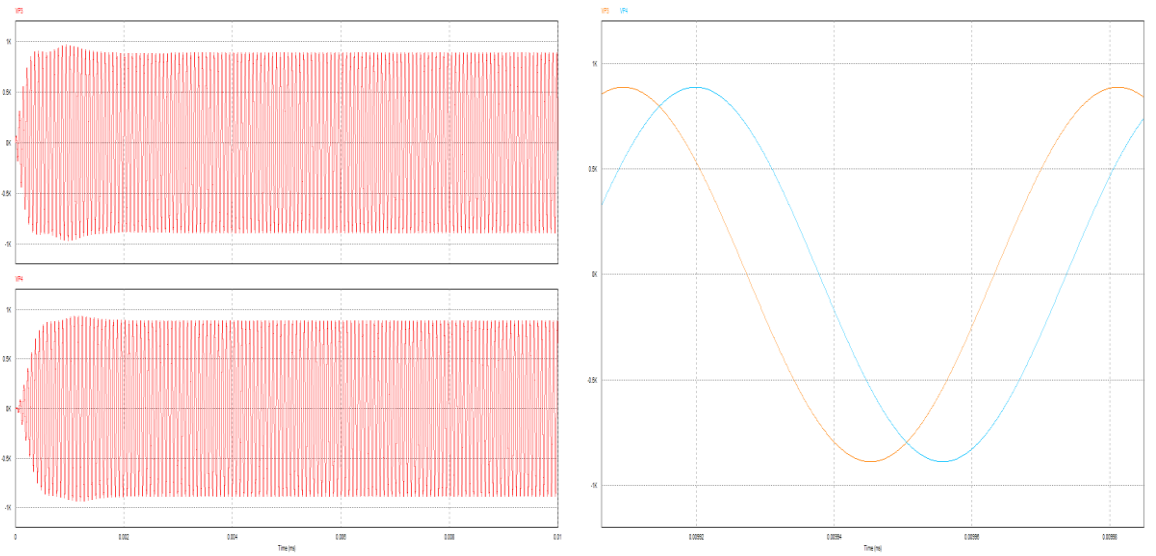
Şekil B.36 Giriş ve çıkış gerilimi



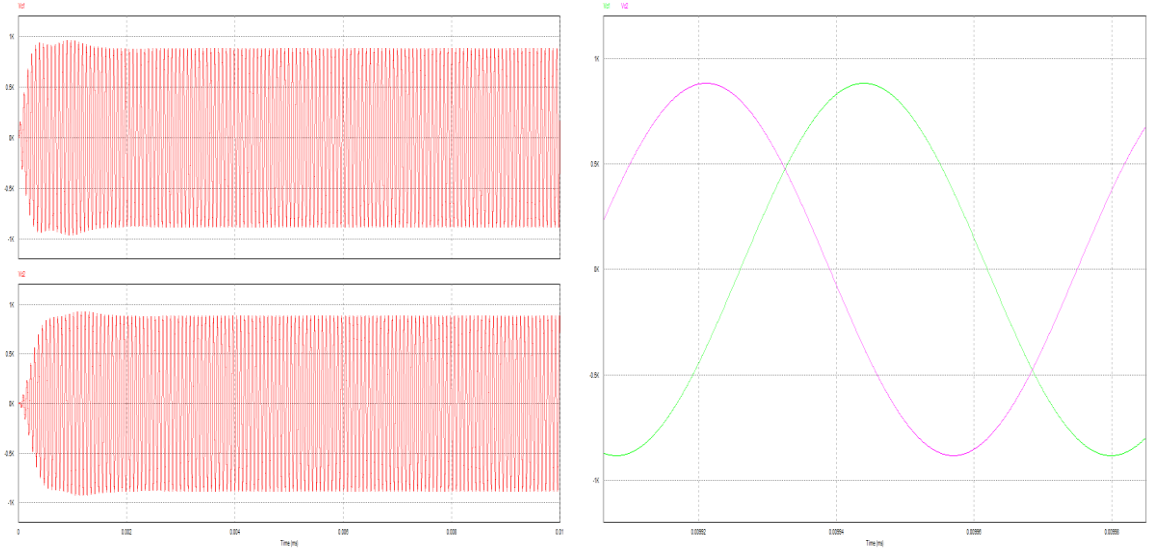
Şekil B.37 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.38 Giriş ve çıkış gücü



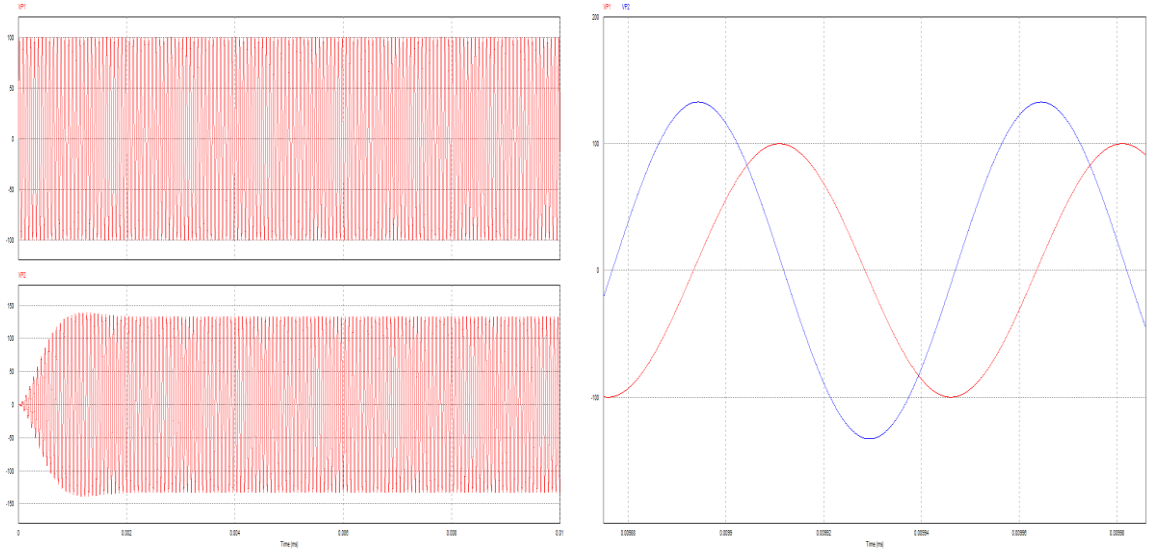
Şekil B.39 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



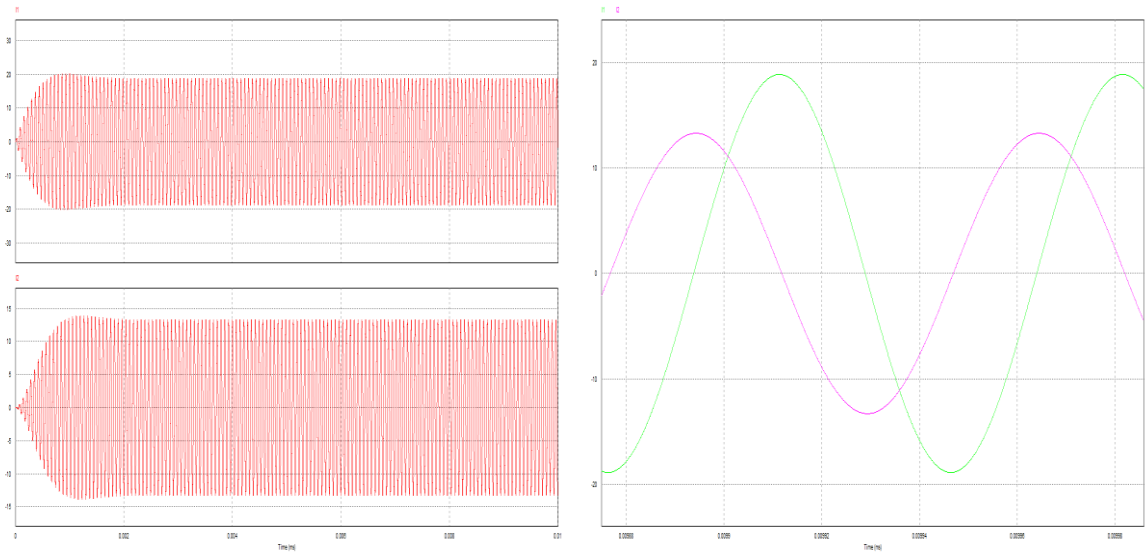
Şekil B.40 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

d) Hava aralığı 15cm için;

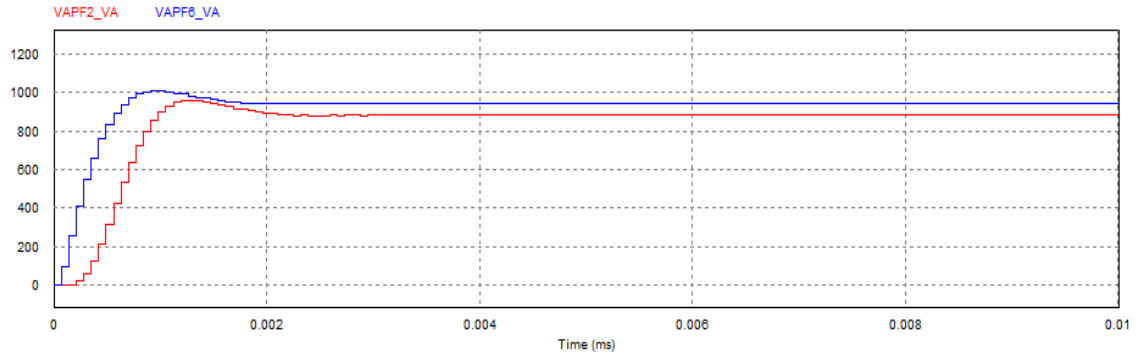
100 V geriliminde 14,252 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1010.5 nH, karşıt endüktans 80.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 10 Ω olarak seçilmiştir.



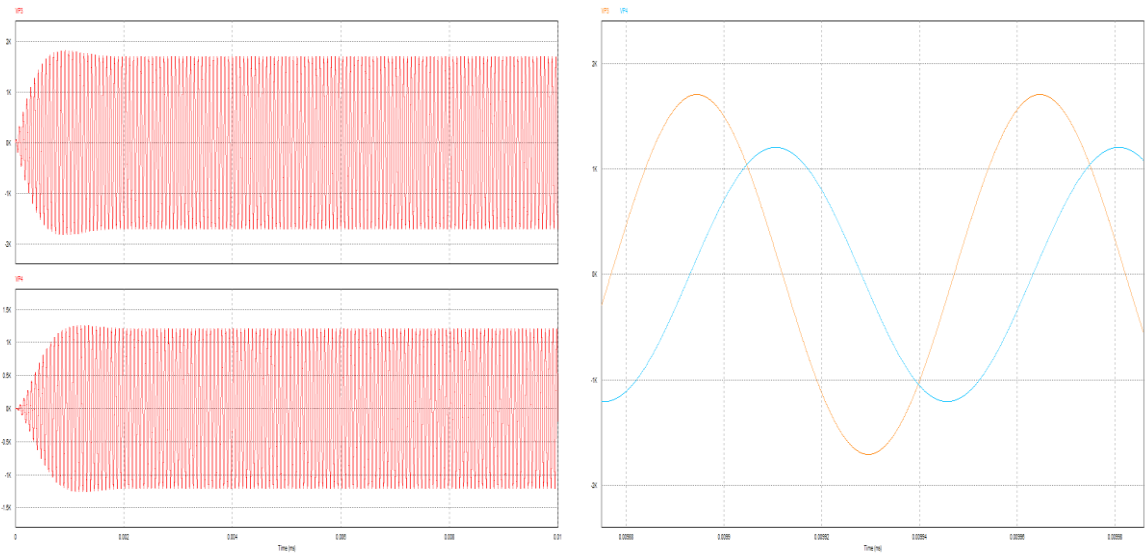
Şekil B.41 Giriş ve çıkış gerilimi



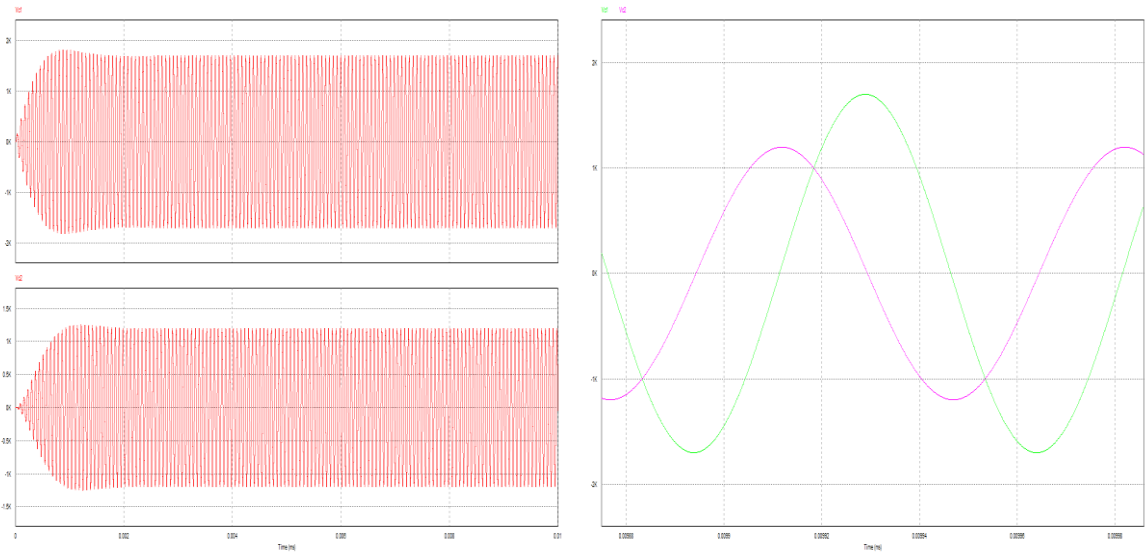
Şekil B.42 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.43 Giriş ve çıkış gücü



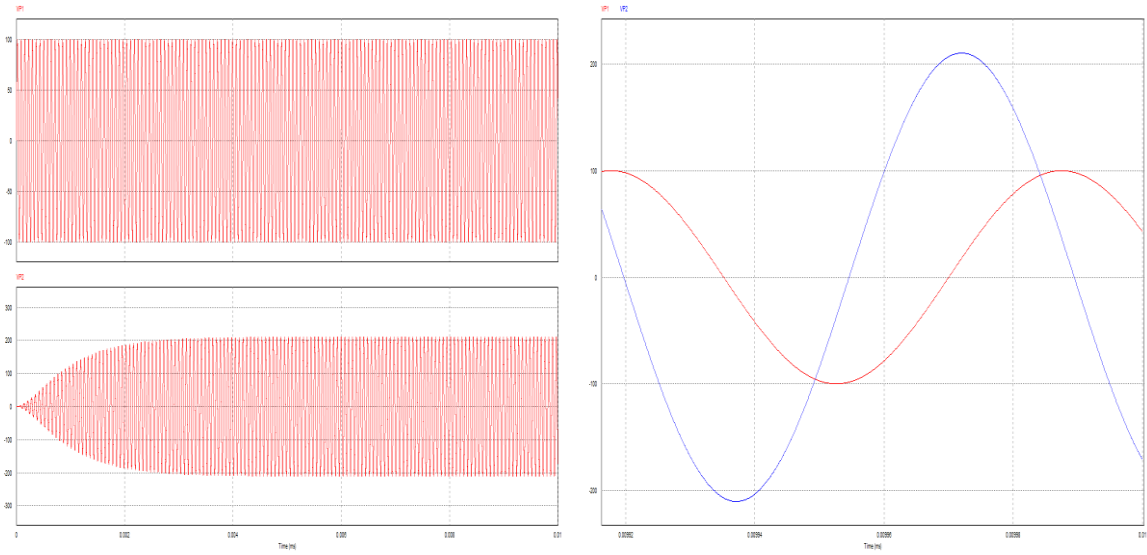
Şekil B.44 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



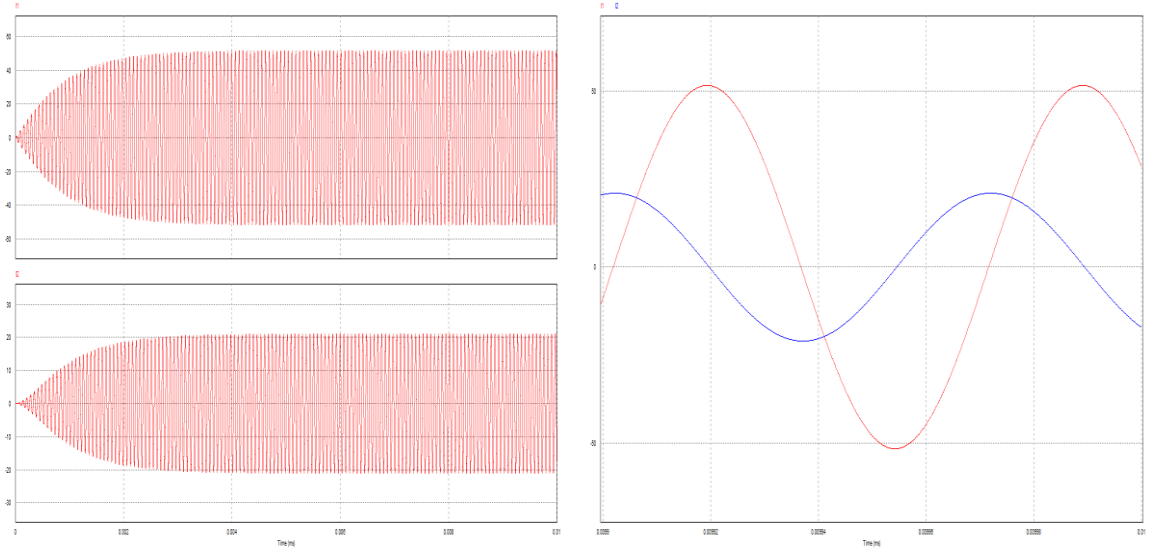
Şekil B.45 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

e) Hava aralığı 20cm için;

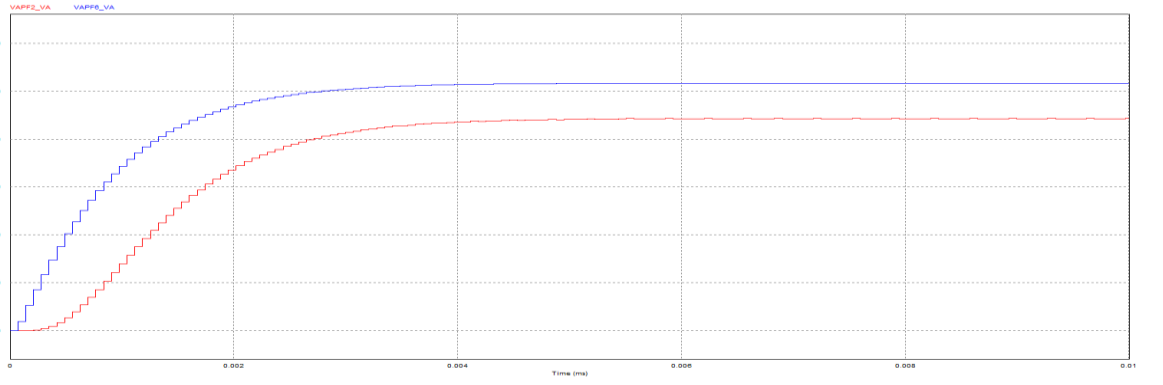
100 V geriliminde 14,343 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 996.7 nH, karşıt endüktans 46.2 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 10 Ω olarak seçilmiştir.



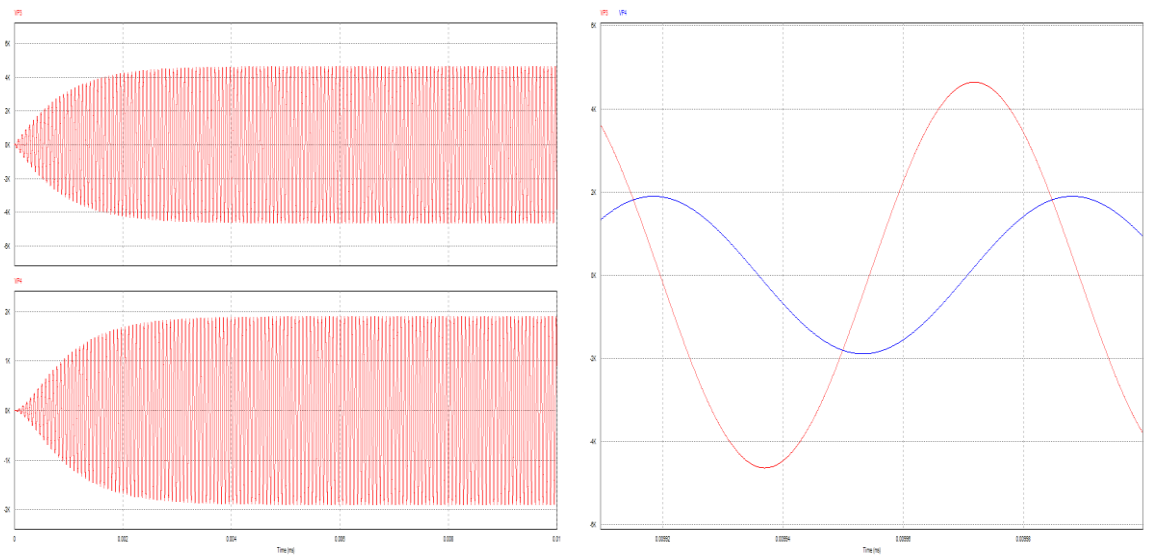
Şekil B.46 Giriş ve çıkış gerilimi



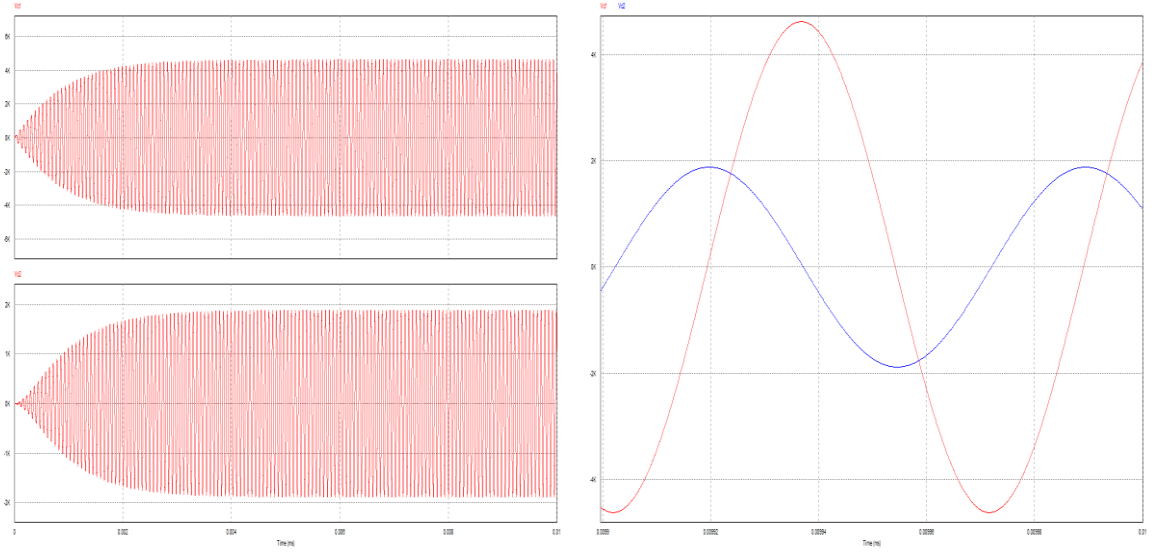
Şekil B.47 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil 4.48 Giriş ve çıkış gücü



Şekil B.49 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

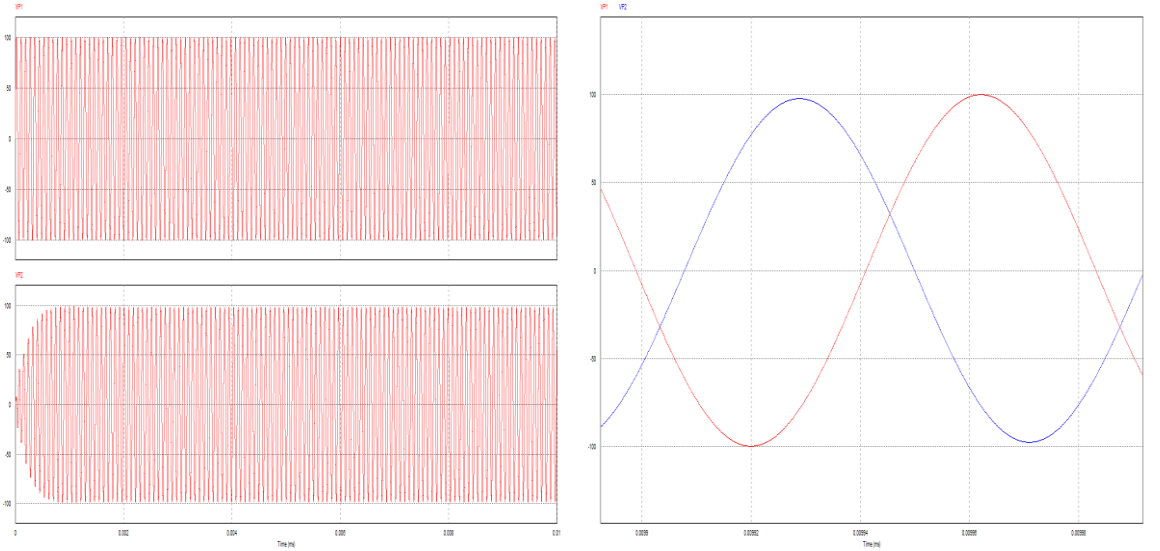


Şekil B.50 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

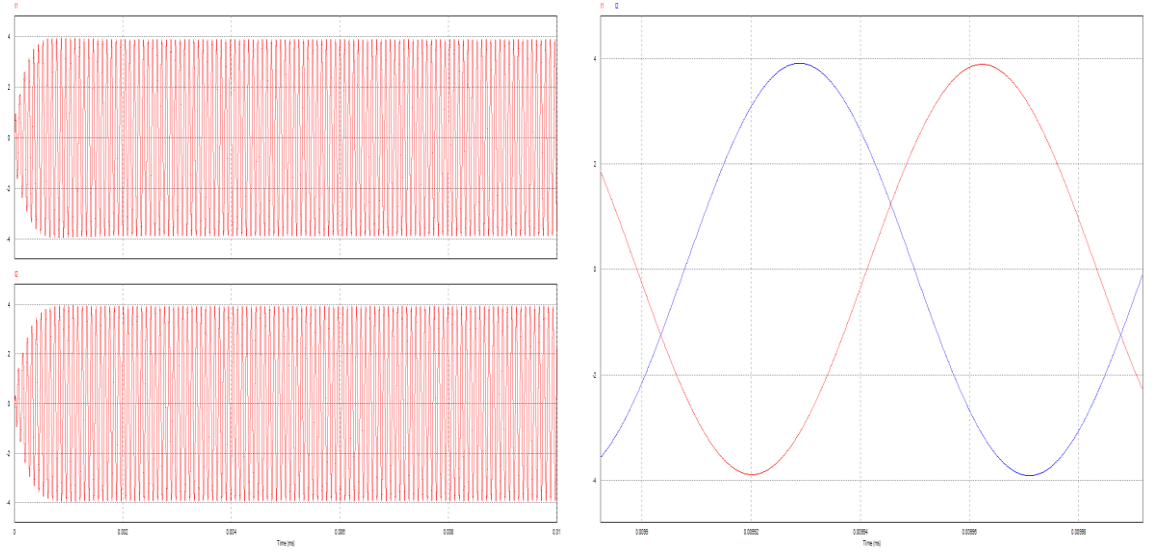
B-3 $Z=25$ ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları

a) Hava aralığı 1cm için;

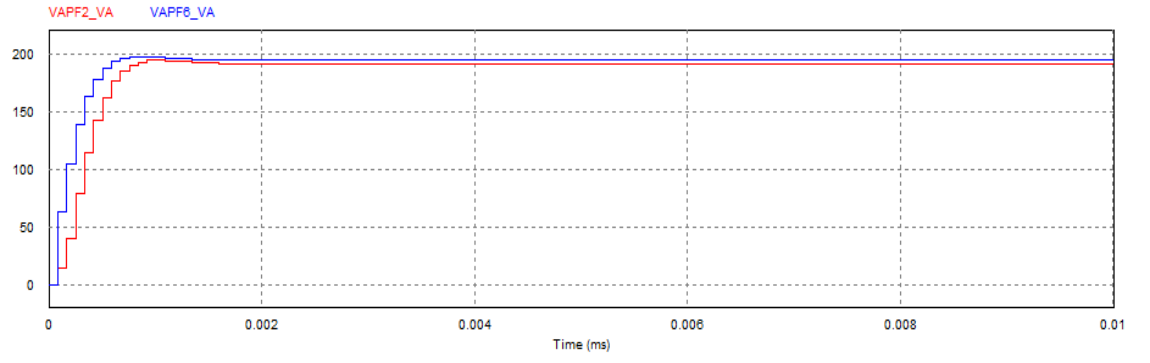
100 V geriliminde 11,870 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1004 nH, karşıt endüktans 562.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 25 Ω olarak seçilmiştir.



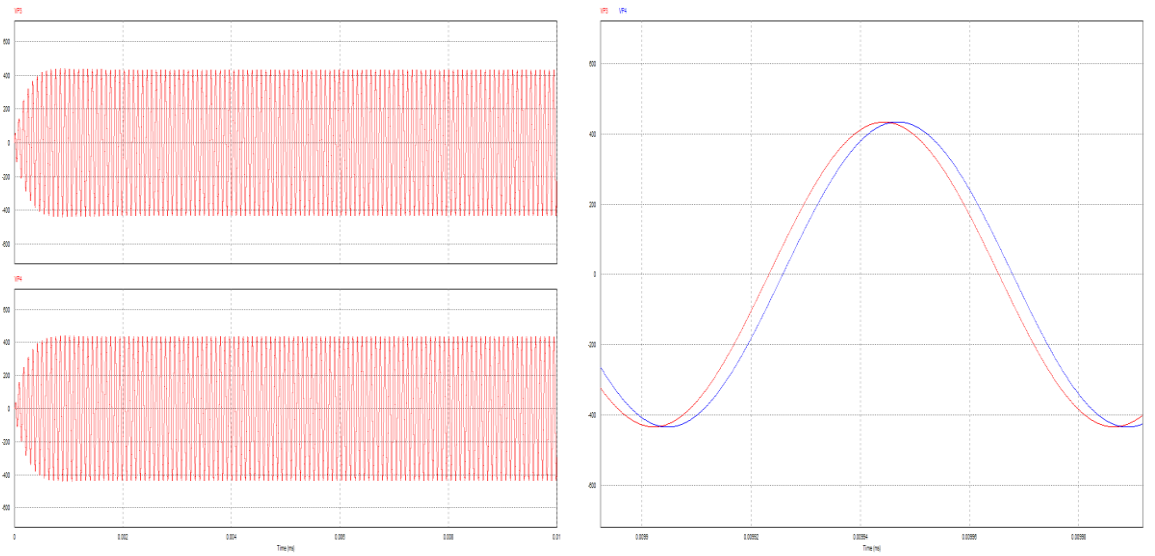
Şekil B.51 Giriş ve çıkış gerilimi



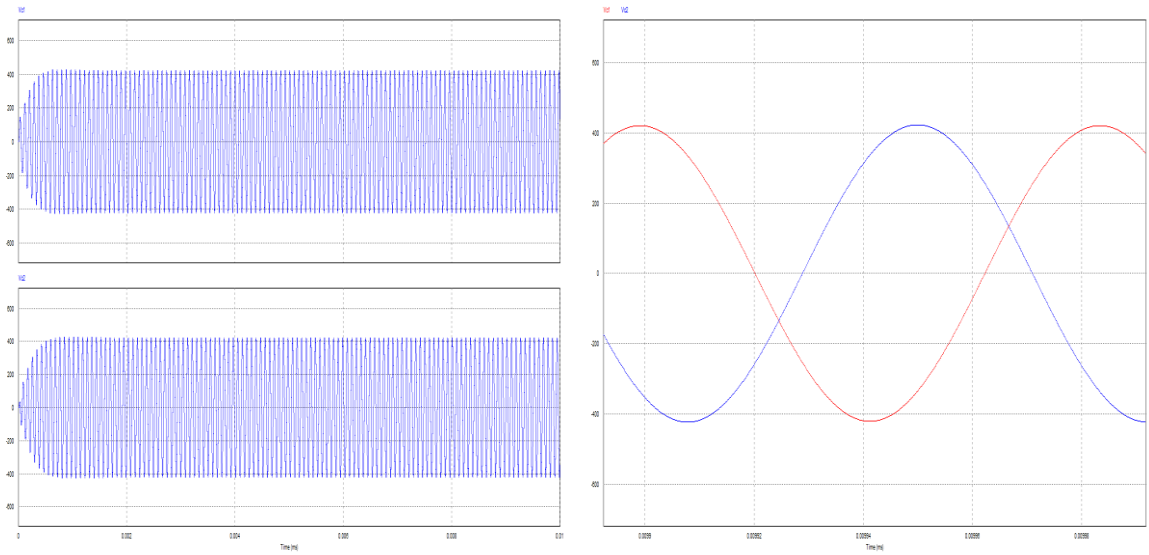
Şekil B.52 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.53 Giriş ve çıkış gücü



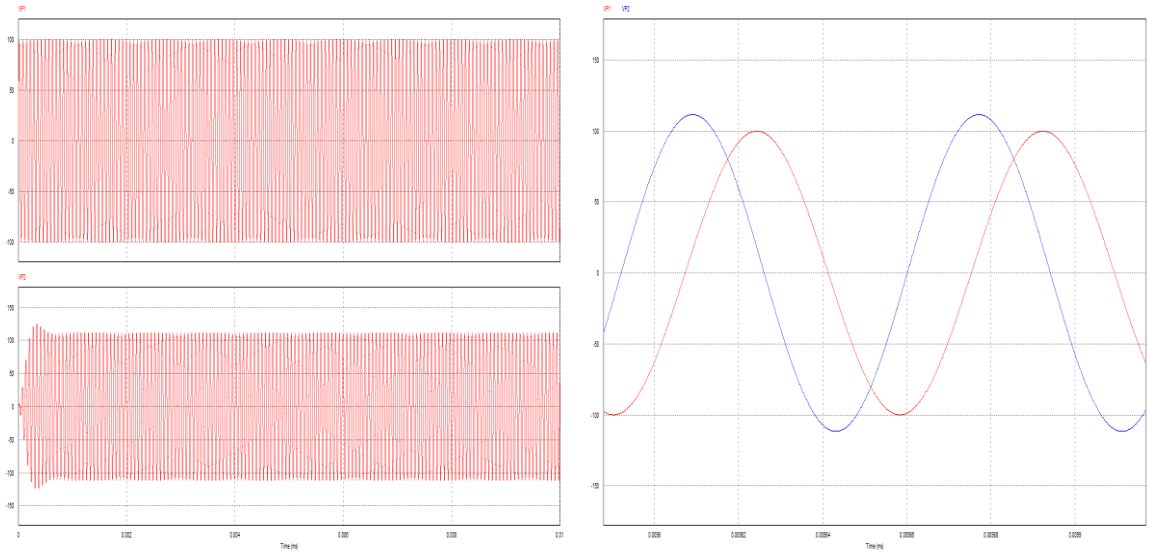
Şekil B.54 Birinci ve ikinci sargı uç gerilimi



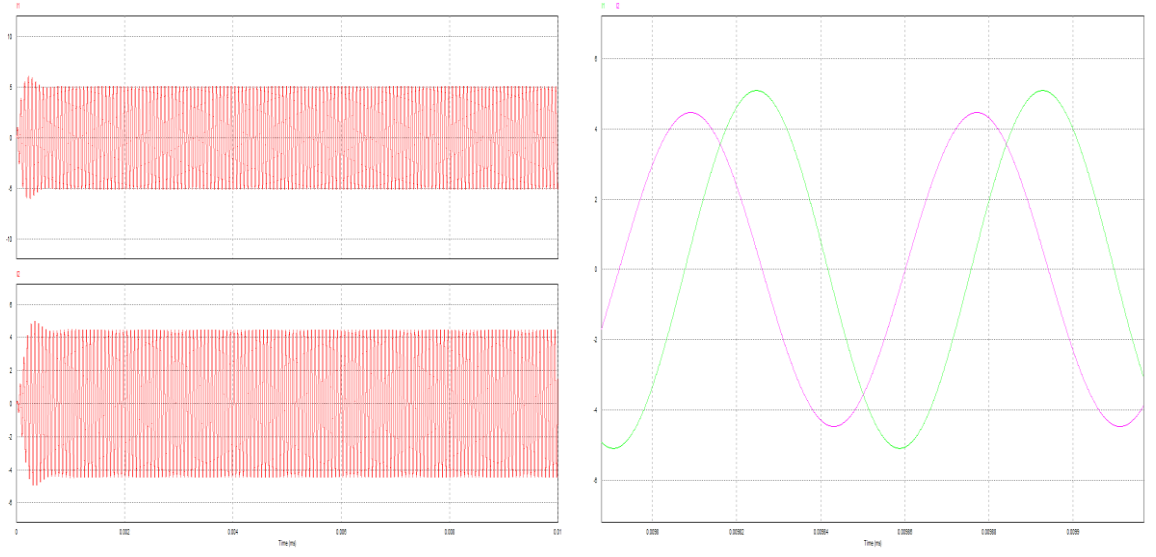
Şekil B.55 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

b) Hava aralığı 5cm için;

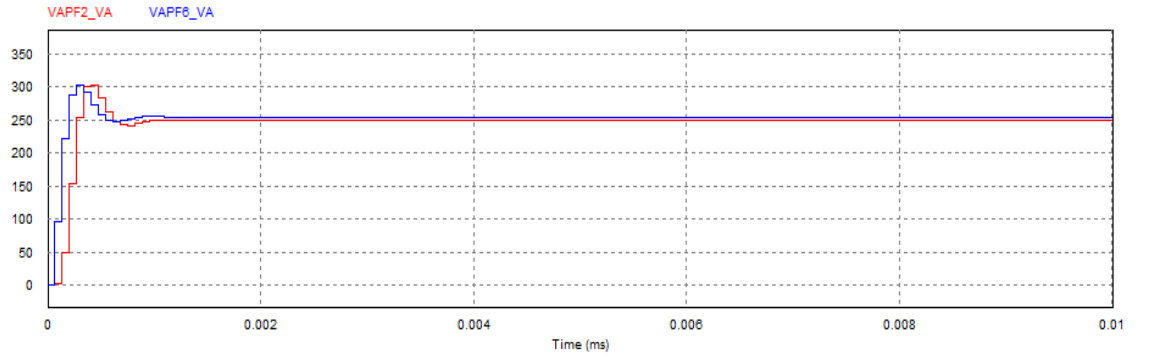
100 V geriliminde 14,683 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 982.4 nH, karşıt endüktans 241.8 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 25 Ω olarak seçilmiştir.



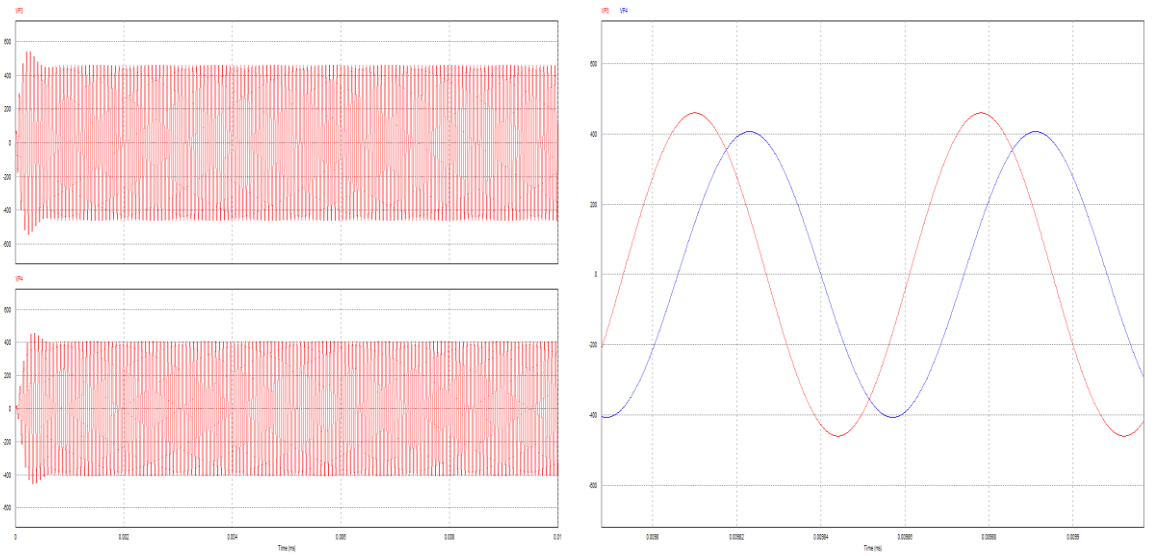
Şekil B.56 Giriş ve çıkış gerilimi



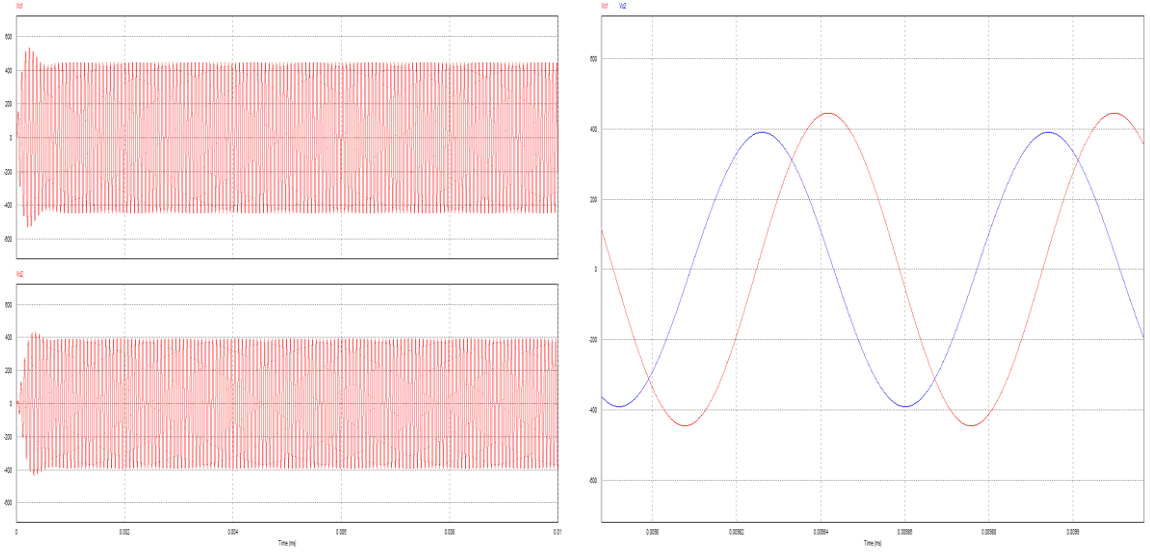
Şekil B.57 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.58 Giriş ve çıkış gücü



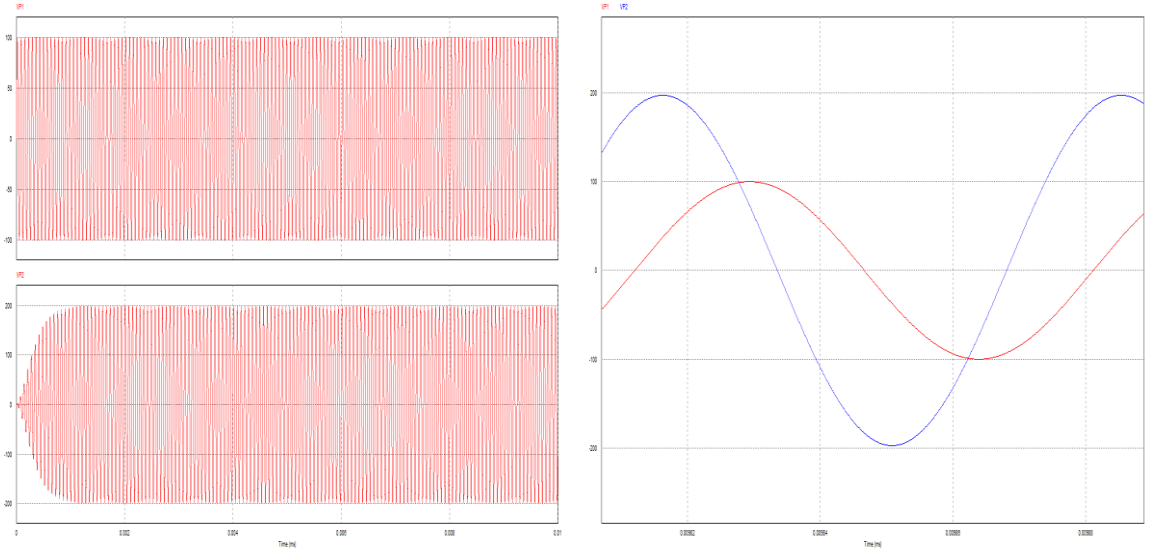
Şekil B.59 Birinci ve ikinci sargı uç gerilimi



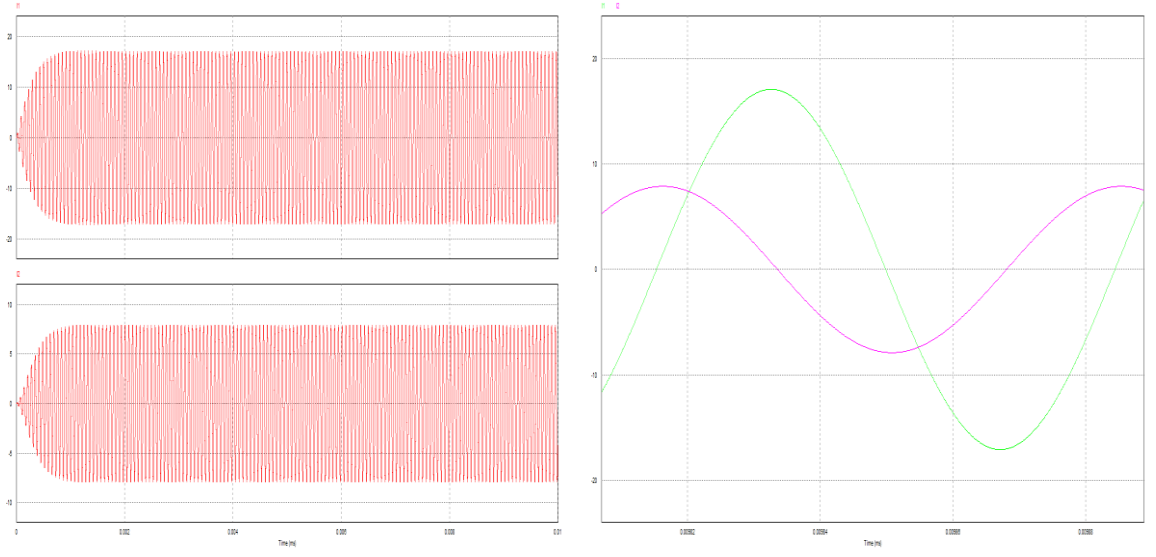
Şekil B.60 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

c) Hava aralığı 10cm için;

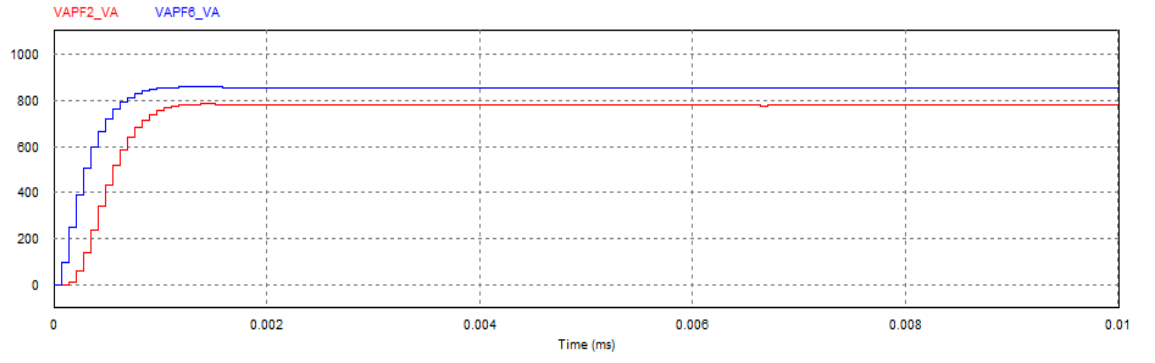
100 V geriliminde 14,472 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 999.2 nH, karşıt endüktans 128.6 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 25 Ω olarak seçilmiştir.



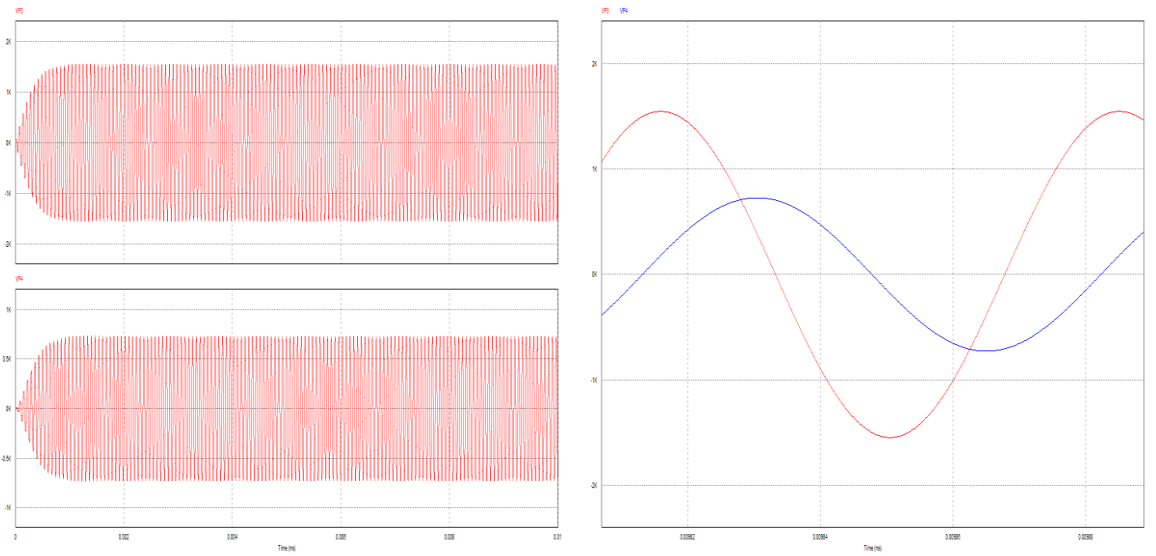
Şekil B.61 Giriş ve çıkış gerilimi



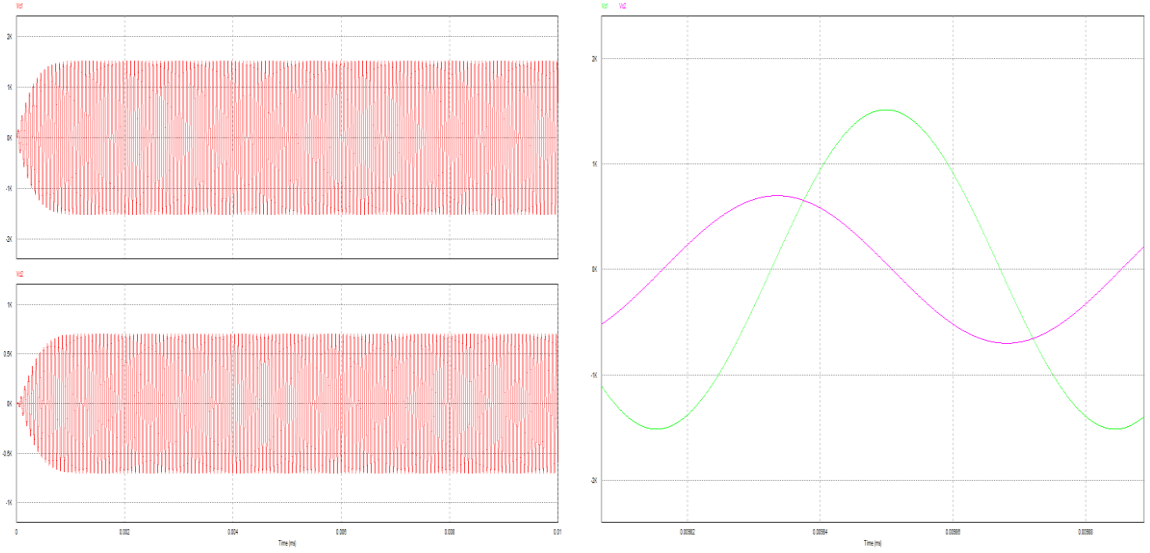
Şekil B.62 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.63 Giriş ve çıkış gücü



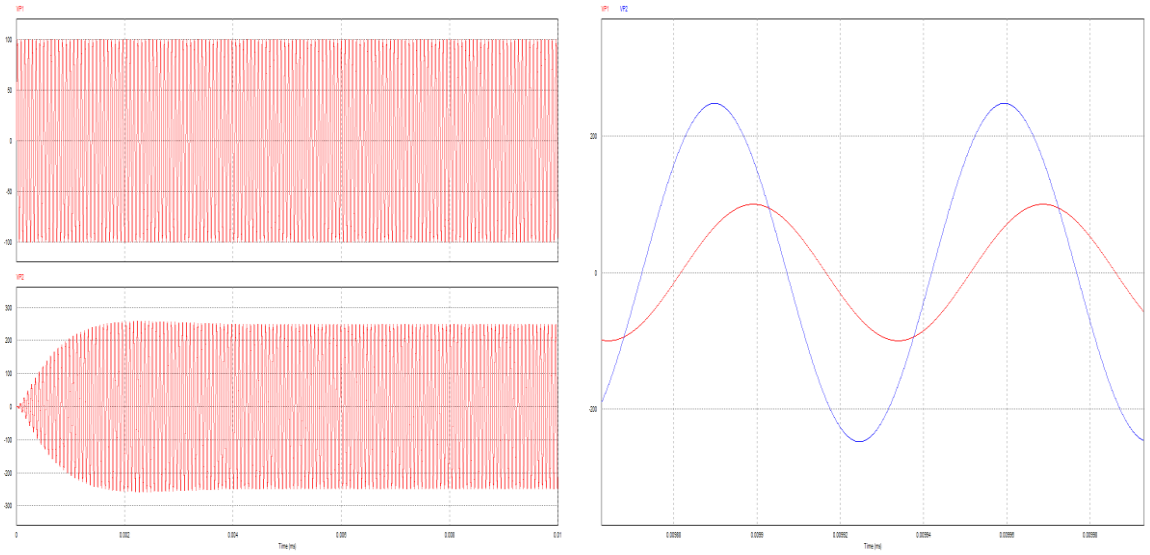
Şekil B.64 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



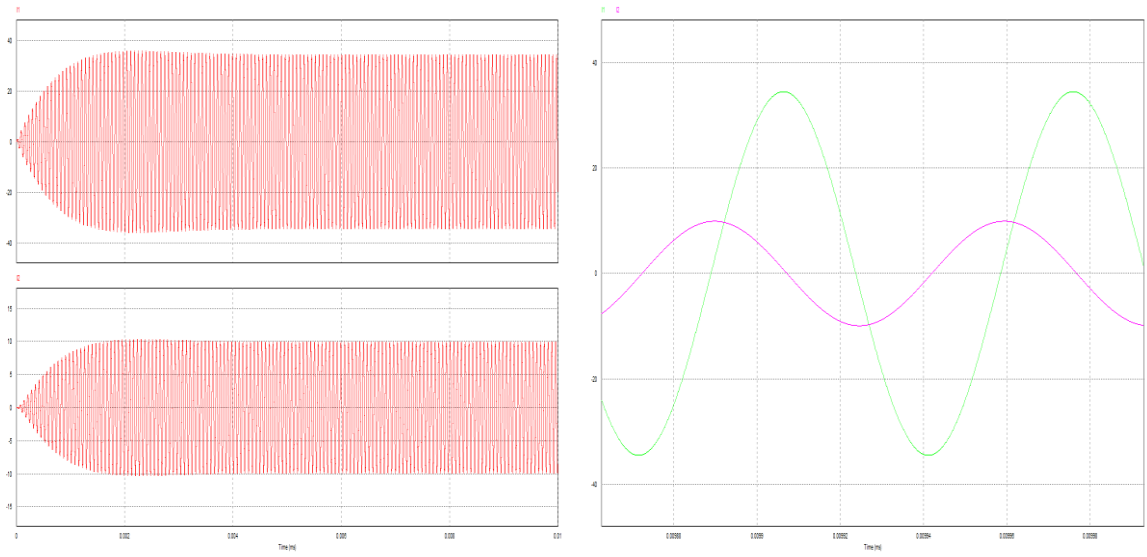
Şekil B.65 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

d) Hava aralığı 15cm için;

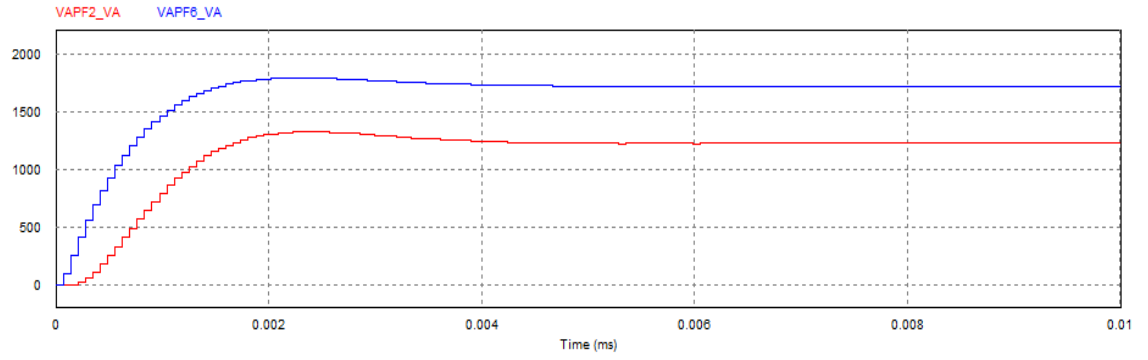
100 V geriliminde 14,370 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1010.5 nH, karşıt endüktans 80.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 25 Ω olarak seçilmiştir.



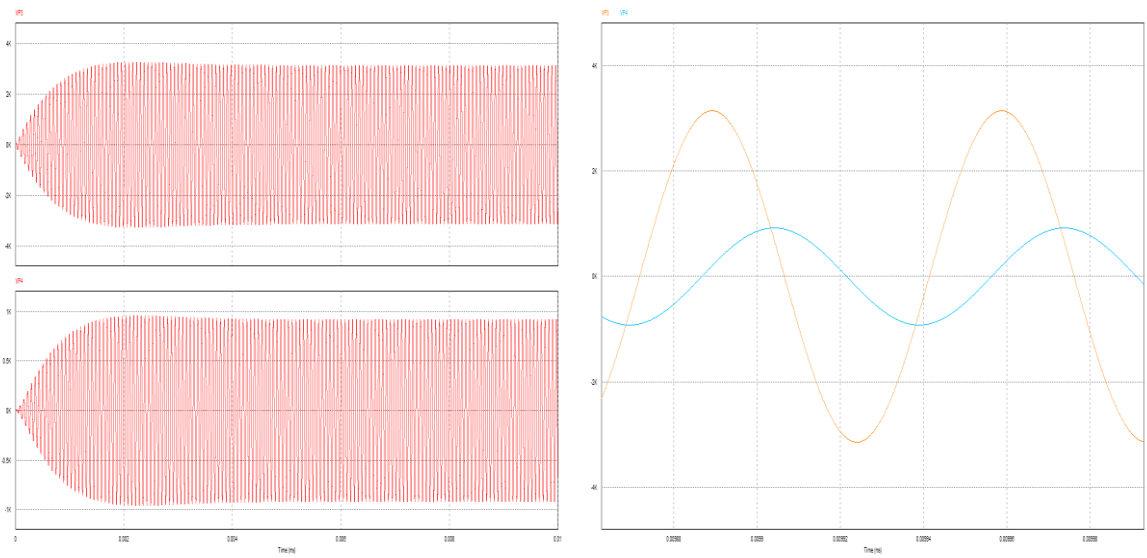
Şekil B.66 Giriş ve çıkış gerilimi



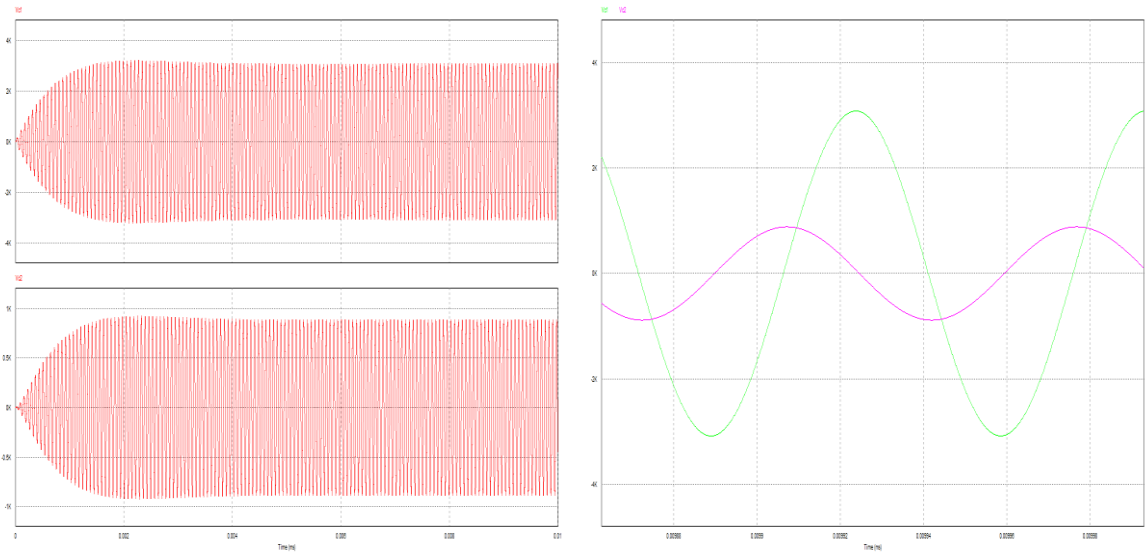
Şekil B.67 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.68 Giriş ve çıkış gücü



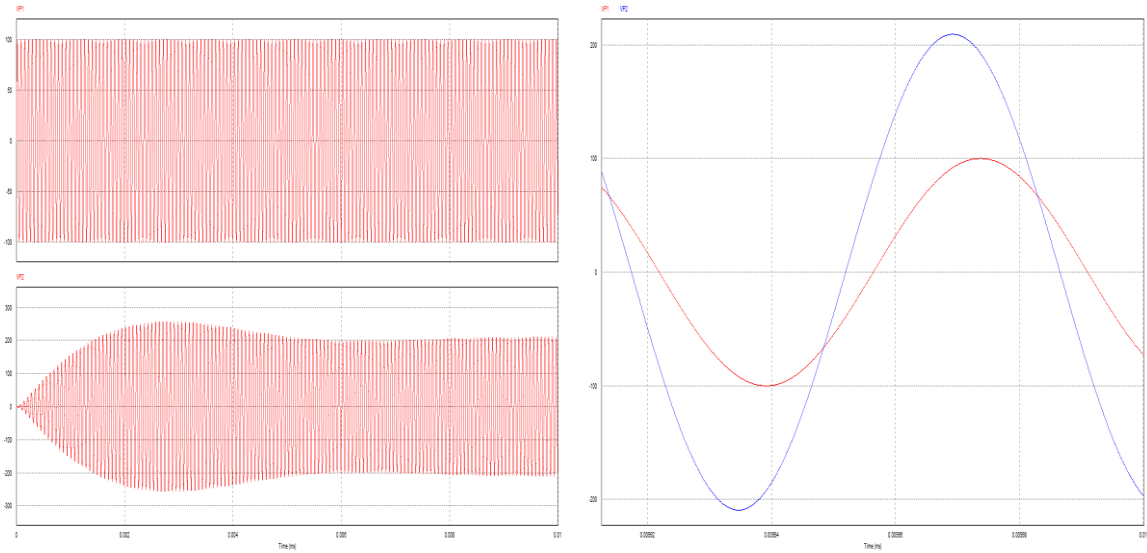
Şekil B.69 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



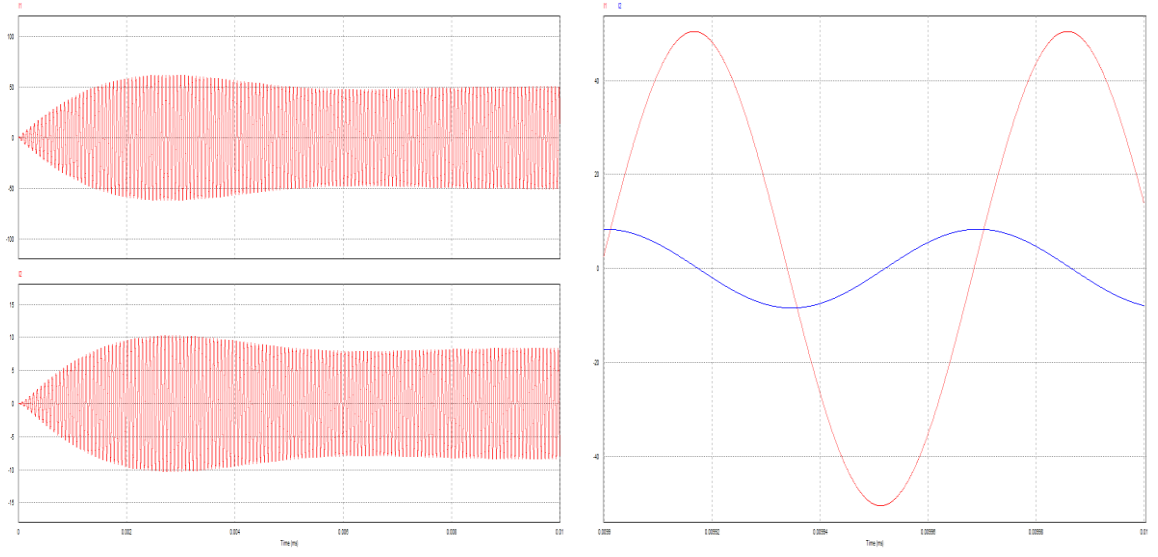
Şekil B.70 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

e) Hava aralığı 20cm için;

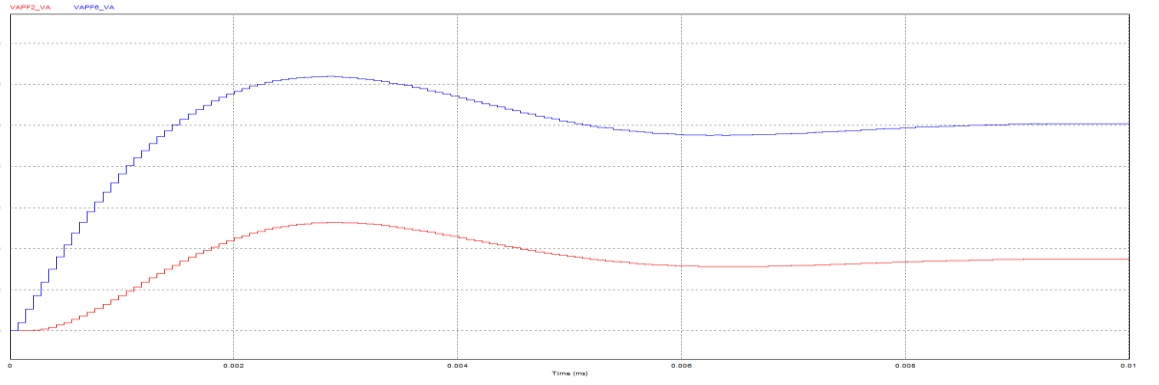
100 V geriliminde 14,463 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 996.7 nH, karşıt endüktans 46.2 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 25 Ω olarak seçilmiştir.



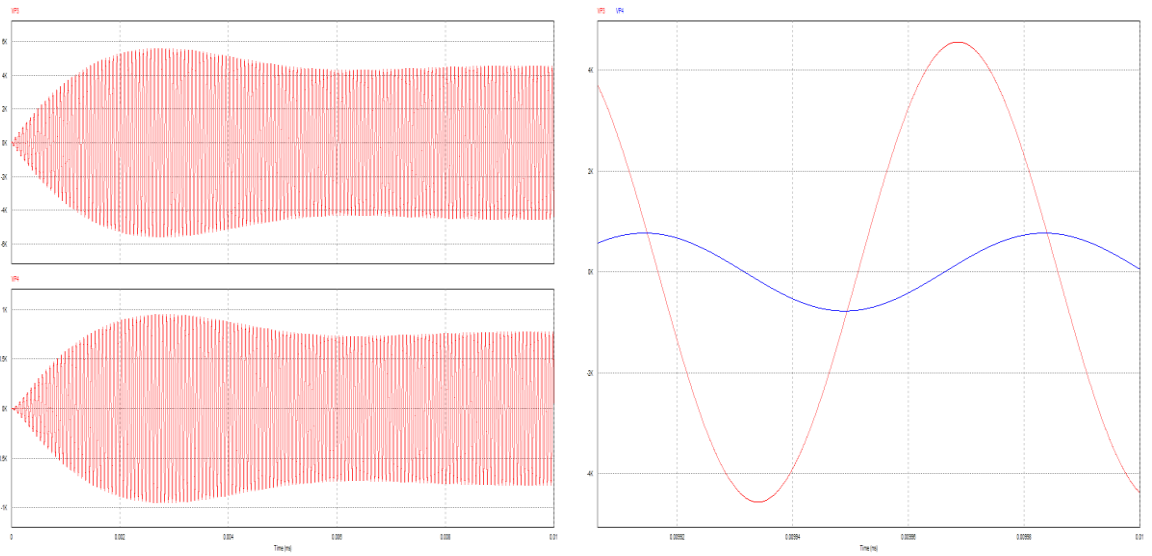
Şekil B.71 Giriş ve çıkış gerilimi



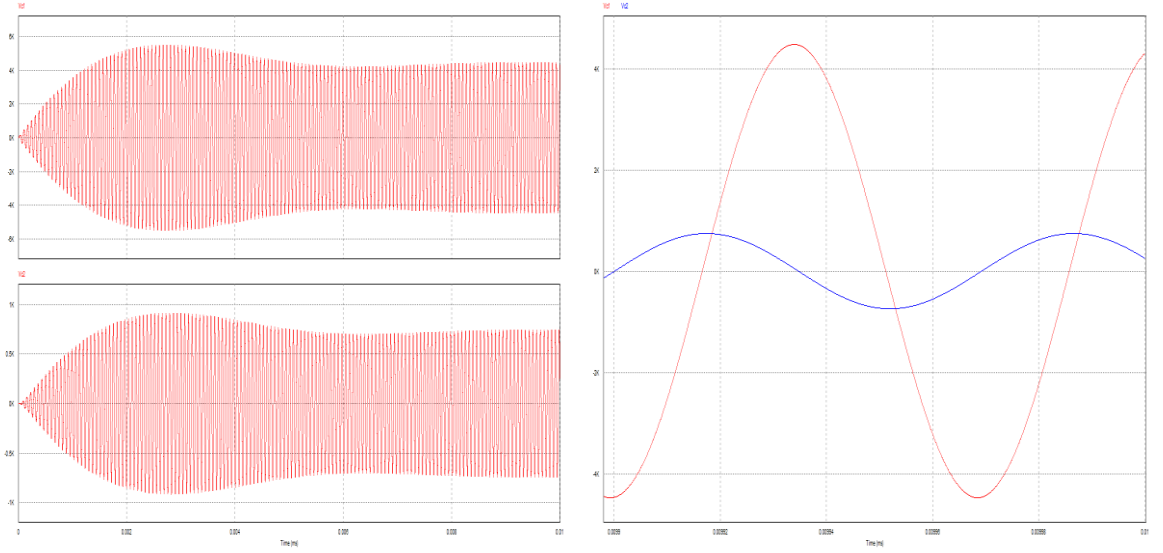
Şekil B.72 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.73 Giriş ve çıkış gücü



Şekil B.74 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

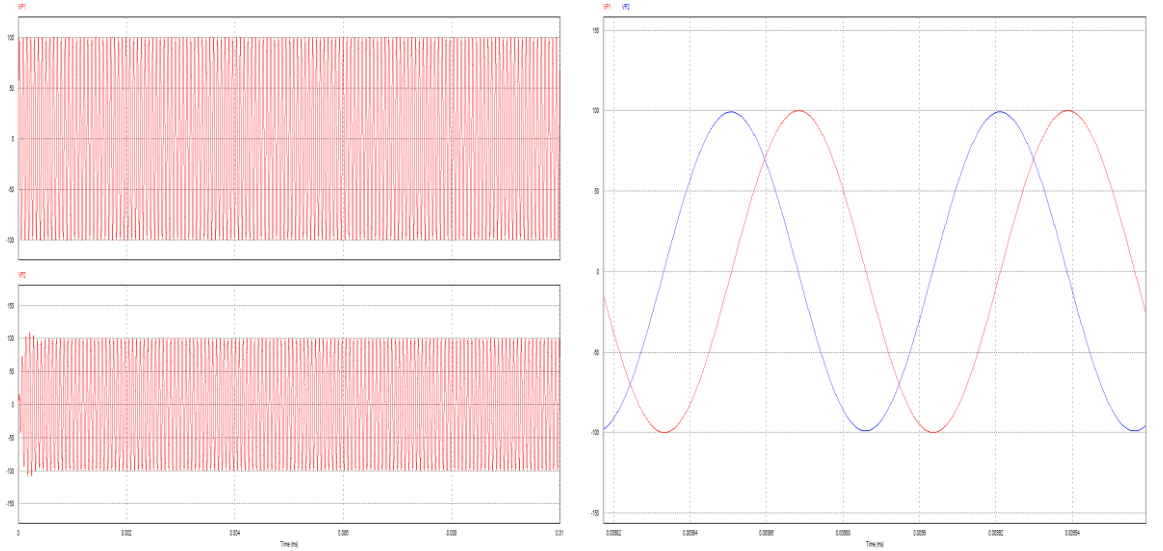


Şekil B.75 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

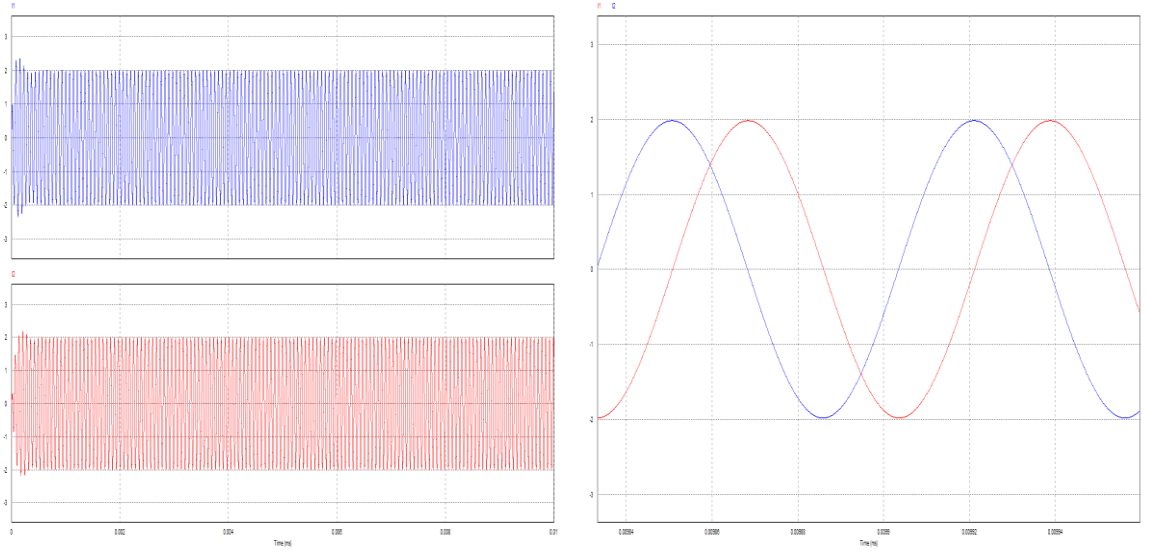
B-4 $Z=50$ ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları

a) Hava aralığı 1cm için;

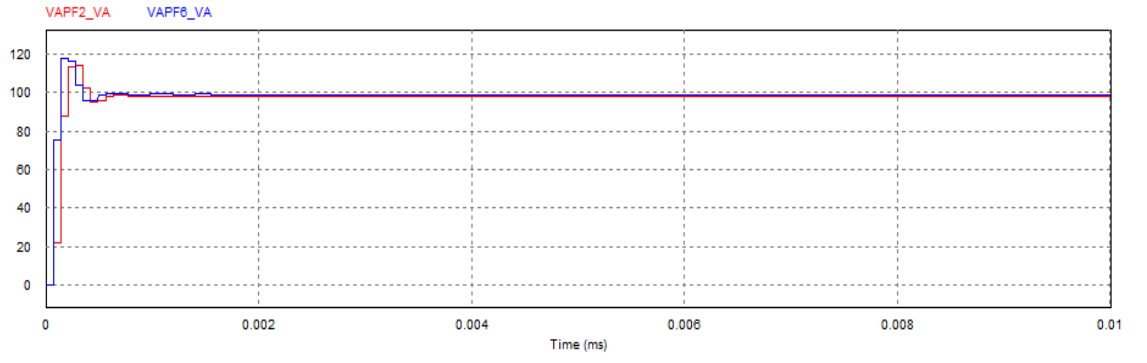
100 V geriliminde 14,212 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1004 nH, karşıt endüktans 562.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 50 Ω olarak seçilmiştir.



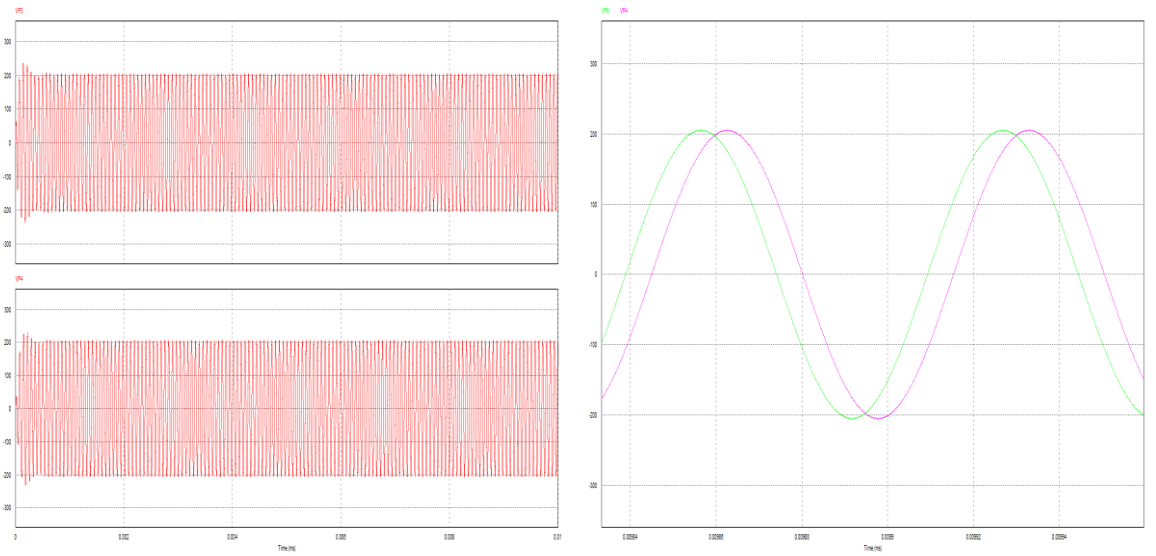
Şekil B.76 Giriş ve çıkış gerilimi



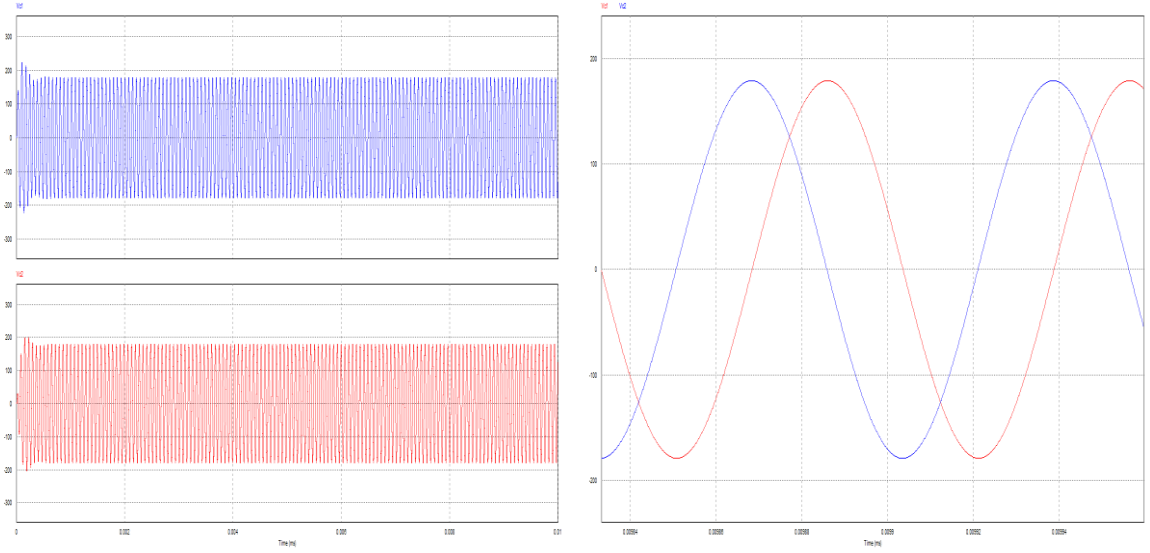
Şekil B.77 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.78 Giriş ve çıkış gücü



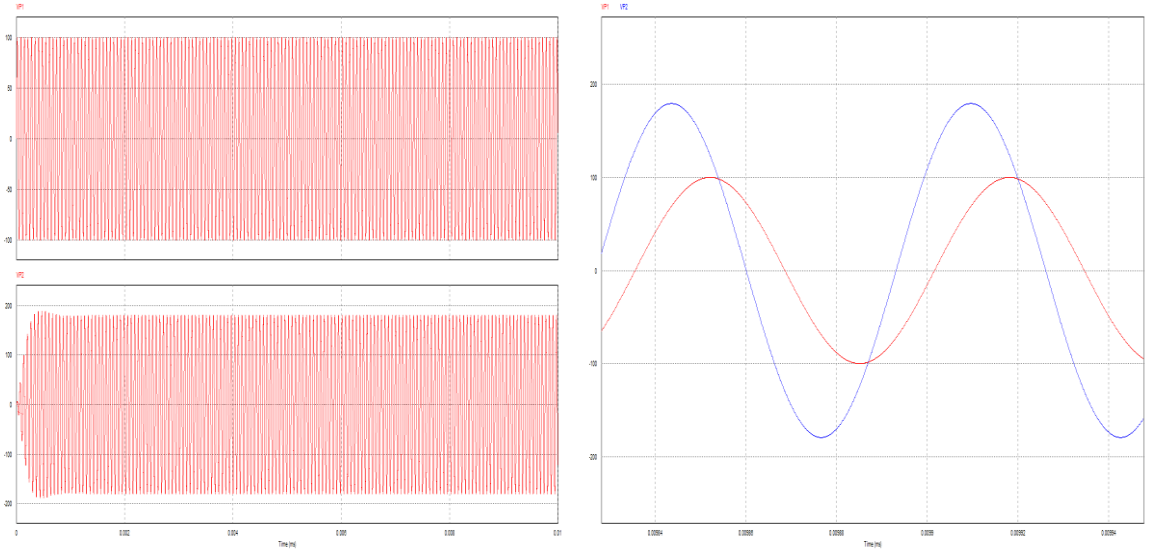
Şekil B.79 Birinci ve ikinci sargı uç gerilimi



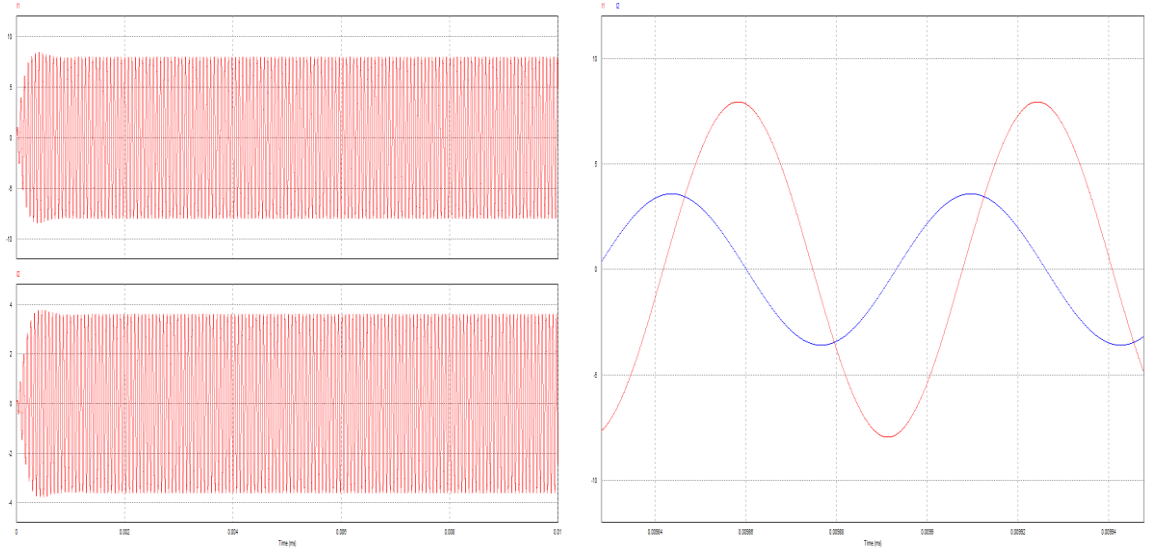
Şekil B.80 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

b) Hava aralığı 5cm için;

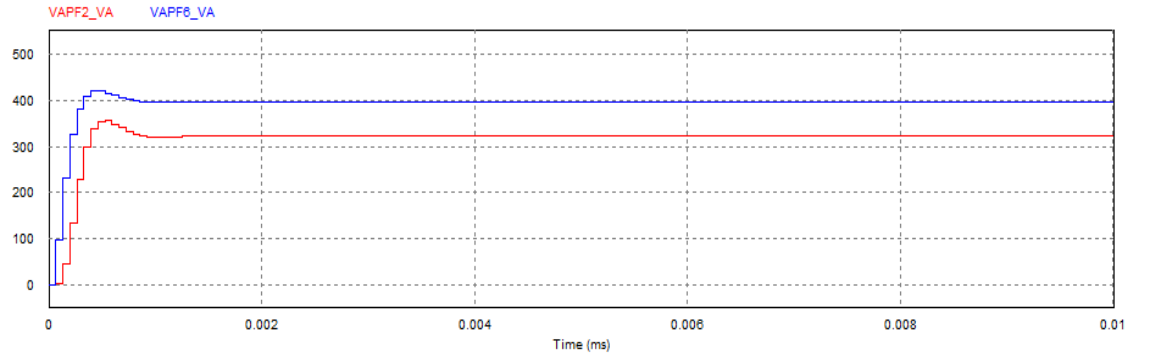
100 V geriliminde 15,149 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 982.4 nH, karşıt endüktans 241.8 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 50 Ω olarak seçilmiştir.



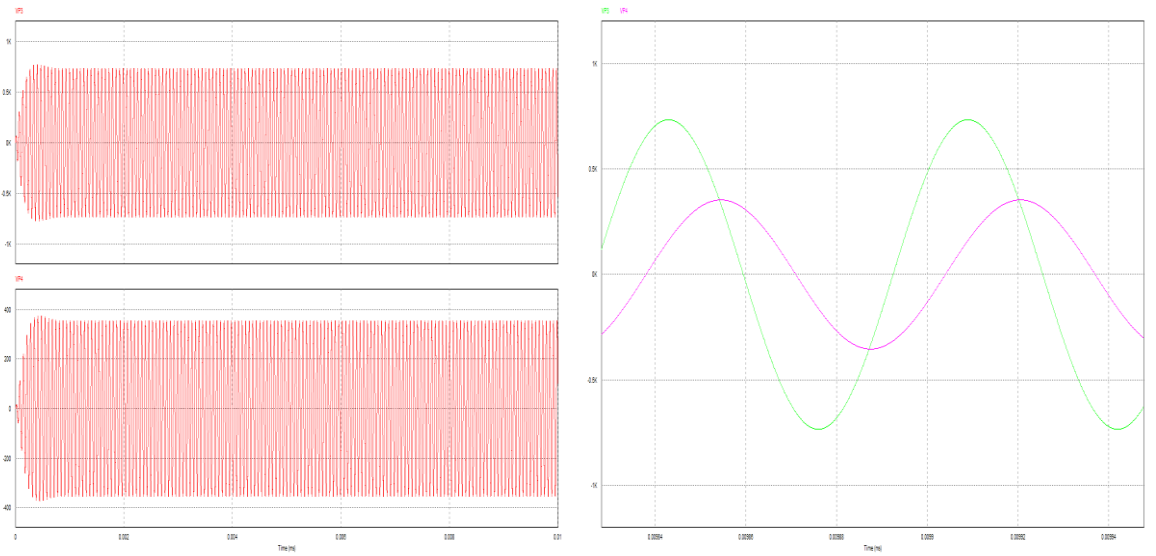
Şekil B.81 Giriş ve çıkış gerilimi



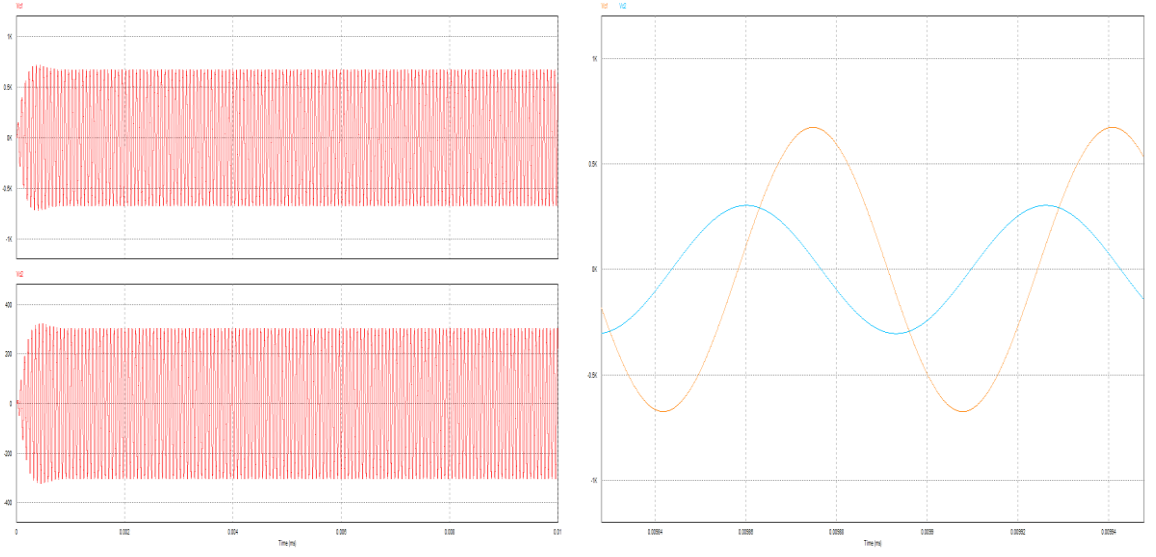
Şekil B.82 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.83 Giriş ve çıkış gücü



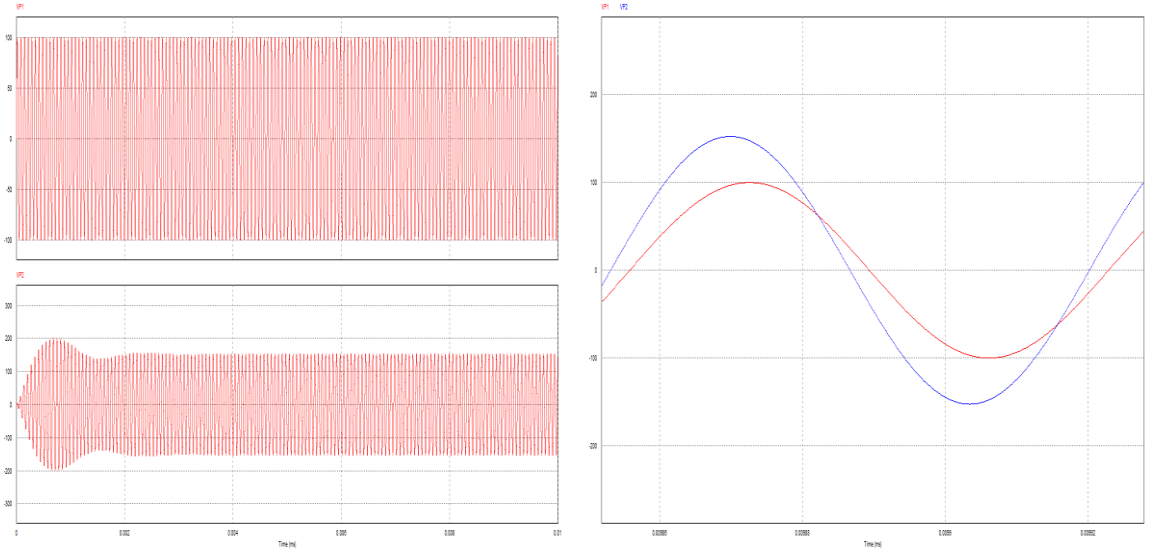
Şekil B.84 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



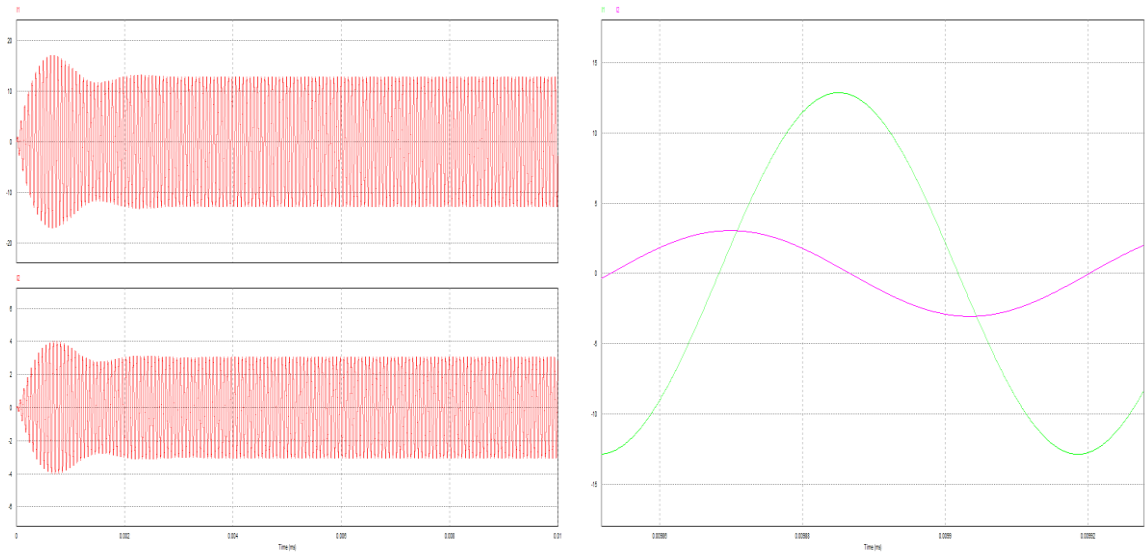
Şekil B.85 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

c) Hava aralığı 10cm için;

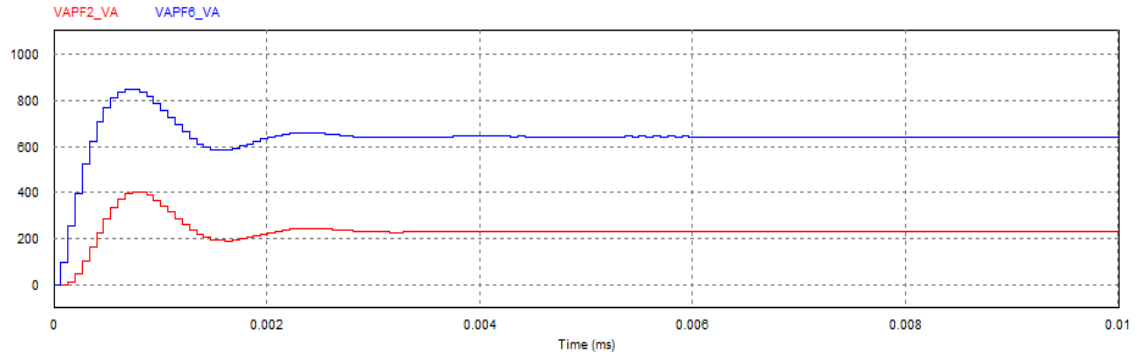
100 V geriliminde 14,915 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 999.2 nH, karşıt endüktans 128.6 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 50 Ω olarak seçilmiştir.



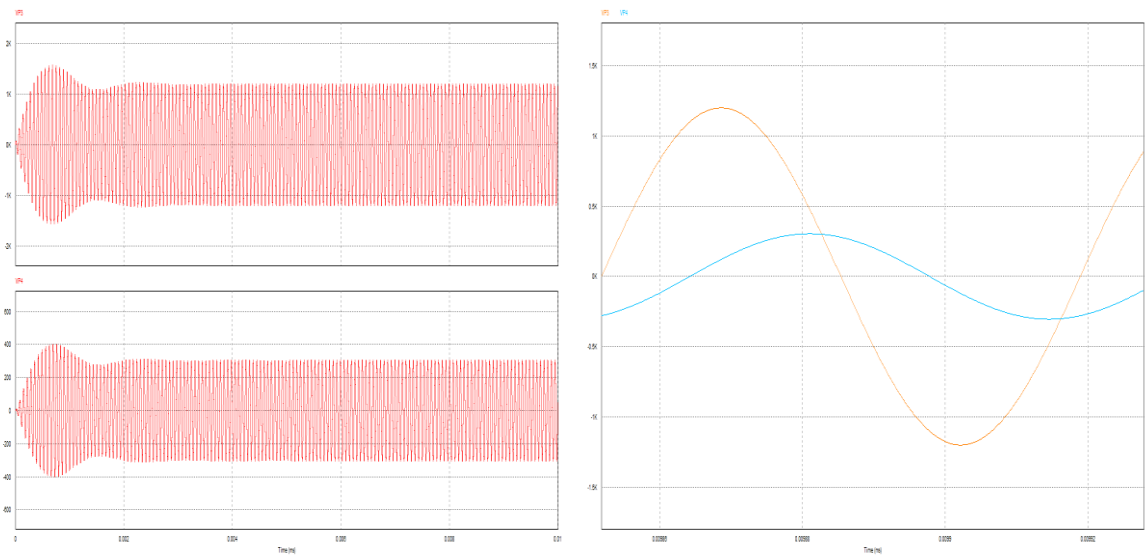
Şekil B.86 Giriş ve çıkış gerilimi



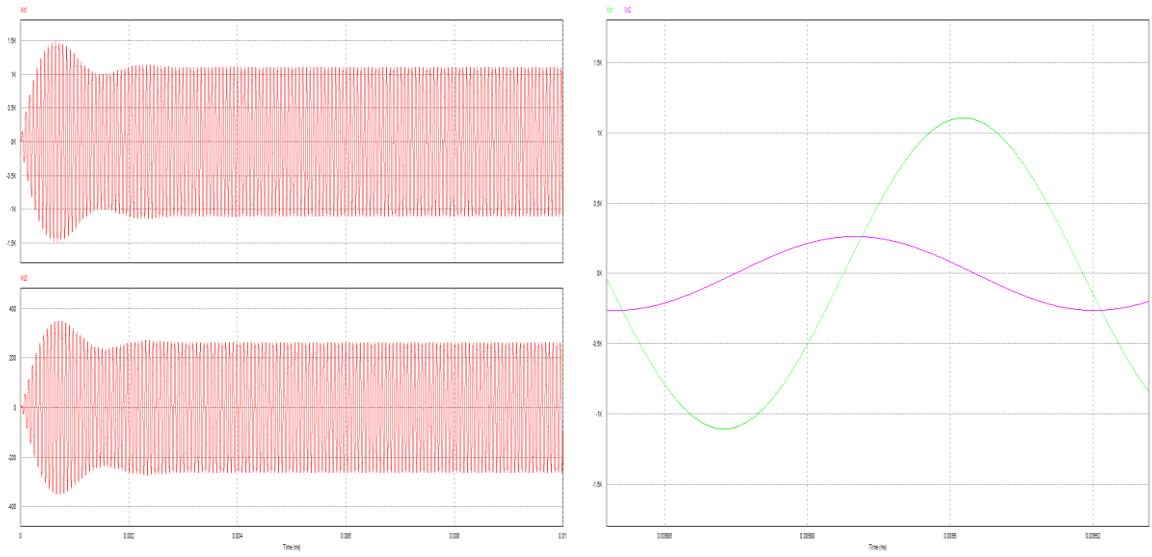
Şekil B.87 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.88 Giriş ve çıkış gücü



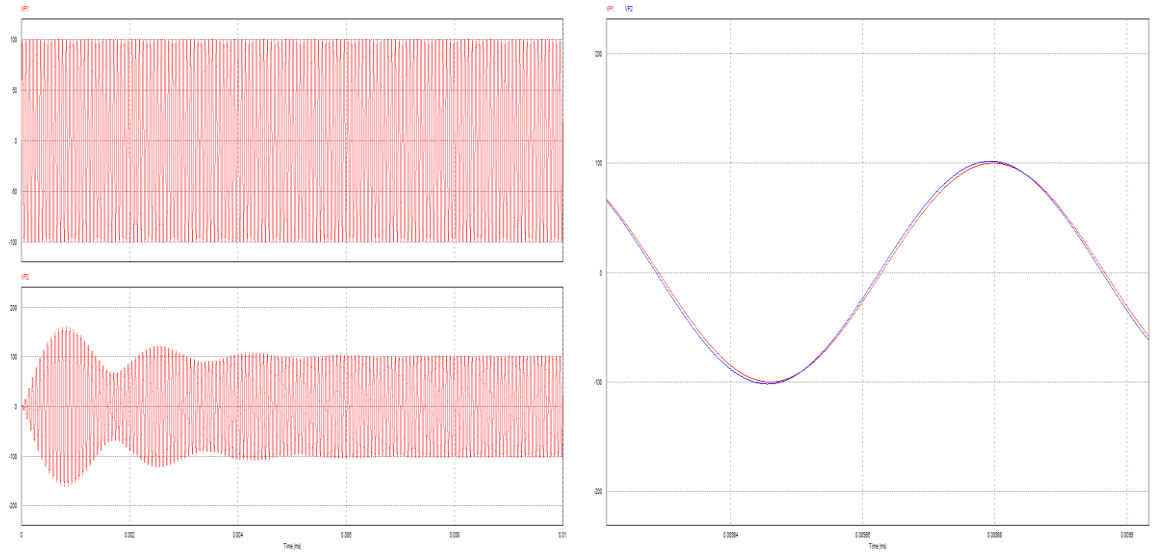
Şekil B.89 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



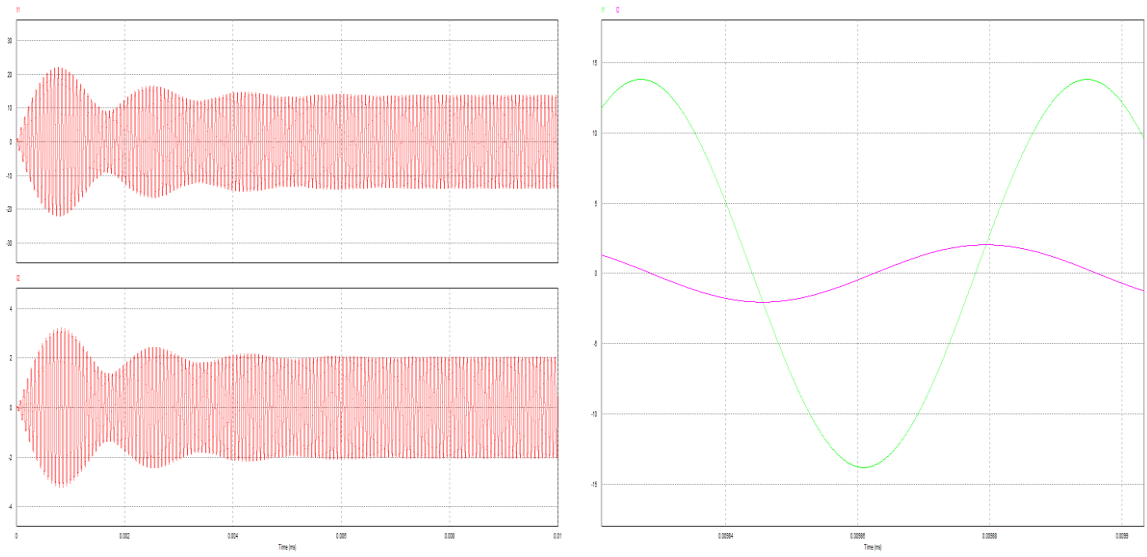
Şekil B.90 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

d) Hava aralığı 15cm için;

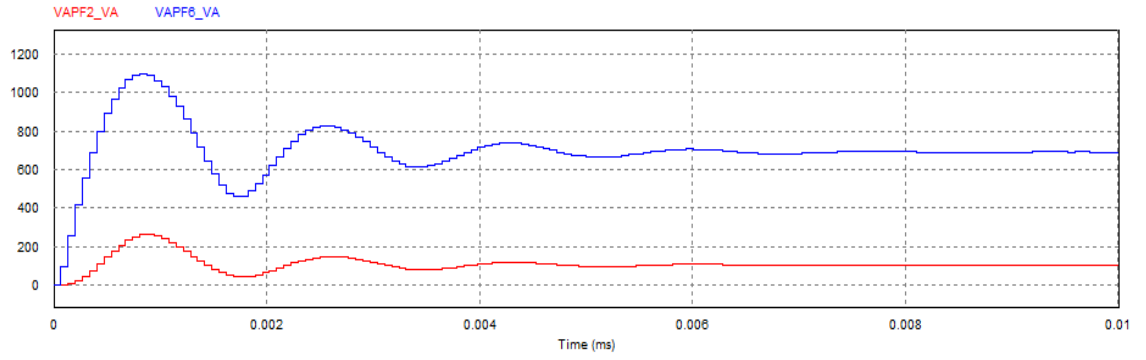
100 V geriliminde 14,803 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1010.5 nH, karşıt endüktans 80.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 50 Ω olarak seçilmiştir.



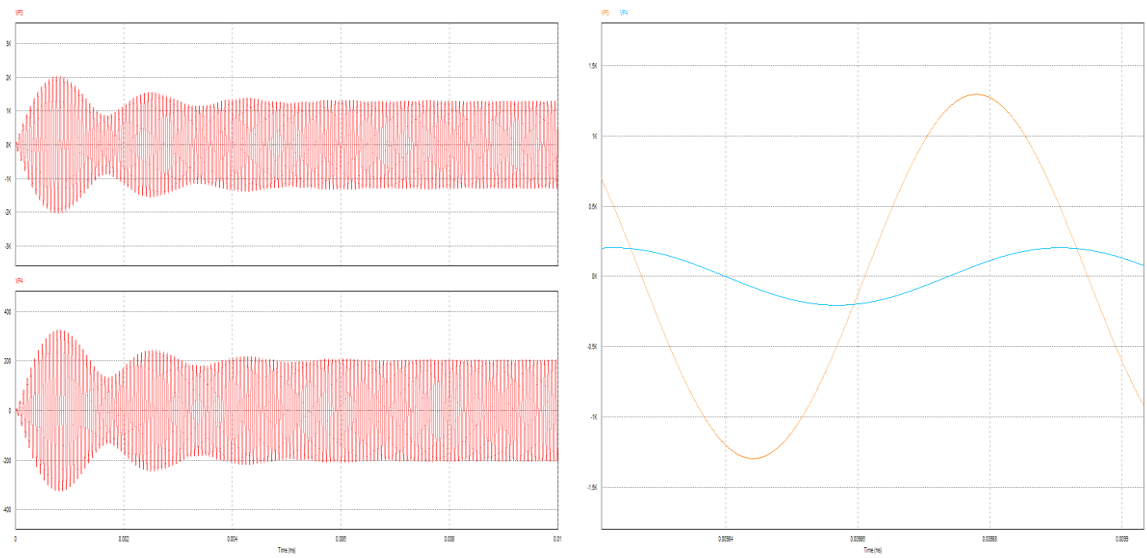
Şekil B.91 Giriş ve çıkış gerilimi



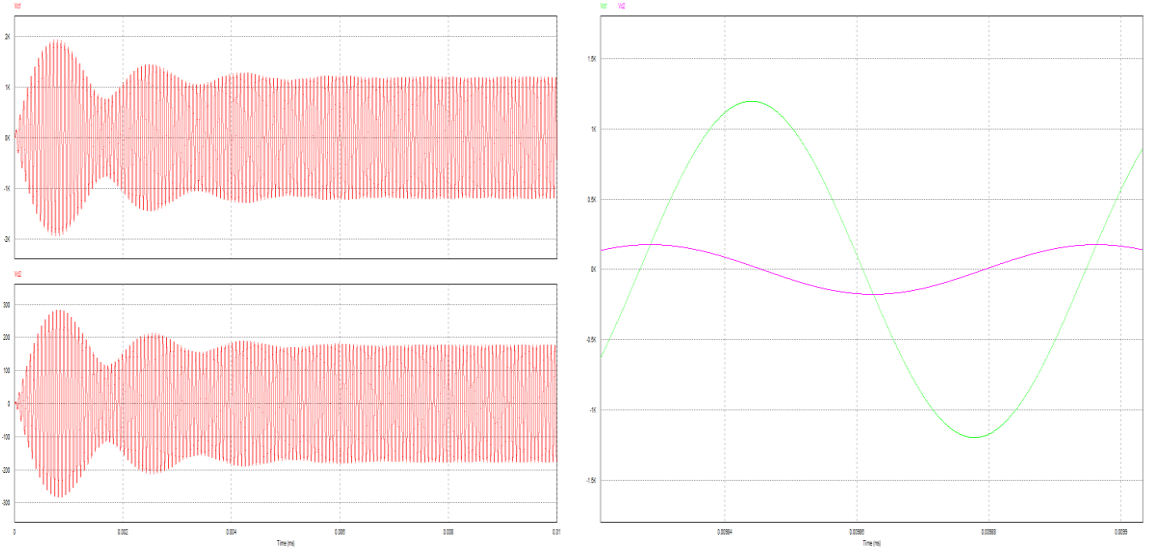
Şekil B.92 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.93 Giriş ve çıkış gücü



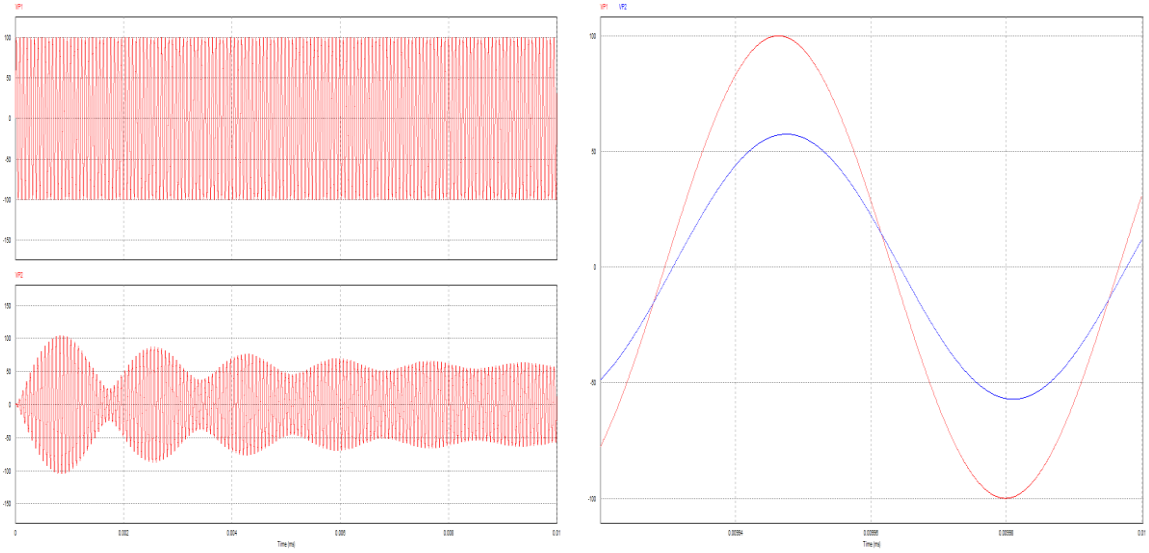
Şekil B.94 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



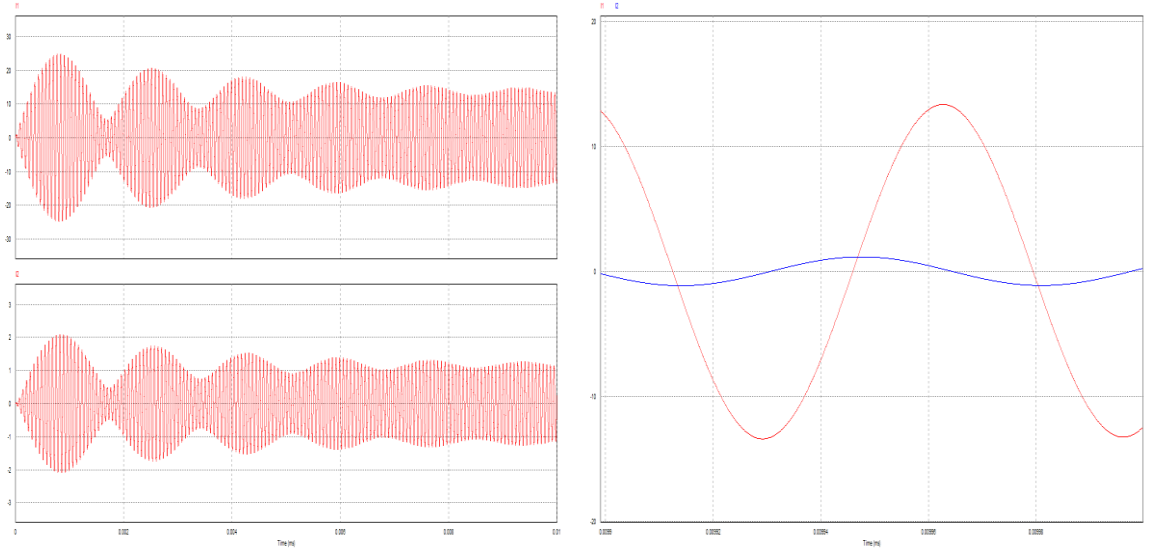
Şekil B.95 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

e) Hava aralığı 20cm için;

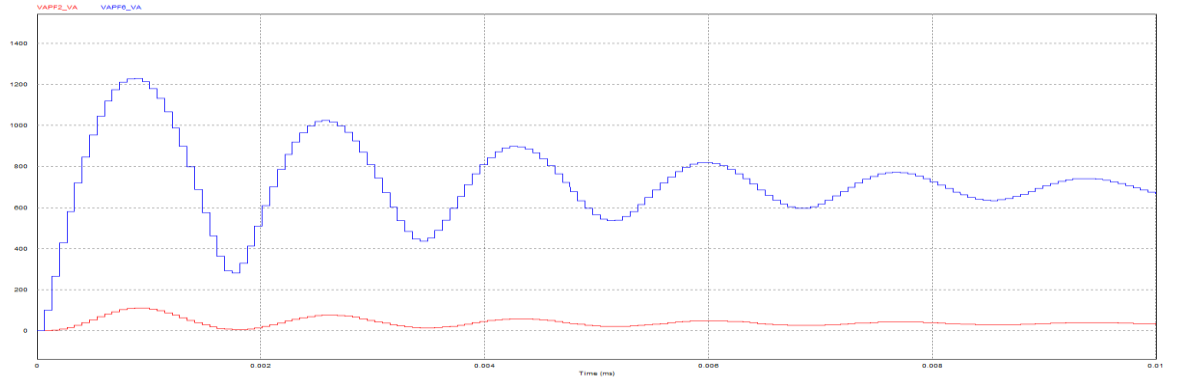
100 V geriliminde 14,905 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 996.7 nH, karşıt endüktans 46.2 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 50 Ω olarak seçilmiştir.



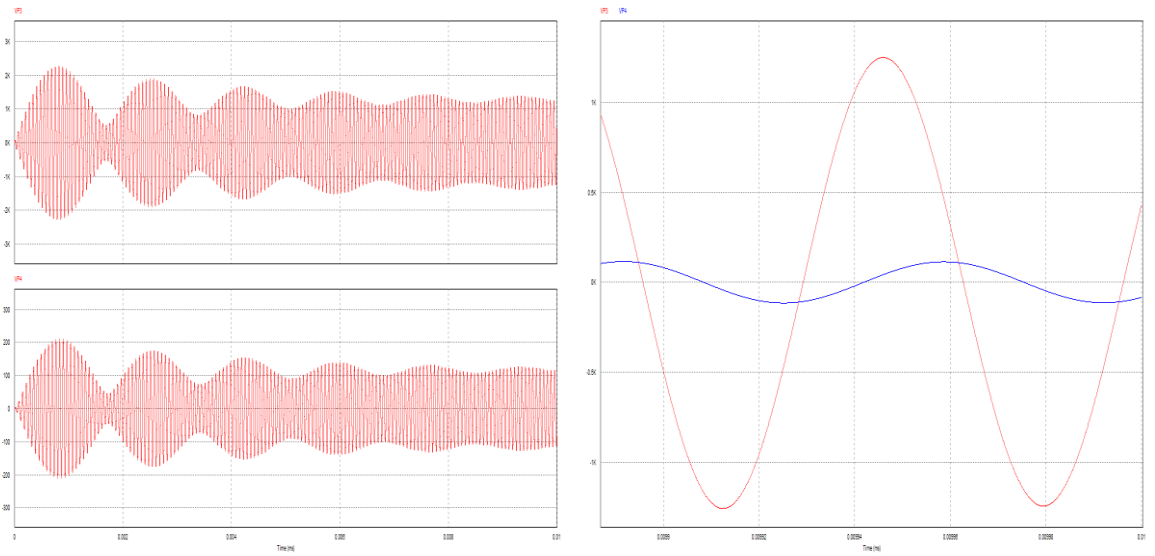
Şekil B.96 Giriş ve çıkış gerilimi



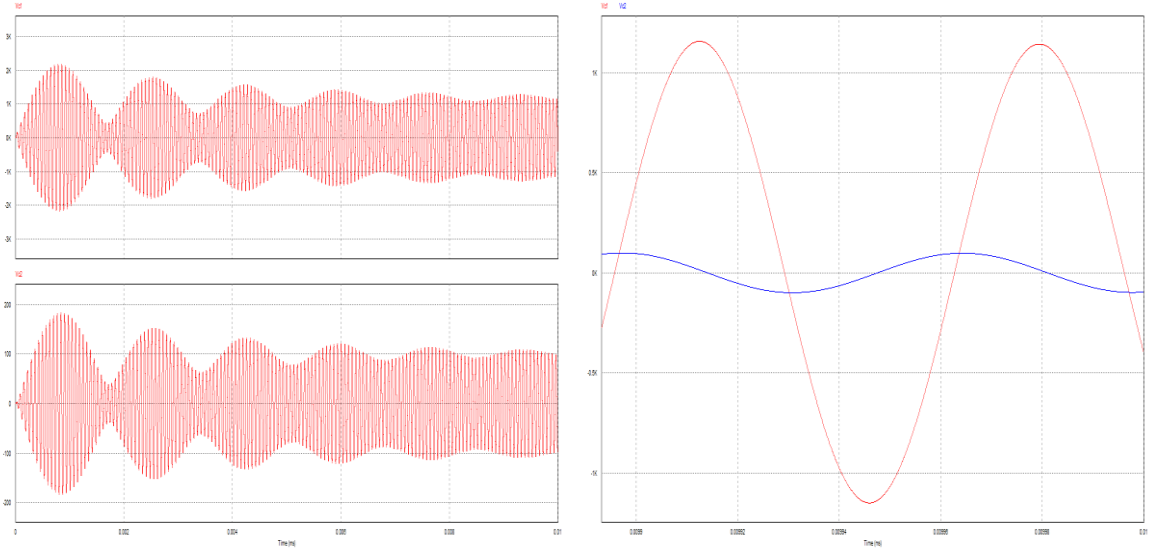
Şekil B.97 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.98 Giriş ve çıkış gücü



Şekil B.99 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi

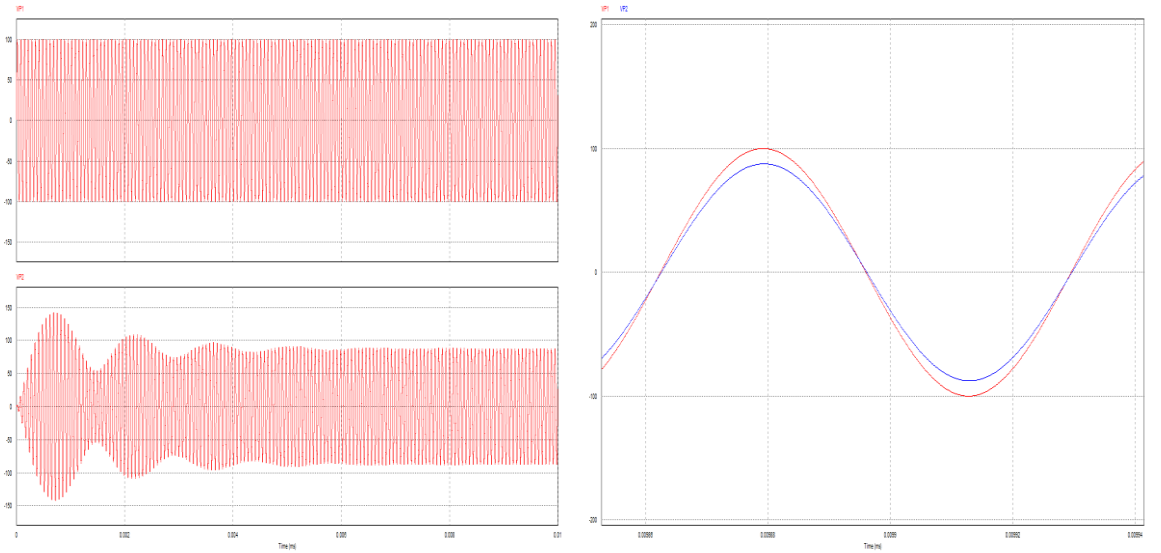


Şekil B.100 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

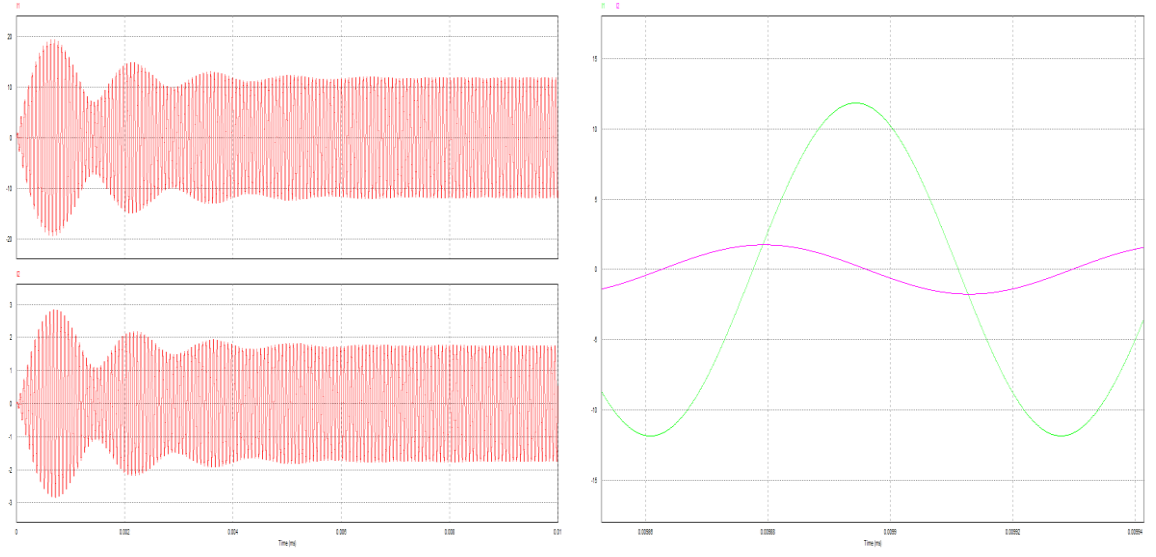
B-5 $Z=100$ ohm için farklı hava aralıklarında PSIM sonuçları

a) Hava aralığı 1cm için;

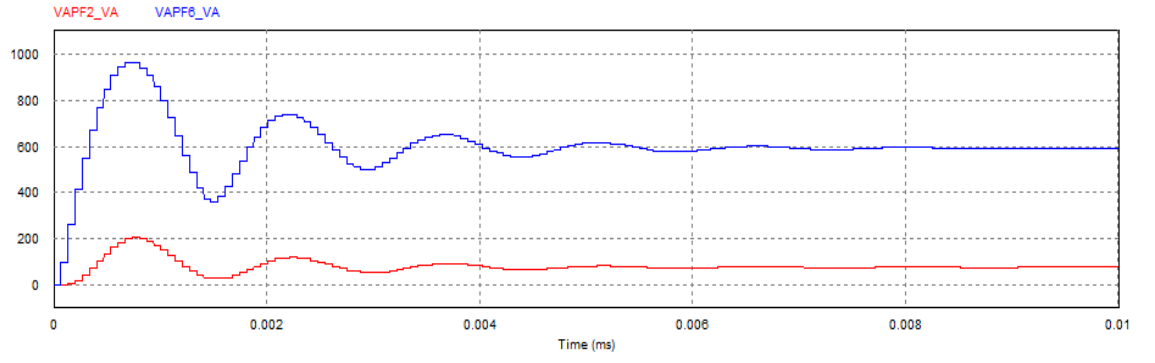
100 V geriliminde 14,905 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 996.7 nH, karşıt endüktans 46.2 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 50 Ω olarak seçilmiştir.



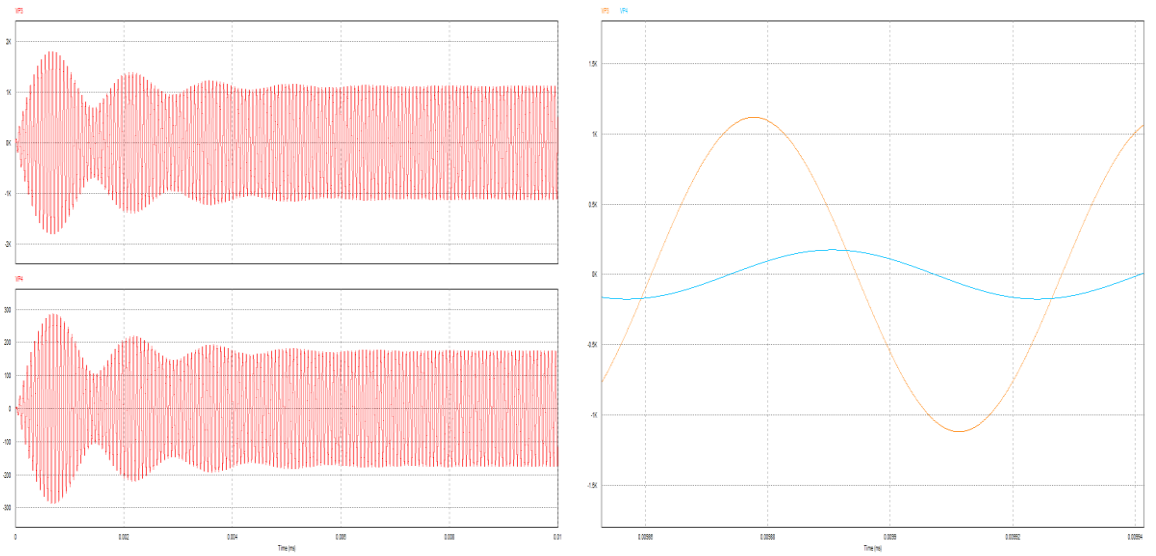
Şekil B.101 Giriş ve çıkış gerilimi



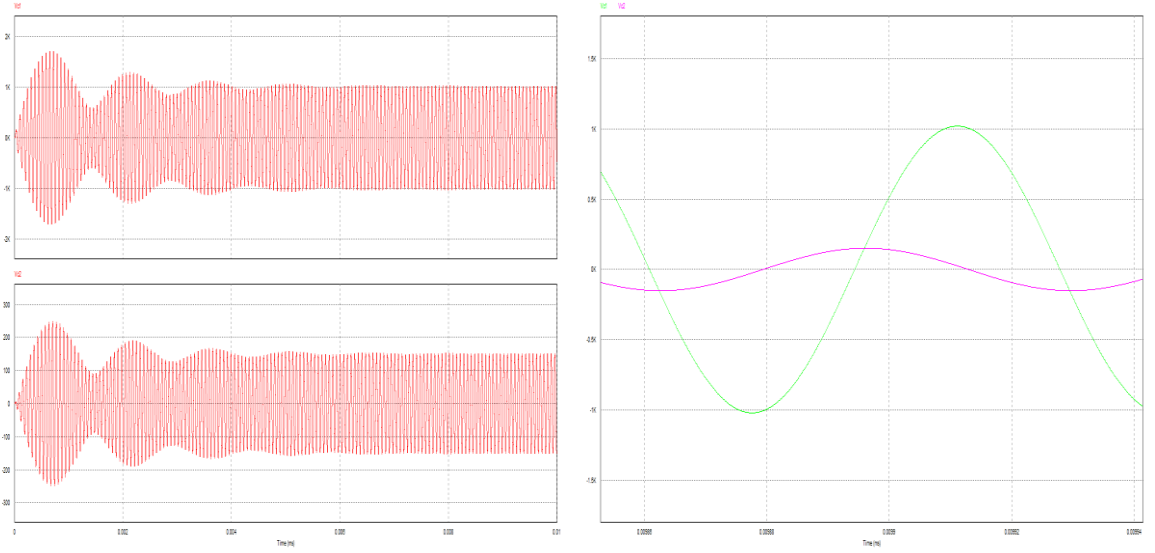
Şekil B.102 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.103 Giriş ve çıkış gücü



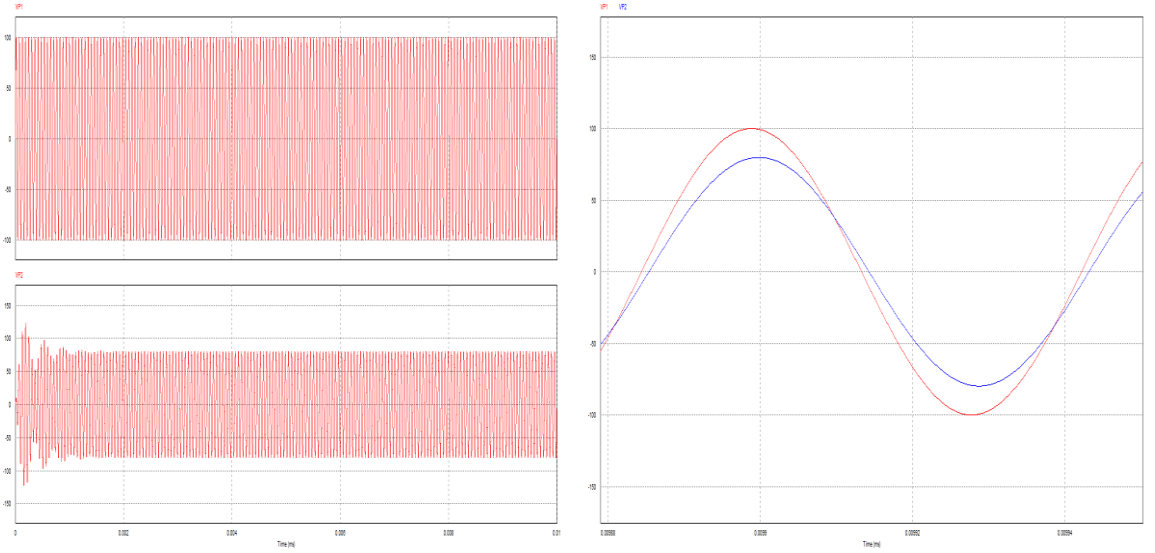
Şekil B.104 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



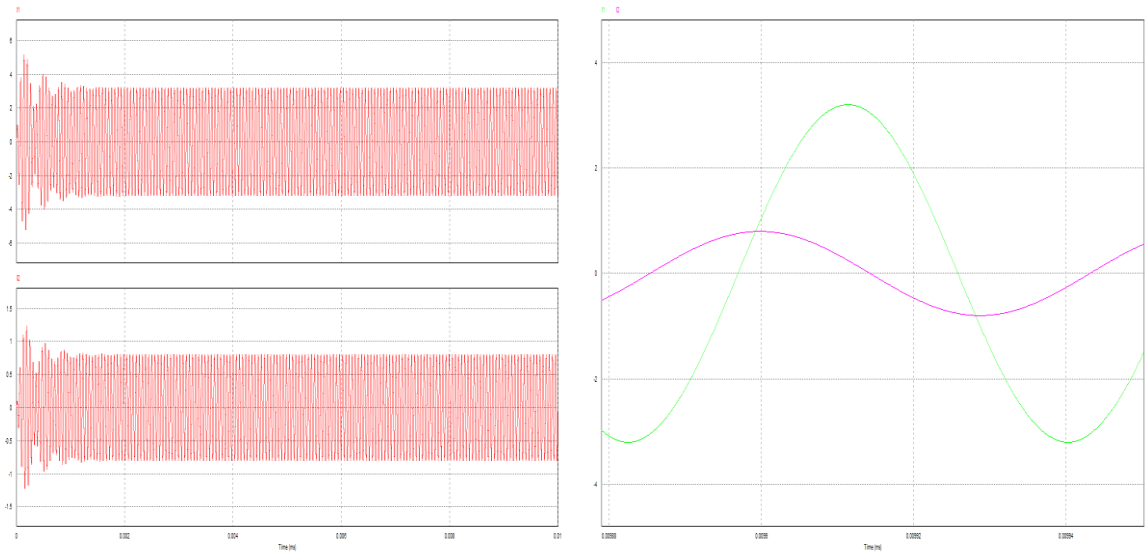
Şekil B.105 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

b) Hava aralığı 5cm için;

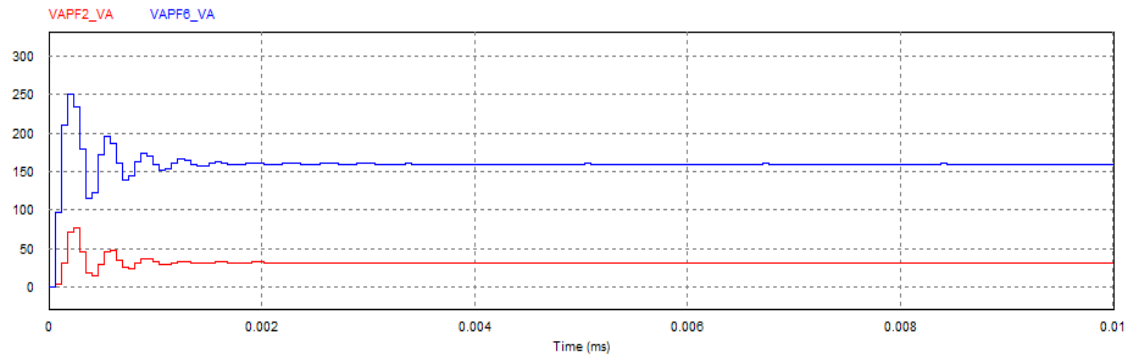
100 V geriliminde 17,300 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 241.8 nH, karşıt endüktans 241.8nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 100 Ω olarak seçilmiştir.



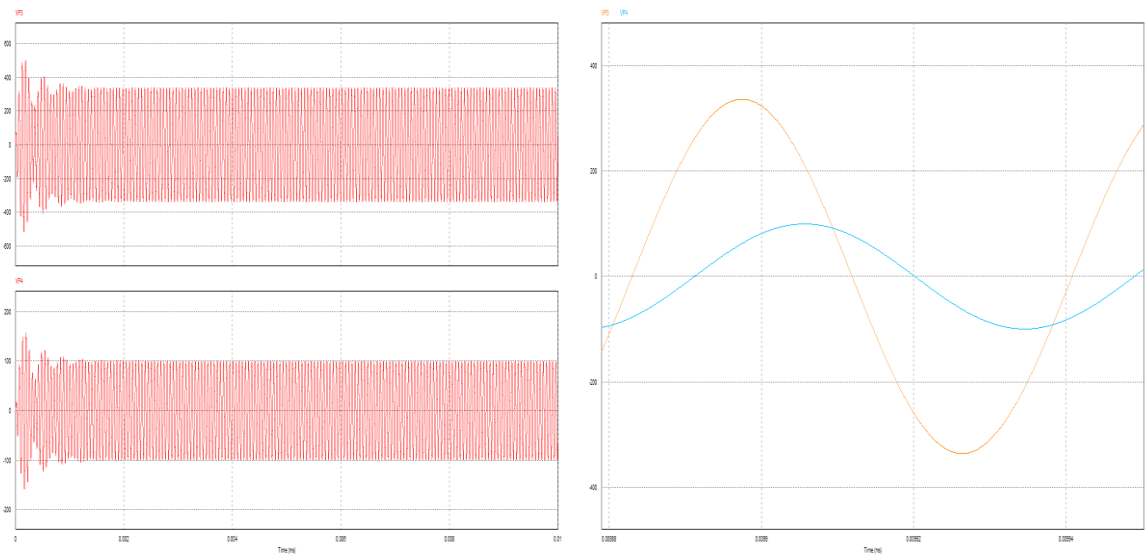
Şekil B.106 Giriş ve çıkış gerilimi



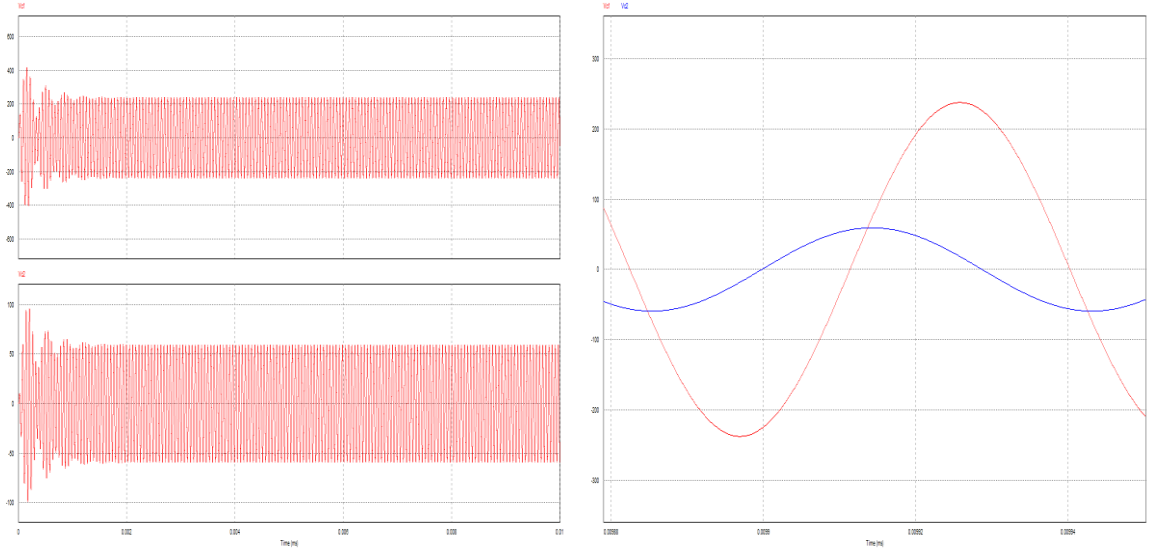
Şekil B.107 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.108 Giriş ve çıkış gücü



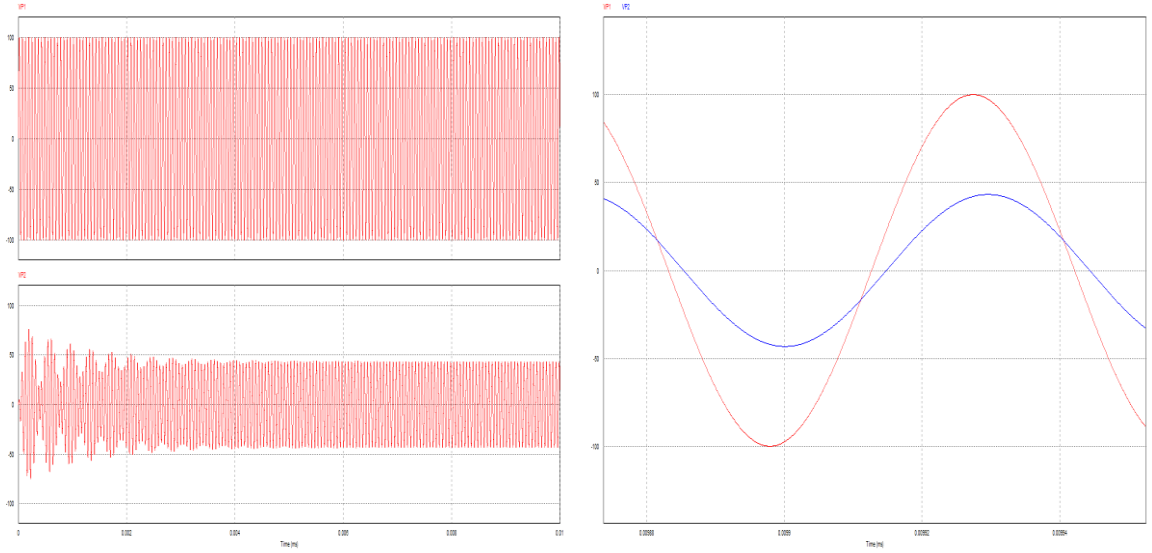
Şekil B.109 Birinci ve ikincil sargı uç gerilimi



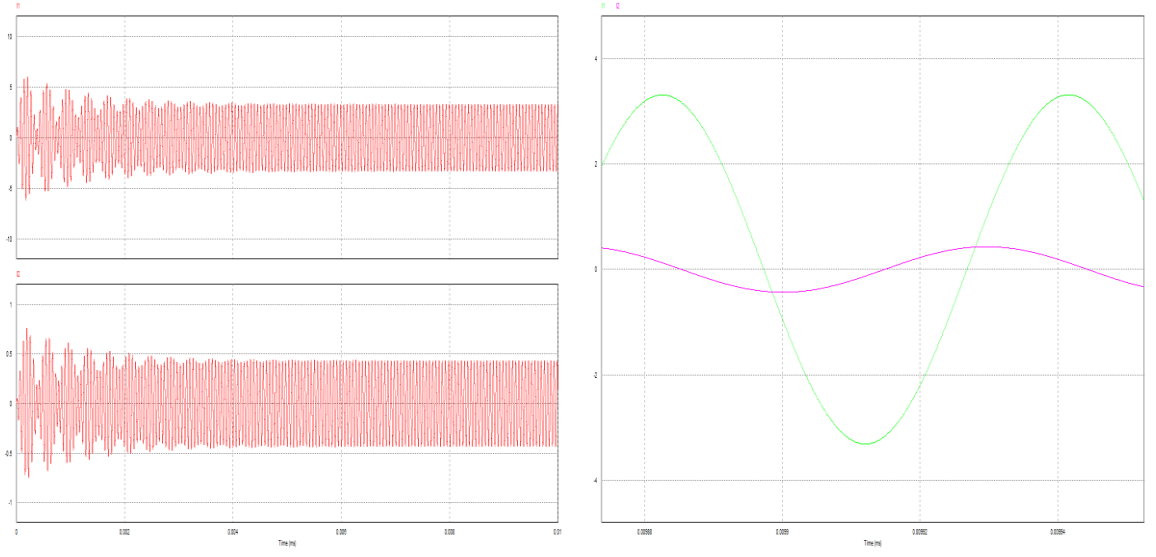
Şekil B.110 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

c) Hava aralığı 10cm için;

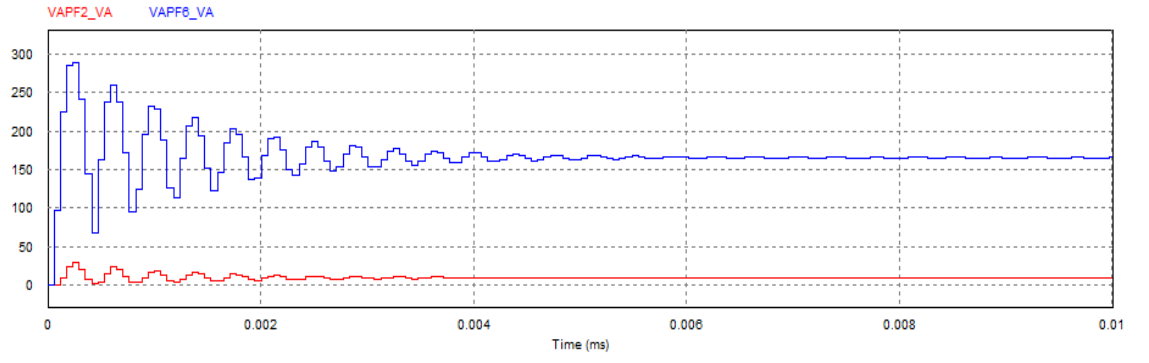
100 V geriliminde 16,948 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 999.2 nH, karşıt endüktans 128.6 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 100 Ω olarak seçilmiştir.



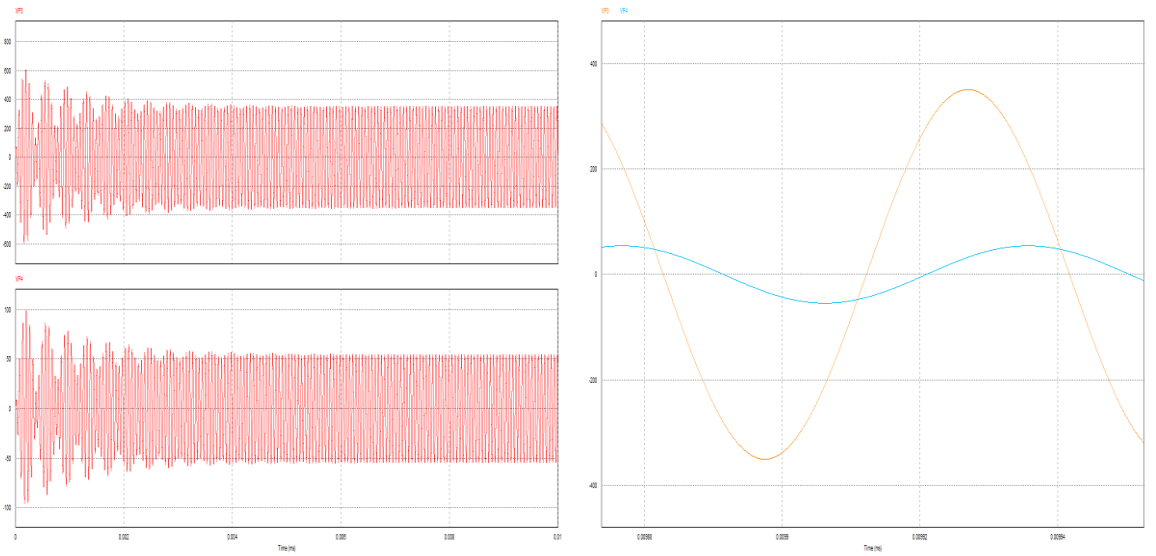
Şekil B.111 Giriş ve çıkış gerilimi



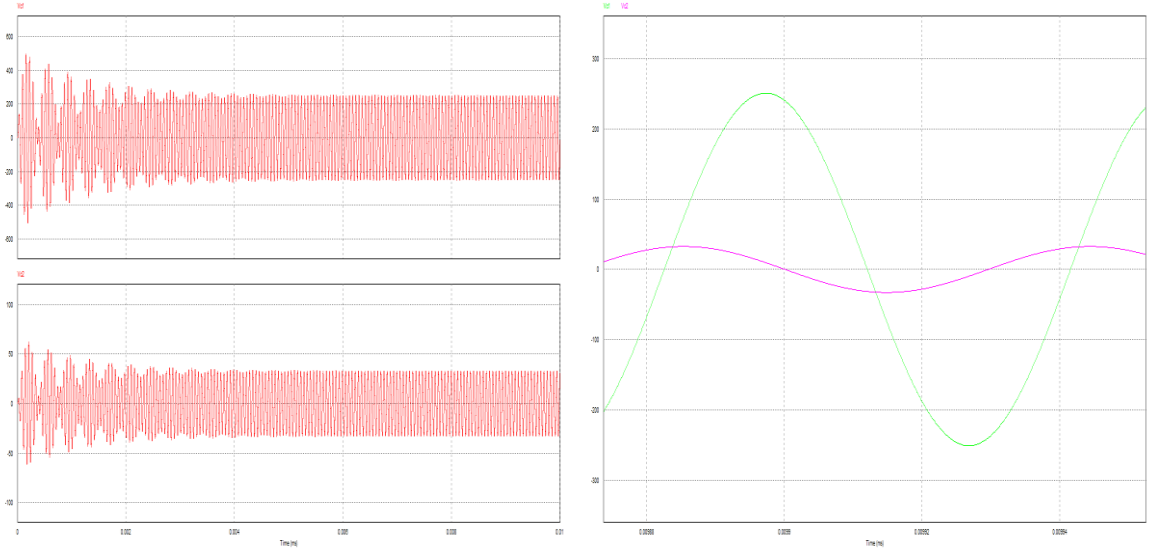
Şekil B.112 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.113 Giriş ve çıkış gücü



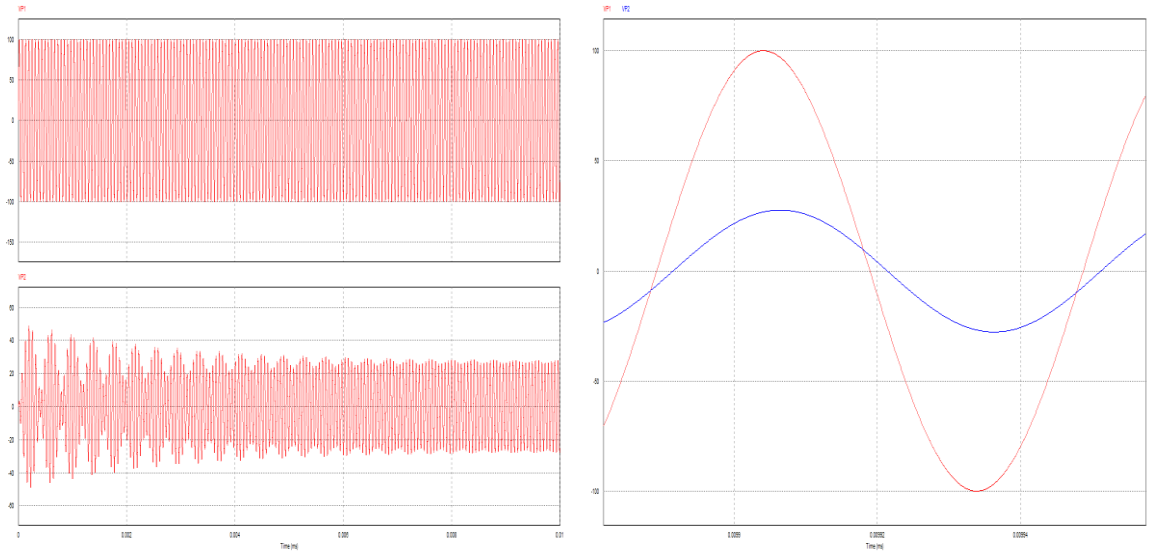
Şekil B.114 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



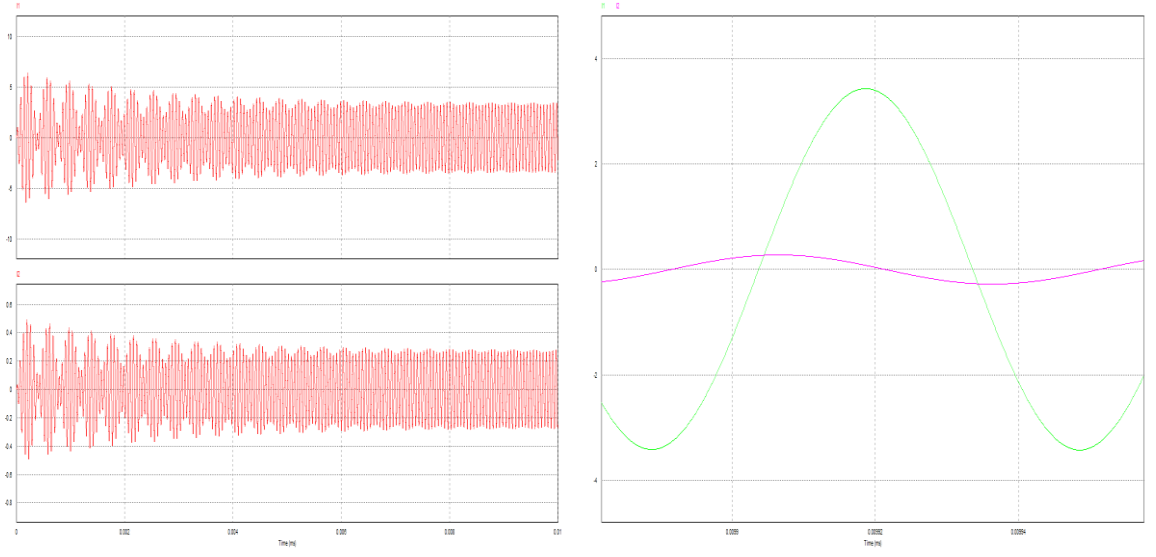
Şekil B.115 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

d) Hava aralığı 15cm için;

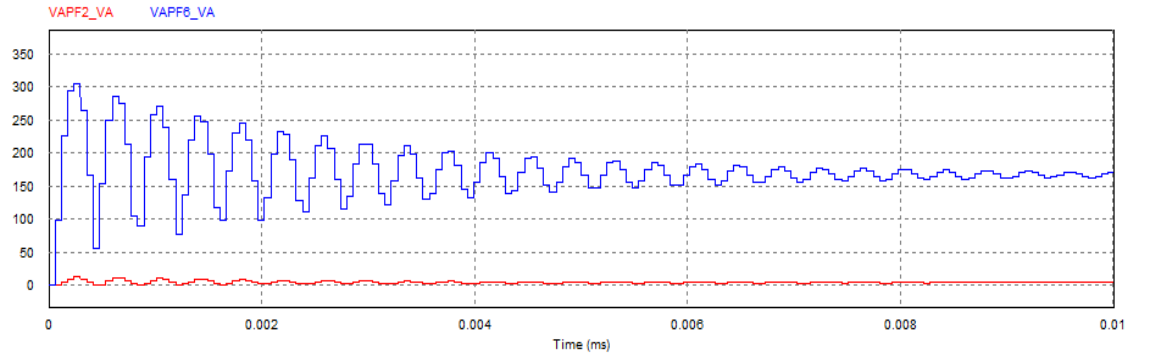
100 V geriliminde 16,786 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 1010.5 nH, karşıt endüktans 80.5 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 100 Ω olarak seçilmiştir.



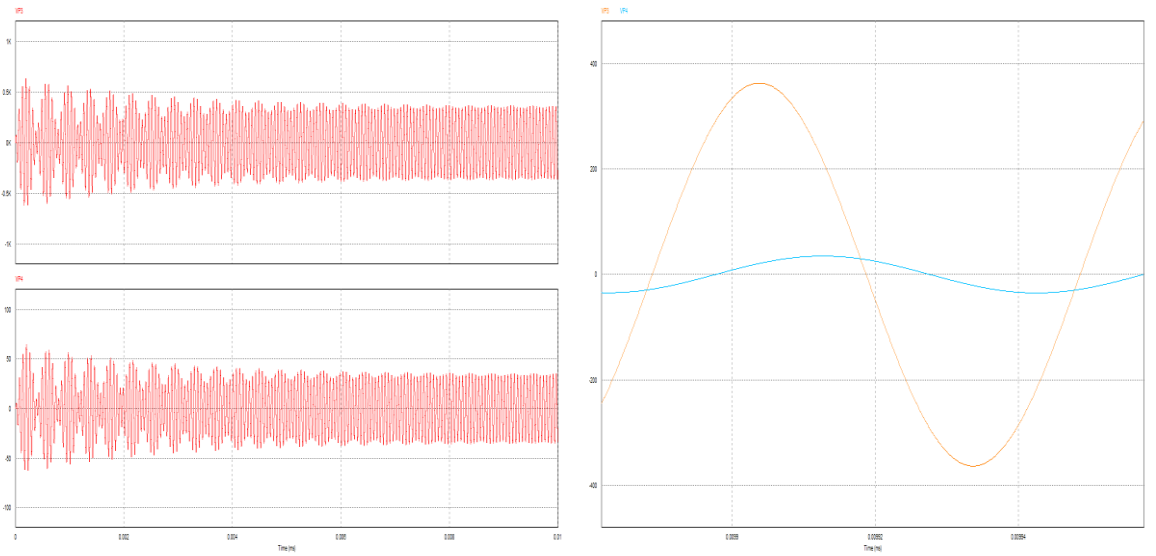
Şekil B.116 Giriş ve çıkış gerilimi



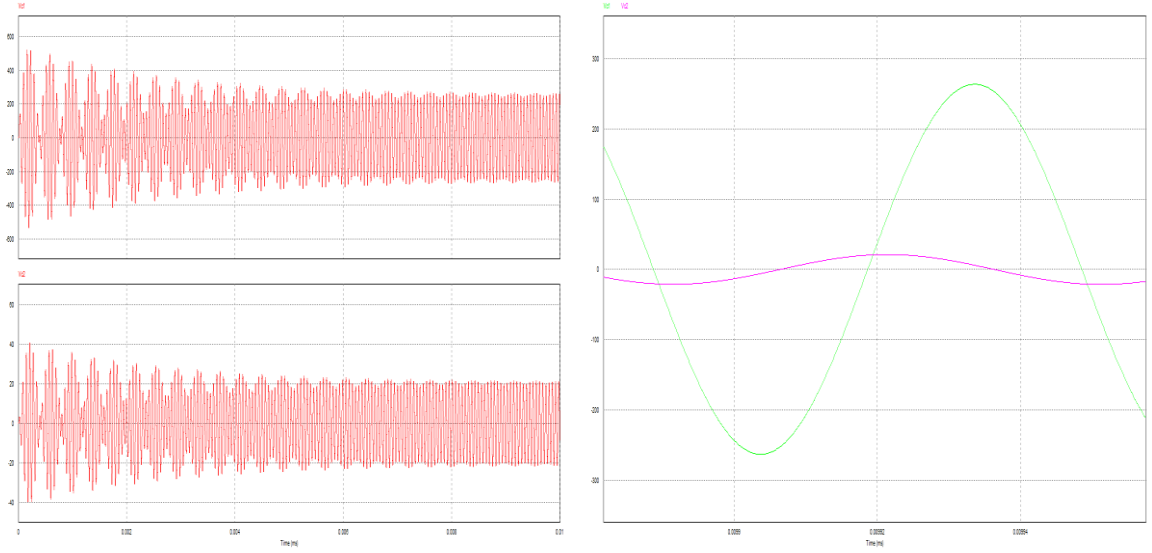
Şekil B.117 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.118 Giriş ve çıkış gücü



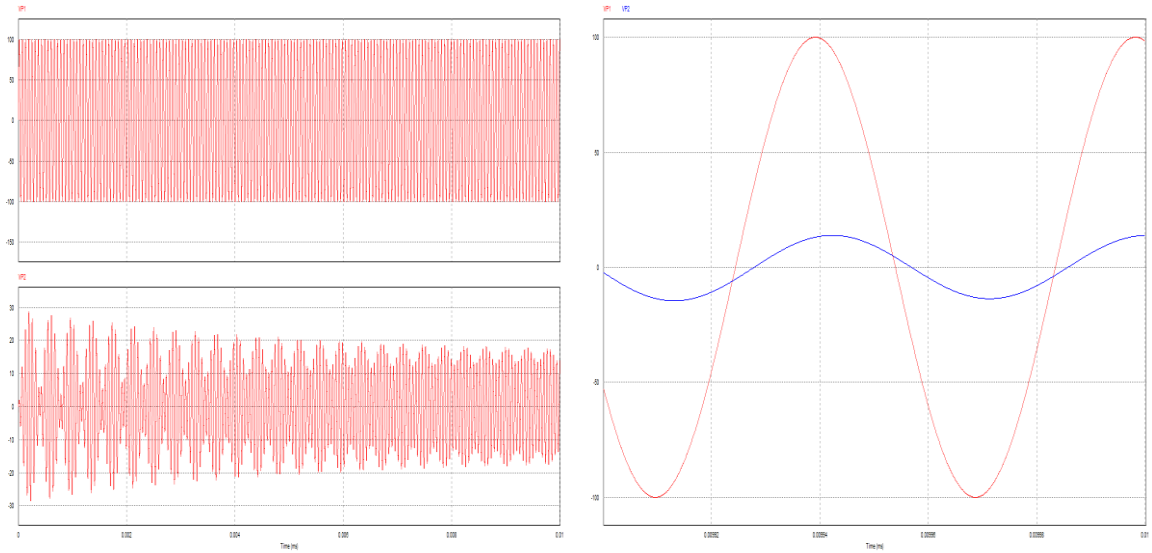
Şekil B.119 Birinci ve ikincil sargı uç gerilimi



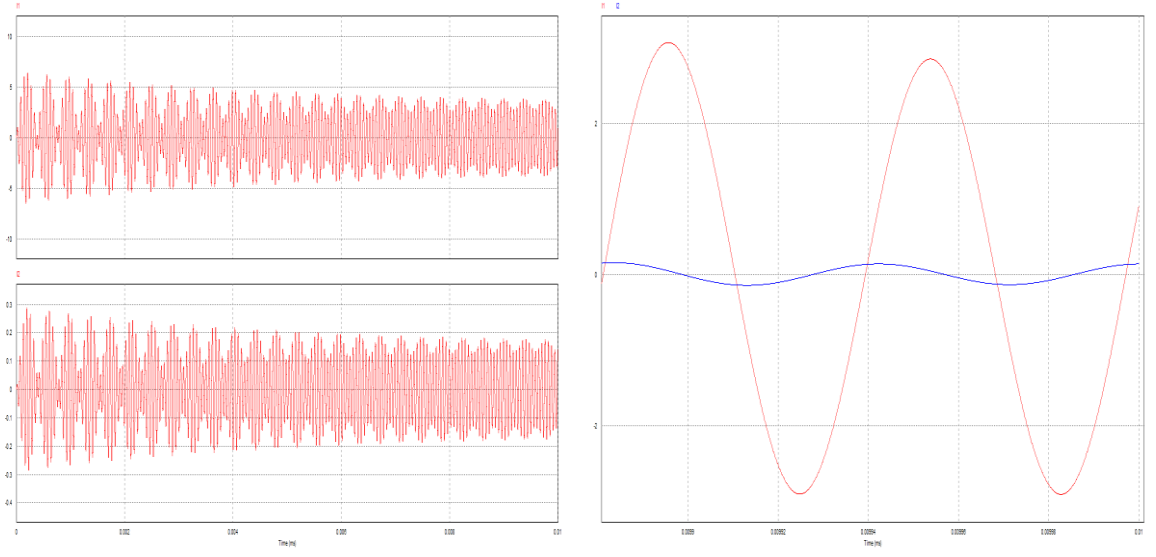
Şekil B.120 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

e) Hava aralığı 20cm için;

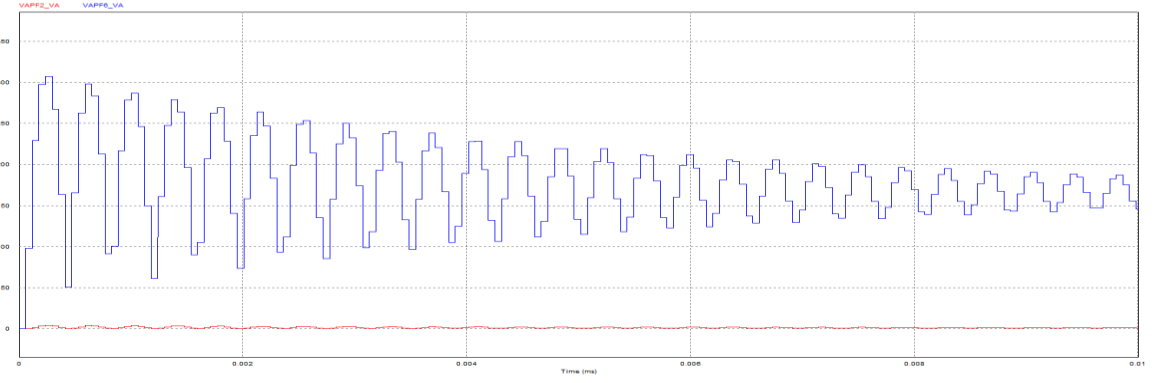
100 V geriliminde 16,928 MHz frekansında ideal sinüs kaynak kullanılmış ve sargı endüktansları 996.7 nH, karşıt endüktans 46.2 nH, kondansatör değerleri 124 pF, R iç direnç değeri 0.22 ohm, Z_0 değeri 100 Ω olarak seçilmiştir.



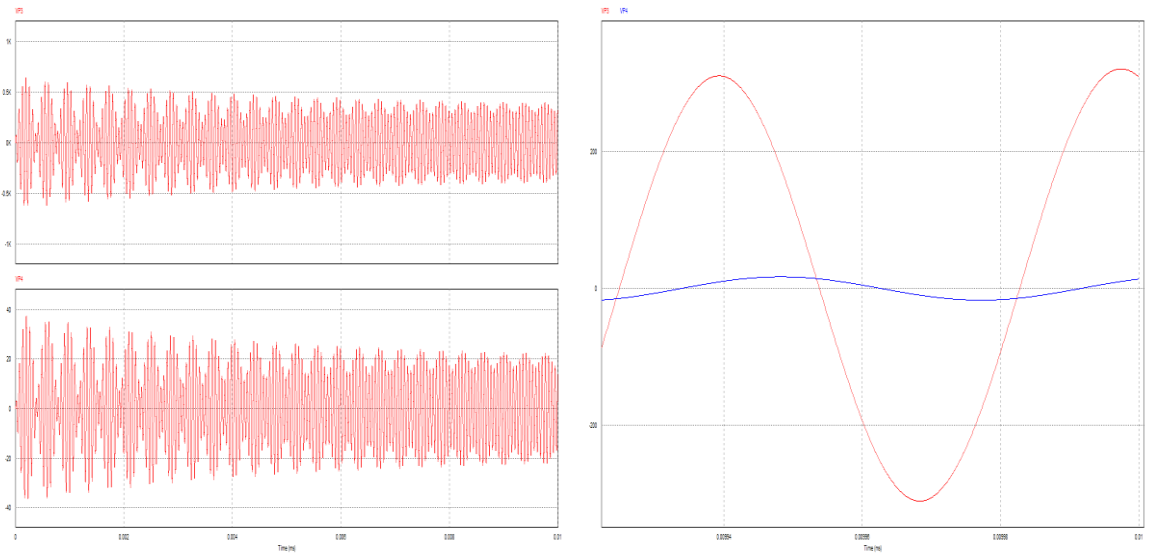
Şekil B.121 Giriş ve çıkış gerilimi



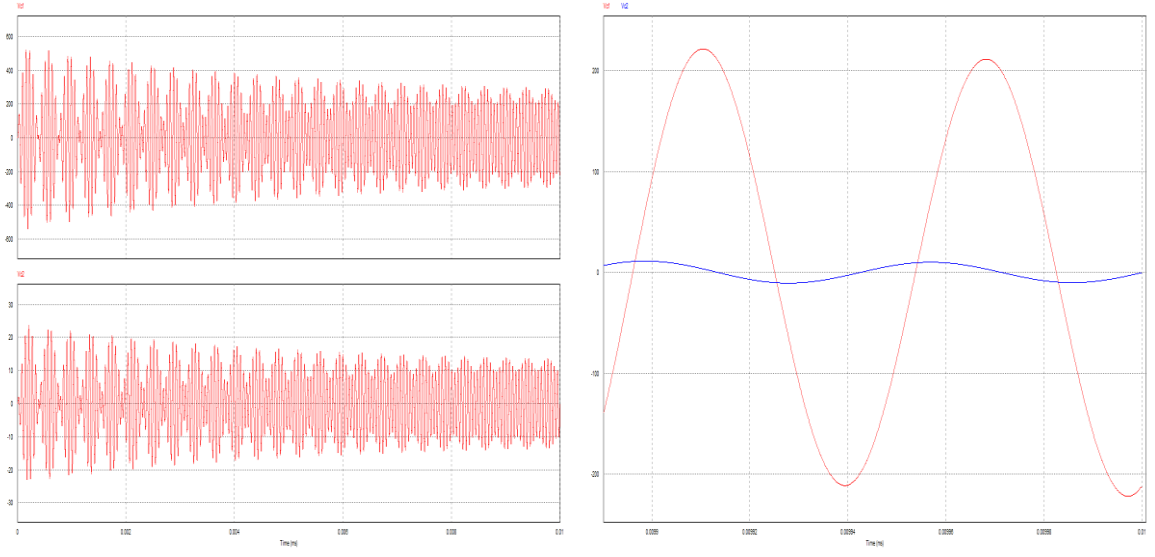
Şekil B.122 Birincil ve ikincil sargılarından geçen akım



Şekil B.123 Giriş ve çıkış gücü



Şekil B.124 Birincil ve ikincil sargı uç gerilimi



Şekil B.125 Birincil ve ikincil kondansatör uç gerilimi

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ali AĞÇAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 18.09.1989
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : agcal@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Sayısal	İstek Vakfı Özel Bilge Kağan Fen Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012-	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2009	Siemens A.Ş.	Stajer
2008	Mert Elektrik Taah. Pano Tic. Ltd. Şti	Stajer

YAYINLARI

Bildiri

1. Ozcira, S., Bekiroğlu, N., Agcal, A., A Study on Feasibility of Wind Energy Production in Silivri Region by Using Laboratory Setup, International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2013), Madrid, 2013, pp:1175-1179
-