



KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

MUSTAFA ÖZSOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN

(İkinci Danışman: Prof. Dr. İres İSKENDER)

Ağustos - 2018

Her hakkı saklıdır

**T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

MUSTAFA ÖZSOY

**TOKAT
Ağustos - 2018**

Her hakkı saklıdır

MUSTAFA ÖZSOY tarafından hazırlanan “Kablosuz Enerji Transferi Sisteminin Modellenmesi” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 3 AĞUSTOS 2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

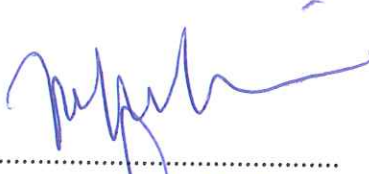
Jüri Üyeleri

İmza

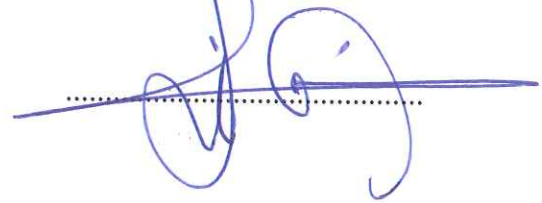
Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi


.....

Üye
Doç Dr. Mahmut HEKİM
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi


.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi İsmail İŞERİ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi


.....

ONAY

Prof. Dr. Ebubekir ALTUNTAŞ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

09-28/2018

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

MUSTAFA ÖZSOY

3 Ağustos 2018

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

MUSTAFA ÖZSOY

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ ZAFER DOĞAN)
(İKİNCİ DANIŞMAN: PROF. DR. İRES İSKENDER)

Günümüz dünyasında enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Elektrik enerjisinin günlük hayatta farklı amaçlarla kullanımı beraberinde Kablosuz Enerji Transferi (KET) ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu şekilde, temelleri 19. yy'a dayanan kablosuz enerji transferine olan ilgi artmıştır. KET günümüzde artan elektrikli cihaz sayısının getirdiği kablo karmaşası gibi dezavantajları ortadan kaldırmakla birlikte özellikle son yıllarda popüler hale gelen cep telefonu şarjı ve elektrikli araç şarjı gibi konularda da kendisine uygulama alanı bulmaktadır. KET sistemlerinde 2007 yılında MIT'den bir grup bilim adamının ortaya attığı manyetik rezonans kuplajı tekniği ile kaydedilen ilerleme bu alandaki çalışma iştahını hat safhaya çıkarmıştır. Yapılan bu tez çalışmasında tam manyetik rezonans kuplajı tekniği ile çalışan bir KET sisteminin tam modellenmesi yapılmıştır. Bir KET sistemini oluşturan yüksek frekanslı giriş sinyali, trafo ve yük kısımlarından en önemli parçayı oluşturan trafo bölümü ayrıntılı olarak modellenmiş ve SEY ile analiz edilmiştir. Yapılan tasarımda trafonun birincil ve ikincil sargılarını oluşturan iletkenler litz kablo olarak modellenmiştir. Sargılardan geçen akımın verimli kullanımı için özel geometriye sahip ferrit nüveler kullanılmıştır. Bu sayede manyetik alan yönlendirilmesi yapılabilmektedir. Bununla beraber kaçak akıları en aza indirmek amacıyla birincil ve ikincil taraflarda alüminyum levhalar kullanılarak manyetik alan sargılar arasında kalmaya zorlanmış, dolayısı ile enerji kayıpları en aza indirgenmiştir. Tasarlanan KET trafosu devre simülasyonu programının yardımı ile hem AC yük hem de batarya şarjı gibi uygulamalar için DC yük bağlanarak test edilmiştir. Tasarlanan sistemde 50 mm hava aralığına sahip KET transformatörüne uygulanan 10 kHz giriş sinyali % 97 verim ile bir yük üzerine transfer edilmiştir.

2018, 69 SAYFA

ANAHTAR KELİMELELER: Kablosuz Enerji Transferi, Endüktif Güç Transferi, Manyetik Rezonans

ABSTRACT

MASTER THESIS

MODELING OF WIRELESS ENERGY TRANSFER SYSTEM

MUSTAFA ÖZSOY

**TOKAT GAZIOSMANPASA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

**SUPERVISOR: ASST. PROF. DR. ZAFER DOĞAN
SECOND SUPERVISOR: PROF. DR. İRES İSKENDER**

The need for energy in today's world is ever increasing. The use of electric energy for different purposes in daily life brings with it the need for Wireless Energy Transfer (KET). In this way, interest in wireless energy transfer (WPT) based on the 19th century has increased. WPT finds application areas in mobile phone charging and electric vehicle charging, which have become popular especially in recent years, besides eliminates disadvantages such as cable clutter caused by the increasing number of electric devices. The progress made by the magnetic resonance coupling technique introduced by a group of scientists from MIT in 2007 on the WPT system has brought this work appetite into line. In this thesis, a complete model of a WPT system operating with magnetic resonance coupling technique is studied. The transformer section, which constitutes the most important part of WPT, high frequency input signal and load parts, constituting a KET system, is modelled in detail and analysed by FEM. The conductors forming the primary and secondary coils of the transformer in the design are modelled as litz cable. A ferrite core with special geometry has been used for efficient use of the current through the windings. In this way, magnetic field can be guided as desired. However, in order to reduce the leakage fluxes, leakage currents were forced to stay between the magnetic field between coils using aluminium plates on the primary and secondary sides, so the energy losses were reduced. With the help of the circuit simulation program the transformer was tested by connecting an AC load and DC load for applications such as battery charge. In the designed system, the 10 kHz input signal applied to the KET transformer with 50 mm air gap was transferred to a load with 97% efficiency.

2018, PAGE 69

KEYWORDS: Wireless Energy Transfer, Inductive Power Transfer, Magnetic Resonance,

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında çalışmalarım boyunca her türlü konuda fikir ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımda beni yönlendirip çok büyük katkı sağlayan kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN'a ve Gazi Üniversitesinden hocam Prof. Dr. İres İSKENDER'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve hususen bana sabır gösteren eşim A. Hilal ÖZSOY'a ve gelişiyile hayatıma renk katan canım oğlum Yusuf Kağan'a teşekkürlerimi sunarım.



Mustafa ÖZSOY

3 Ağustos 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	4
2.1. KET Yöntemleri.....	4
2.1.1. Işınımsal olmayan teknikler	4
2.1.2. Işınımsal Yöntemler	7
2.2. Manyetik Kuplaj Teorisi	9
2.2.1. Self Endüktans	10
2.2.2. Ortak Endüktans	12
2.2.3. Frekansın Manyetik Kuplaja Etkisi.....	15
2.2.4. Kalite Faktörü	17
2.2.5. Bobin Geometrisi	18
2.3. Manyetik Rezonans.....	19
2.4. Manyetik Alan Yönlendirmesi.....	23
2.5 Frekans Çeviriciler ve Doğrultucular	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. Besleme	30
3.2. KET Trafo Tasarımı.....	33
3.2.1. Bobin Tasarımı.....	34
3.2.2. Nüve Tasarımı	36
3.2.3. Manyetik Alanın Yönlendirilmesi	37
3.3. Yük	38
3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi	39
4. BULGULAR.....	43
4.1. KET Manyetik Analiz ve Analitik Sonuçları	43
4.2. KET Devre Simülasyonu Sonuçları	54

5. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
6. KAYNAKLAR	65
7. ÖZGEÇMİŞ	69



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
E	Elektrik alan
B	Manyetik akı yoğunluğu
Q	kalite faktörü
ϵ_0	Dielektrik sabiti
Φ	Manyetik akı
μ_0	Boşluğun geçirgenliği
μ_r	Bağıl geçirgenlik
ϵ_r	Bağıl yalıtkanlık
D	Bobin çapı
D_1	Birincil bobin çapı
D_2	İkincil bobin çapı
H	Bobin yüksekliği
N	Spir sayısı
M	Ortak endüktans
Z	Bobinler arası mesafe
A	İletken çapı
r_1	Birincil bobin çapı
r_2	İkincil bobin çapı
k	Bağlantı faktörü
L_1	Birincil bobin endüktansı
L_2	İkincil bobin endüktansı
N_1	Birincil bobin spir sayısı
N_2	İkincil bobin spir sayısı
δ	Deri kalınlığı
X_L	Endüktif reaktans
X_C	Kapasitif reaktans
ω	Açısal hız
ρ	İletkenlik
f	Frekans
f_0	Rezonans frekansı

C	Kapasite
V_{rip}	Dalgalanma gerilimi

Kısaltmalar	Açıklama
KET	Kablosuz enerji transferi
PWM	Dalga genişlik modülasyonu
IGBT	İzole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistör
MOSFET	Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
T_x	Birincil bobin
R_x	İkincil Bobin

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Demir nüveli Transformatör	5
Şekil 2.2. Elektromanyetik Spektrum	8
Şekil 2.3. Bobin yapıları	12
Şekil 2.4. Hizalanmamış bobinlerin şematığı	14
Şekil 2.5. Frekansa bağlı deri etkisi	16
Şekil 2.6. Litz kablo	17
Şekil 2.7. KET bobin çeşitleri	18
Şekil 2.8. Seri-seri topolojisi.....	20
Şekil 2.9 KET Eşdeğer direnç devre modeli	21
Şekil 2.10. Seri-paralel topolojisi	21
Şekil 2.11. Paralel-seri topolojisi	22
Şekil 2.12. Paralel-paralel topolojisi.....	23
Şekil 2.13. Akım geçen iletkendeki manyetik akı çizgilerinin dağılımı	24
Şekil 2.14. Ferrit'in manyetik akı üzerindeki etkisi.....	25
Şekil 2.15. Alüminyum manyetik akı üzerindeki etkisi.....	26
Şekil 2.16. Köprü devre diyagramı	27
Şekil 2.17. Doğrultucu yumuşatılmış sinyal	27
Şekil 2.18. Anahtarlama sinyali ve PWM tek fazlı invertör çıkış dalga formu	28
Şekil 2.19. Güç elektroniği yarı iletkenlerin yetenekleri	29
Şekil 2.20. IGBT Köprü devresi	29
Şekil 3.1. KET Sistemi blok diyagramı	30
Şekil 3.2. KET Doğrultucu devre diyagramı	31
Şekil 3.3. KET Evirici devre modeli.....	31
Şekil 3.4. KET Evirici kapı sinyalleri durum diyagramı	32
Şekil 3.5. KET Trafo.....	33
Şekil 3.6. Bobin Tasarımı	34
Şekil 3.7. Birincil ve ikincil bobinler.....	35
Şekil 3.8. Nüve tasarımı	36
Şekil 3.9. Ferrit Özellikleri	37
Şekil 3.10. Alüminyum levha tasarımı	38
Şekil 3.11. Batarya yükü parametreleri	39
Şekil 3.12. KET SEY ağ kurgusu	40
Şekil 3.13. KET parçaları ağ kurguları	41
Şekil 3.14. KET tam devre diyagramı	42
Şekil 3.15. KET ideal şartlara göre devre diyagramı.....	42
Şekil 4.1. Havadaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	44
Şekil 4.2. Havadaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörü.....	45
Şekil 4.3. Havadaki manyetik akı dağılımı 2D görünümü	46
Şekil 4.4. Alüminyum levhalarının manyetik akı yoğunluğu dağılımları ve vektörü ...	47
Şekil 4.5 Nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ile vektörel dağılım ...	48
Şekil 4.6. Bobinler üzerindeki akım yoğunluğu dağılımı	49
Şekil 4.7. KET rezonans devresi ve yük	54
Şekil 4.8. WM1 ve WM2'de okunan güç sinyalleri	56

Şekil 4.9. KET tam devre modeli durum diyagramı.....	56
Şekil 4.10. Giriş sinyali ve Doğrultulmuş şekli	57
Şekil 4.11. Birincil bobine uygulanan sinyal	58
Şekil 4.12. Birincil bobin güç grafiği	59
Şekil 4.13. İkincil bobin gerilim sinyali	60
Şekil 4.14. İkincil bobin akımsinyali	61
Şekil 4.15. İkincil bobin güç grafiği	61
Şekil 4.16. Bağlantı faktörü mesafe ilişkisi	62



ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Bobin özellikleri	35
Çizelge 4.1. Frekansa bağlı enduktans ve bağlantı faktörü hesaplamaları 3D	50
Çizelge 4.2. Frekansa Kayıplar ve sargı dirençleri 3D	51
Çizelge 4.3. Frekansa bağlı enduktans ve bağlantı faktörü hesaplamaları 2D	52
Çizelge 4.4. Frekansa göre kayıplar ve sargı dirençleri 2D	53
Çizelge 4.5. Rezonans frekansındaki değerler	54
Çizelge 4.6. KET Giriş-çıkış değerleri	55



1. GİRİŞ

Günlük hayatta kullanılan cihazların birçoğunun elektrikle çalıştığı göz önünde bulundurulduğunda enerji genelinde elektriğe duyulan ihtiyacın gitgide arttığı gözlenmektedir. Endüstriyel anlamda bu yönde bir eğiliminin olduğu çok açıktır. Özellikle son birkaç senedir otomobil firmaları petrol türevi yakıtlar ile çalışan araçları elektrik enerjisi ile çalışır hale getirme çabasıdadır (Li ve Mi, 2017).

Elektrik enerjisi, artan bataryalı cihaz sayısı ile beraber kablo kısıtlaması olmaksızın kullanılma eğilimindedir. Bataryalı cihaz kullanımı beraberinde şarj sorununu getirmektedir. Bu şarj sorununu çözmek amacıyla bilim dünyası mevcut batarya yapılarını geliştirmek üzerine yapılan çalışmaların yanı sıra şarj işlemini kablosuz olarak gerçekleştirme yönünde de çalışmalara odaklanmıştır. 19.yy 'da temelleri Nikola Tesla tarafından atılan Kablosuz Enerji Transferi (KET) fikri bu çalışmaların temelini teşkil etmektedir (Shin ve ark., 2013; Imura ve Hori, 2011; Takanashi ve ark., 2012). Özellikle 2007 yılında MIT'den bir grup bilim insanı tarafından 2 m mesafedeki 60 W'lık bir lamba manyetik rezonanslı kuplaj yöntemi ile % 40 civarında bir verimle enerjilendirilmiştir. Yapılan bu çalışma neticesinde André Kurs, M. Soljacic ve arkadaşları WiTricity (Wireless Electricity) ismi ile ticarileşmiş ve bu alanda bireysel ve endüstriyel ürünler ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalarda "rezonans" prensibi kilit rol oynamaktadır (Kurs ve ark., 2007). Rezonansın KET için sağladığı fayda, bilim insanlarının manyetik rezonans üzerine olan çalışmalarını daha da yoğunlaştırmıştır. KET sistemlerinde daha çok düşük güç seviyelerinde yapılan çalışmalar bulunması ile beraber, özellikle son yıllarda 7-10 kW seviyelerine ulaşabilen farklı aktarım mesafelerinde % 80-95 arasında verim değerlerine sahip çalışmalar olduğu görülmüştür (Cederlöf, 2012).

KET sistemleri ışımsal ve ışımsal olmayan teknikler olmak üzere 2 ana başlıktan oluşmaktadır. Elektromanyetik radyasyon, lazer ışını ve mikrodalga ışımsal teknikleri oluştururken, transformatörler, hava aralıklı sistemler, endüktif güç transferi ve manyetik rezonans ışımsal olmayan tekniklerdendir (Hui ve ark., 2013; Zhang ve ark., 2013).

Rezonans, doğal karşılık olarak iki objenin birbiri ile tam uyumlu olarak hareket ederken çevredeki diğer etkilere karşı tepkisiz olmasıdır. Manyetik rezonans prensibi ile çalışan KET sistemlerinde, alıcı ve verici taraflarda bulunan bobinlerin aynı frekansta çalışması ve bu sayede hem alıcı tarafın hem de verici tarafın rezonansa sokulması ile sağlanır (Kurs ve ark., 2007; A. Karalis ve ark.,2008; Máñez, 2014) .Bu prensip KET sistemlerinde kaynak ile yük arasındaki güç aktarımını oransal olarak artırır ve böylece sistem verimini yükseltmektedir.

Manyetik rezonans ile güç aktarımı devrelerinde birincil ve ikincil taraflarda bulunan bobinler arasında enerji aktarımı yapılabilmesi için aralarında bir ortak endüktans oluşması gerekmektedir. Bu ortak endüktans neticesinde her iki tarafı rezonansa sokabilmek için taraflara ayrı ayrı kondansatör bağlanması gerekir. Kondansatörlerin seri veya paralel bağlanma göre devre topolojisi oluşur (Cederlöf, 2012; Neves ve ark., 2011). KET sistemlerinde birincil tarafın şebeke frekansına göre oldukça yüksek sayılabilecek frekansa sahip bir kaynak ile beslenmesi sistem verimi açısından gereklidir (Zhang ve ark., 2013). Bu sebeple KET sistemlerinde aktarımı yapan bobinlerin tasarımında ve bu bobinlerin beslenmesinde bu durum göz önünde bulundurulmaktadır. Genellikle bobin beslemesi yapılırken AC kaynak doğrultulma işlemine tabi tutulduktan sonra evirici ile istenilen frekansa sahip AC kaynak elde edilir. Enerji aktarımı yapıldıktan sonra batarya grubu şarjı gibi işlemler için bu sinyal tekrar doğrultma işlemine tabi tutulur (Miller ve ark., 2014).

Bu tez çalışmasında, manyetik rezonans kuplaj yöntemi ile KET sisteminin modellenmesi yapılmıştır. Simulasyon programlarının yardımı ile tam bir sistem oluşturulmuş, enerji kablosuz olarak bir yüke aktarılmıştır. KET transformatör tasarımları ANSYS MAXWELL ile yapılmıştır. Tasarlanan sistemde verimi arttırmak amacıyla ferrit nüveler kullanılmıştır. Nihayetinde tasarlanan nüve yapısı ile özgün bir tasarım ortaya konmuştur. Bu tasarım ANSYS SIMPLORER modülünde simülasyona sokulmuş ve sistem verimi elde edilmiştir.

Bu çalışma 5 bölümden oluşmaktadır. Tezin 1. Bölümünde genel olarak giriş yapılmış ve tezin amacı ve önemi açıklanmıştır. Tezin 2. Bölümünde KET sistemleri incelenmiş ve

manyetik rezonans ile KET yöntemi açıklanmıştır. Tezin 3. Bölümünde KET'ini sağlayacak olan bobinlerin tasarımına yönelik hesaplamalar yapılmış ve bobin tasarımları verilmiştir. Tezin 4. Bölümünde elde edilen tasarımlar sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve elde edilen bulgular sunulmuş ve tartışılmıştır. Tezin 5. Bölümünde sonuçlar açıklanmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. KET Yöntemleri

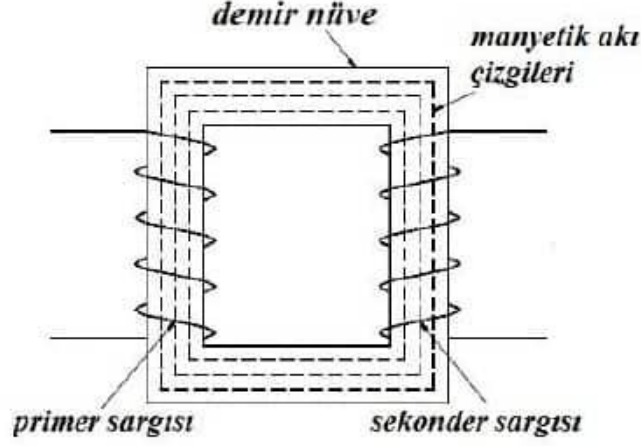
KET'e olan artan ihtiyaç bu alandaki çalışmalarını arttırmıştır. KET, elektrik enerjisinin bir güç kaynağından, iletken kullanmadan bir elektrik yüküne veya alıcıya iletilmesidir. Genel anlamda KET yöntemleri iki ana başlıkta incelenebilir. Bunlardan birincisi ışımsal olmayan teknikler diğeri ise ışımsal tekniklerdir. Günümüz teknolojisinde günlük hayatta kullanıma daha uygun olan yöntem, ışımsal olmayan yöntemlerdir. Işımsal yöntemlerden bazıları insan sağlığı açısından bazı riskler barındırabilirken ışımsal olmayan teknikleri insan sağlığı açısından kanıtlanmış bir tehlikesi bulunmamaktadır (Kesler, 2013).

2.1.1. Işımsal olmayan teknikler

Işımsal olmayan tekniklerde güç aktarım mesafesi ışımsal yöntemlere göre daha azdır. Fakat aktarılan güç miktarı açısından bakıldığında daha yüksek güçte aktarım sağlanabilmektedir. Bu yöntemde güç aktarımı manyetik akı ile yapılmaktadır. Enerji aktarımı için en az iki sargı gereklidir. Birincil ve ikincil sargılar birbirine herhangi bir iletken ile bağlı değildirler. Birincil sargı üzerinden uygulanan bir gerilim sargı üzerinden akım akmasına sebep olur. Bu akım Ampere yasasına göre kendi etrafında bir manyetik alan oluşmasına sebep olur. Bu manyetik alan bölgesinde bulunan ikincil sargı üzerinde bir gerilim endüklenir. Bu gerilim yük bağlanması durumunda yük üzerinden akımın geçmesi ile ikincil tarafa aktarılmış olur (Kesler, 2013).

Transformatörler: Işımsal olmayan teknikler aslında sıradan bir transformatörün çalışması prensibini açıklayan bir tekniktir. Yani aslında bir transformatörde KET gerçekleştirilir. Şekil 2.1'de gösterilen basit bir transformatörde birincil sargı, ikincil sargı ve nüve ana bölümleri oluşturur. Birincil sargı ile ikincil sargı arasında herhangi bir kablo benzeri iletken bulunmamaktadır. Birincil ve ikincil sargılar transformatör nüvesi üzerine sarılmış vaziyettedir. Bu sargılar birbirlerine elektriksel olarak bağlı olmasa da manyetik olarak bağlıdırlar. Transformatör nüvesi her iki sargıyı elektromanyetik olarak

birbiri ile yüksek oranda eşleştirir. Bu durumda eşleşme katsayısı oldukça yüksektir. Transformatörlerdeki bu manyetik aktarım verimi %97-99 seviyesine çıkartabilmiştir (Chinthavali ve Onar, 2016).



Şekil 2.1. Demir nüveli Transformatör

Transformatörlerde olduğu gibi yekpare bir nüve üzerine sarılmış sargılardan farklı olarak, nüve içermeyen veya nüveler arasında hava boşluğu bulunduran sistemleri ayrı başlık altında incelemek daha faydalı olacaktır. Çünkü mobiliteyi sağlamak adına oluşturulan kablosuz enerji sistemlerinde asıl amaç hava aralıklı durumlarda enerji transferini sağlamaktır.

Hava aralıklı KET sistemleri: Hava aralıklı KET’de güç kaynağından alınan enerji bir kablo gibi iletken ile bağlı olmamasının yanında, transformatörlerde olduğu gibi manyetik bağlantıyı sağlayan, manyetik geçirgenliği yüksek bir nüve ile de birbirine bağlı olmayan birincil ve ikincil sargılardan oluşur. Bu sargılar arasındaki manyetik bağlantı ise sargılar arasında bulunan hava ile sağlanmaktadır. Yapılan birçok çalışmada bu hava boşluğu enerji aktarımındaki en büyük zorluğu oluşturmaktadır (Imura, 2010; Lee ve Lorenz, 2011; Onar, 2013; Dai, 2015).

Endüktif Enerji Transferi: Endüktif güç transferi, bir devredeki alternatif akımın diğerine iletilebilmesini sağlar. Devreler arası transfer için kablolar gerekli olmadığından, endüktif güç iletimi kablosuz bir teknoloji biçimidir. Adından da anlaşılacağı gibi, bir

endüktif güç iletim sistemi, çalışmasının temeli olarak iki devre arasında endüktif kuplajı kullanır. Sistem etkili bir şekilde iki parçalı bir transformatördür. Güç kaynağı elemanın bulunduğu taraf birincil veya verici, yükün bulunduğu taraf ise ikincil veya alıcı taraf olarak isimlendirilir.

Alıcı ve verici eşleşmiş devreler, devrenin manyetik alanını artırmak için bobin formundadır. Bu şekilde, verici bobin içinden bir akım geçirir ve bir manyetik alan elde edilir. Bu manyetik alan sayesinde, alan içerisinde yer alan ikincil bobine bağlanır ve verici taraf akımında bir değişiklik olduğunda, bu ikincil veya alıcı bobinde bir voltaj endükler. Alıcı veya ikincil bobinde endüklenen voltaj, daha sonra gerektiği gibi bir akü şarjı veya diğer devreleri tahrik etmek için kullanılabilir. Yapılan çalışmalarda bu yöntem rezonans kuplajı olmadan da kullanılmıştır (Imura, 2010; Dai, 2015).

Manyetik Rezonans Enerji Transferi: Rezonans doğada birçok farklı biçimde ortaya çıkan bir olgudur. Genel olarak, rezonans iki mod arasında salınan enerjiyi içerir; bilinen bir örnek, enerjinin potansiyel ve kinetik formlar arasında salındığı mekanik bir sarkaçtır. Rezonanstaki bir sistemde, sisteme sadece zayıf bir uyarım sağlarken büyük bir depolanmış enerji birikimine sahip olmak mümkündür. Sistem içine enerji enjeksiyonu oranı, sistem tarafından enerji kaybı oranından daha büyükse, birikme meydana gelir. KET sistemlerinde yaygın olarak kullanılan manyetik rezonans tekniğinde ise, devre rezonans durumunda çalışır. Devre yapısı ve mantığı endüktif enerji transferi ile aynı olmakla beraber, buna ek olarak birincil ve ikincil tarafta ayrı ayrı olmak üzere bobinlerin hem kendi etkilerini hem de birbirlerine olan etkilerini gidermek amacıyla rezonatör kapasiteleri eklenir. Bu sayede devre rezonans durumunda çalışır. Bu durum devre verimini etkilemektedir (Wang ve ark., 2004; Jiang ve ark., 2017). Manyetik rezonans yönteminin kullanılması ile birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, bu alanda yapılan çalışmalardan en yüksek % 96 verimle enerji transferi seri-paralel topolojisi kullanılarak Tang ve ark. tarafından yapılmıştır. (Tang ve ark., 2012)

2.1.2. Işınımsal Yöntemler

Işınımsal teknikler ışınımsal olmayan teknikler ile karşılaştırıldığında günlük kullanım açısından, insan sağlığına zararlı durumlar oluşturabilmektedir. Bu sebeple cep telefonu, bilgisayar gibi günlük hayatta yoğun olarak kullanılan cihazlarda bu tarz bir yöntem tercih edilmemektedir. Bu teknik ile günlük hayatta maruz kalınan zararı en aza indirecek şekilde aktarım yapılması tercih edildiğinde, aktarılan enerji çok düşük seviyelere inmekle beraber, verimlilik de ciddi oranda düşmektedir (Zhang ve Ho, 2013).

Elektromanyetik Radyasyon: Elektromanyetik (EM) radyasyon, etrafımızda bulunan ve radyo dalgaları, mikrodalgalar, X-ışınları ve gama ışınları gibi birçok form alan bir enerji şeklidir. Güneş ışığı aynı zamanda bir EM enerji biçimidir, ancak görünür ışık, geniş bir elektromanyetik dalga boyları yelpazesi içeren EM spektrumunun sadece küçük bir kısmıdır.

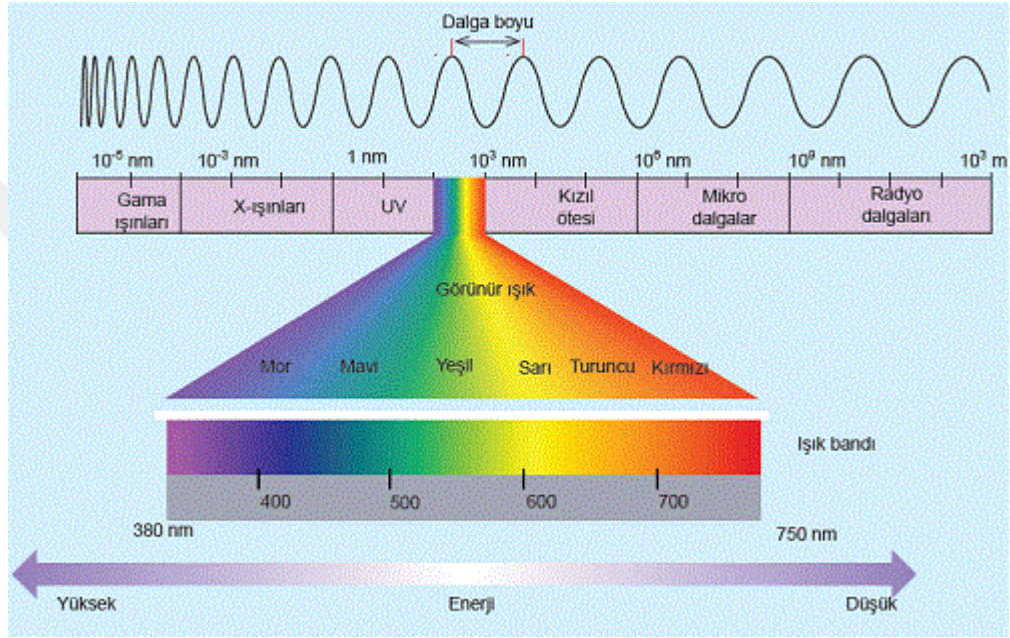
Elektrik ve manyetizmanın bir zamanlar ayrı güçler olduğu düşünülüyordu. Bununla birlikte, İskoç fizikçi James Clerk Maxwell birleşik bir elektromanyetizma teorisi geliştirdi. Elektromanyetizma çalışması, elektrik yüklü parçacıkların birbirleriyle ve manyetik alanlarla nasıl etkileşime girdiği ile ilgilidir (Maxwell, 1873).

Elektromanyetik teori dört ana elektromanyetik etkileşimden oluşur (Maxwell, 1873):

- Elektrik yükleri arasındaki çekim veya itme gücü, aralarındaki mesafenin karesiyle ters orantılıdır.
- Manyetik kutuplar, elektrik yükleri gibi birbirlerini çeken ve iten çiftler halinde gelir.
- Bir teldeki bir elektrik akımı, yönü akım yönüne bağlı olan bir manyetik alan üretir.
- Hareketli bir elektrik alan manyetik alan üretir ve bunun tersi de geçerlidir.

Bu bilgiler eşliğinde Maxwell tarafından Maxwell denklemleri adında bir dizi formüller geliştirilmiştir (Maxwell, 1865).

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi EM radyasyonu çok geniş bir dalga boyu ve frekans aralığını kapsamaktadır. Bu aralık elektromanyetik spektrum olarak bilinir. EM spektrumu genellikle azalan dalga boyu ve artan enerji ve frekans sırasına göre yedi bölgeye ayrılır. Ortak gösterimler şunlardır: radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi (IR), görünür ışık, ultraviyole (UV), X-ışınları ve gama ışınları (Aldhafer, 2014).



Şekil 2.2. Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik radyasyon Tesla tarafından tesla bobinlerinde kullanılmış ve KET’in ilk başarılı örneklerden olmuştur (Tesla, 1900). Fakat aktarım esnasında boşa harcanan enerji fazla olduğu için bu yöntem pratik bulunmamış ve farklı yöntemler ile arayış devam etmiştir (Zhang ve Ho, 2013; Xie ve ark.,2013).

Mikrodalga: Mikrodalgalar radyo ve IR arasındaki EM spektrumu aralığında yer alır. Bunlar yaklaşık 3 GHz ile yaklaşık 30 trilyon hertz veya 30 THz ve yaklaşık 10 mm ile 100 μ m dalga boylarına sahiptir. Mikrodalgalar yüksek bantlı iletişim, radar ve mikrodalga fırınlar ve endüstriyel uygulamalar için bir ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır (Ichihara ve ark., 2012).

Mikrodalga güç aktarımında en önemli avantaj yüksek verimdir. Mikrodalga ile yüksek verimde güç aktarımı yapılabilmektedir. Mikrodalga sistemleri, mikrodalga kaynağı verici anten ve alıcı antenden oluşur. Mikrodalga güç aktarımı uzak mesafeler için uygun olduğundan telekomünikasyon sistemleri, uydu gibi cihazlarda kullanılmaktadır (Noh ve ark., 2009).

Lazer Işını: Prensip olarak, lazer enerji iletim sistemleri, mikrodalga teknolojisi ile enerji iletimine çok benzemektedir: güç kaynağı (güneş, elektrik) yönlü elektromanyetik radyasyon üreten bir verici veya bir verici dizisine dönüştürülür, elde edilen dizi bir alıcıda emilimi gerçekleştirilen enerjiyi daha kullanışlı, taşınabilir bir forma dönüştürür, örn. elektrik, ısı, hidrojen (Summerer ve ark., 2008). Lazer ile enerji transferi yapılan sistemlerde odaklaması yapılmış bir lazer ışını uzun mesafelere enerji transfer edebilmenin yanında düşük güç seviyelerinde olsa bile canlılar için tehlike arz etmektedir. Ayrıca yağmur, sis vb. durumlarda atmosferik emilim gibi sebeplerden verimleri ciddi oranlarda düşebilir hatta enerji transferini yapamayacak konuma gelebilirler.

2.2. Manyetik Kuplaj Teorisi

Manyetik kuplaj teorisi endüktif kuplaj olarak da isimlendirilebilir. Endüktif kuplaj, endüktif güç transferini sağlayan temeli açıklamaktadır. Endüktif güç transferinin açıklaması ise Maxwell denklemlerinin teorisine dayanmaktadır. Maxwell yasalarına göre içerisinde akım geçen bir tel etrafında, geçen akımın yönüne ve şiddetine göre bir manyetik alan meydana gelir. Diğer bir Maxwell yasasına göre de değişken bir manyetik alan içerisinde bulunan bir iletkenin uçlarında bir gerilim endüklenir. Bu yasalar manyetik kuplaj teorisini açıklayan fiziksel temelleri oluşturmaktadır (Maxwell, 1865).

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (2.2)$$

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{-d\phi_B}{dt} \quad (2.3)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \right) \quad (2.4)$$

Birinci denklem Gauss yasasıdır. Gauss yasasına göre yüzeyden geçen elektrik akı o yüzeyden geçen elektrik alan çizgilerinin toplam miktarı ile ifade edilir. Bu ifade elektrik yüklerinin elektrik alan oluşturduğu anlamına gelmektedir. Maxwell denklemlerinden ikincisi ise manyetizma için Gauss yasasıdır. Birinci denklemde sol taraf toplam elektrik akıyı ifade ederken ikinci denklemde sol taraf toplam manyetik akıyı ifade eder. Asıl farklılık ise bu iki denklemi birbirinden ayrı ifadeler haline getiren açıklamayı barındıran ve denklemlerin sağ taraflarında belirtilen ifadelerdir. Manyetik akı toplamları her zaman sıfıra eşittir. Yani bütün manyetik akı çizgileri kapalı döngüler oluşturacak şekilde meydana gelirler. Üçüncü denklem ise Faraday yasasıdır. Faraday yasasına göre elektrik alan manyetik akıdaki değişime bağlıdır. Diğer bir deyişle değişen bir manyetik akı elektrik alan oluşturur. Maxwell denklemlerinden dördüncü ve sonuncusu ise Ampere yasasının Maxwell tarafından düzenlenmiş halidir. Faraday yasasında manyetik akının türevi varken, dördüncü denklemde diğer bir deyişle Ampere-Maxwell yasasında elektrik akının türevi vardır. Yani değişen bir elektrik alan bir manyetik alan oluşturmaktadır (Maxwell, 1865).

KET açısından ise bütün bunların özeti, değişken bir manyetik alan içerisinde bulunan bir iletkenin uçları arasında bir gerilim endüklenmesidir. Bu değişken alanların oluşturulması, birbirleri ile ilişkilendirilmesi, endüklenen gerilimin yüke aktarılması aşamalarında ise bobin tasarımları hem geometrik tasarımları hem de malzeme olarak kilit rol oynamaktadır.

2.2.1. Self Endüktans

Hava nüveli bobinler KET sistemleri için daha çok tercih edilseler de, yüksek güçlü istemler için ferrit nüveli bobinler tercih edilmektedir (Fincan ve Üstün, 2015). Bu tez çalışmasında da ferrit nüveli bobin tasarımı çalışılmıştır. Self endüktans değerinin hesaplanmasında birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları yaklaşma yöntemleri ile çalışırken bazıları ise iterasyon yöntemi ile hesaplama yapar (Fincan ve Üstün, 2015). Bu yöntemlerin uygunluğu bobinlerin geometrik şekillerine oldukça bağlıdır. Örneğin tek katmanlı selenoid bobin için hesaplama yaparken farklı bir formül kullanılırken, çok katmanlı heliks bobinlerin hesabında farklı bir formül tercih etmek

nümerik hesaplamayı daha kolay hale getirebilmektedir. Bobinlerin endüktans hesabında en çok kullanılan yöntemler Sidhu yöntemi, Lundin yöntemi ve Wheeler yöntemidir (Fincan ve Üstün, 2015).

Sidhu Yöntemi tek katmanlı bobinlerdeki endüktans hesaplaması için kullanılan bir yöntemdir. Formül içerisindeki K parametresinin hesaplanmasında iteratif yöntemler kullanılmaktadır (Fincan ve Üstün, 2015).

$$L = \pi \mu_0 N^2 \frac{D^2 K}{4 H} \quad (2.5)$$

$$K = \frac{1}{3\pi} \frac{4dH}{D^2} (F(i) - E(i)) + \frac{4d}{H} E(i) - \frac{4D}{H} \quad (2.6)$$

$$d = D^2 + H^2 \quad (2.7)$$

$$i = \frac{D}{d} \quad (2.8)$$

$$F(i) = \frac{\pi}{2a_N} \quad (2.9)$$

$$E(i) = F(i) (1 - 0.5 \sum_0^N 2^n c_n^2) \quad (2.10)$$

$$a_n = 0.5(a_{n-1} + b_{n-1}) \quad (2.11)$$

$$b_n = \sqrt{a_{n-1} \cdot b_{n-1}} \quad (2.12)$$

$$c_n = 0.5(a_{n-1} - b_{n-1}) \quad (2.13)$$

Lundin yöntemi, Sidhu'nun yöntemine göre daha karmaşık hesaplamalar gerektirir. Bu yöntemde Gauss'un hipergeometrik fonksiyonlarının ve Pochhammers'ın sembolleri bulunması ve bunlardan elde edilen sonuçlara göre işlem yapmak oldukça zordur.

$$L = \mu_0 N^2 \frac{D}{2} \left[\left(\ln \frac{4D}{H} - 0.5 \right) f_1 \left(\frac{H^2}{D^2} \right) + f_2 \left(\frac{H^2}{D^2} \right) \right] \quad (2.14)$$

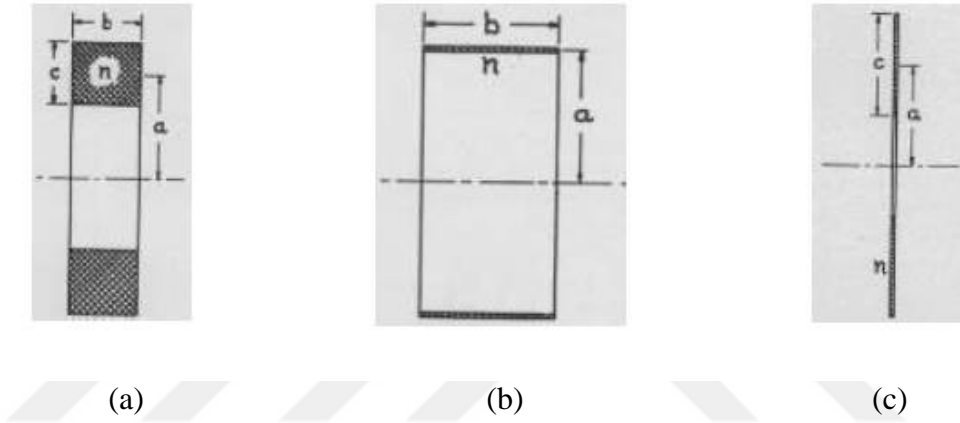
$$f_1 \left(\frac{H^2}{D^2} \right) = \frac{1 + 0.383901 \frac{H^2}{D^2} + 0.017108 \frac{H^4}{D^4}}{1 + 0.258952 \frac{H^2}{D^2}} \quad (2.15)$$

$$f_2 \left(\frac{H^2}{D^2} \right) = 0.093842 \cdot \frac{H^2}{D^2} + 0.002029 \cdot \frac{H^4}{D^4} - 8 \cdot 10^{-3} \quad (2.16)$$

Üçüncü yöntem ise Wheeler yöntemidir (Wheeler, 1928). Bu yöntem 1928 yılında bulunmasına rağmen halen güncelliğini korumaktadır. Wheeler yöntemi ile yapılan hesaplamalarda hata payı % 0.1 ile 1.7 arasında değişmektedir. Bu yöntemi diğer

yöntemlerden ayıran en önemli etmenlerden birisi iterasyon içermemesi ve pratik olmasıdır. Ayrıca Wheeler yöntemi hem tek katmanlı hem de çok katmanlı bobinlerin endüktans hesaplamalarında kullanılmaya uygundur. Fakat katman sayısının artması veya sarımlar arasındaki mesafenin azalması Wheeler denkleminde elde edilen sonuçta hatanın da artması anlamına gelebilir (Fincan, 2015).

$$L = \frac{0.8 a^2 n^2}{6a+9b+10c} [\mu H] \quad (2.17)$$



Şekil 2.3. Bobin yapıları: (a) Çok katmanlı sarmal bobin (b) Tek katmanlı sarmal bobin (c) Tek katmanlı spiral bobin (Wheeler, 1928)

Bu tezde tasarımı yapılan tek katmanlı spiral bobinin endüktans değerinin hesaplanmasında da Wheeler yöntemi kullanılmıştır. Buna dair daha ayrıntılı hesaplamalar daha sonraki bölümlerde verilecektir.

2.2.2. Ortak Endüktans

Ampere yasasına göre, bir iletken üzerinden akım geçtiği zaman etrafında bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan içerisinde yer alan diğer bir tel iletkeninde ise akımdaki değişime bağlı olarak bir zıt emk oluşur (Pappas, 1983). Bu iletkenler bir sarım şeklinde yani bobin olarak da düşünülebilir. Oluşan bu emk'nın manyetik olarak endüklendiği veya ortak endüktans ile oluştuğu ifade edilir. Sembolü M olarak belirtilir. Yani, iki veya daha fazla bobin, ortak bir manyetik akı ile birbirine manyetik olarak bağlandığında, ortak endüktans özelliğine sahip oldukları söylenir. Bu durumda, iki veya daha fazla bobin

arasındaki enerji aktarımı ortak endüktans değeri ile alakalıdır. Bir bobini diğerine bağlayan ortak endüktansın büyüklüğü, iki bobinin konumlandırılma durumuna bağlıdır. Bir bobin, ortak endüktans oluşturacağı ikinci bir bobine yakın olarak konumlandırıldığında, birinci bobin üzerinden geçirilen akımdan kaynaklı manyetik akının neredeyse tamamı ikinci bobin ile kesişir ve görece büyük bir emk endüklenir, bu sayede yüksek ortak endüktans değeri elde edilmiş olur (Lundin, 1985; Queiroz, 2005). Sidhu yöntemine göre ortak endüktans hesaplanması (Fincan ve Üstün, 2015) Eşitlik 2.18 ile yapılır.

$$M = \frac{2\mu}{k} (a \cdot b)^{0.5} \left(\left(\frac{1-k^2}{2} F(k) - E(k) \right) \right) \quad (2.18)$$

Burada; μ manyetik geçirgenlik, a birinci bobinin yarıçapı, b ikinci bobinin yarıçapı, c ise bobin yüksekliğidir.

$$F(k) = \frac{\pi}{2a_N} \quad (2.19)$$

$$E(k) = F(k) \left(1 - 0.5 \sum_0^N 2^n c_n^2 \right) \quad (2.20)$$

$$a_0 = 1 \quad (2.21)$$

$$b_0 = (1 - k^2)^{0.5} \quad (2.22)$$

$$c_0 = k \quad (2.23)$$

Neumann yöntemine göre ortak endüktans hesaplanması;

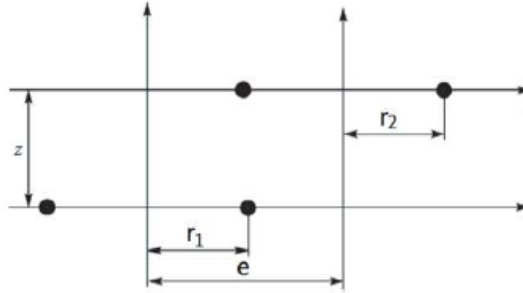
$$M = N_1 N_2 \frac{\mu_0}{2} r_1 r_2 \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\alpha)}{\sqrt{b^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\alpha)}} d\alpha \quad (2.24)$$

0 ile 1 arasında bir değer alabilen bağlantı faktörü veya eşleşme katsayısı ise ortak endüktans değeri ile hesaplanmaktadır. Eğer $k=1$ ise iki bobin birbiriyle tam olarak eşleşmiştir fakat pratikte kaçak akı olacağı için mümkün değildir. Bağlantı faktörü; $k>0.5$ olduğu durumlar için kuvvetli eşleşme, $k<0.5$ için ise zayıf eşleşme adlandırılması yapılabilir. KET sistemlerinde birincil taraftan ikincil tarafa aktarılan gücün maksimum olması için eşleşme katsayısının mümkün olduğunca 1'e yakın olması beklenmektedir.

Örneğin transformatörlerde bağlantı katsayısı 0,99 seviyelerinde iken KET sistemlerinde bu değer oldukça düşmektedir. Bunun sebebi manyetik akı transformatörlerde nüve üzerinden manyetik devresini oluştururken, KET sistemlerinde kapalı manyetik devre, manyetik akı yolunu iki bobin arasındaki hava üzerinden tamamlar. Bu durum kaçak endüktans değerini ve toplam empedansı oldukça yükseltir ve neticesinde akım azalacaktır.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.25)$$

Bağlantı faktörü hesaplanmasında bobinlerin eş merkezli olduğu durum göz önünde bulundurulmuştur. Bobinlerin eş merkezli olmadığı durumlarda ortak endüktans değeri düşecek ve bağlantı faktörü bundan olumsuz etkilenecektir, yani diğer bir deyişle değeri düşecektir. Eş merkezli olmayan iki bobin için ortak endüktans değeri hesaplaması Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Grover, 1964, Fincan, 2015).



Şekil 2.4. Hizalanmamış bobinlerin şematığı (Fincan, 2015)

$$M = \frac{\mu_0}{\pi} \sqrt{r_1 r_2} \int_0^\pi \frac{(1 - \frac{e}{r_1} \cos \phi) u(k)}{\sqrt{V^3}} d\phi \quad (2.26)$$

$$g^2 = \frac{4\alpha V}{(1 + \alpha V)^2 + \beta^2} \quad (2.27)$$

$$\alpha = \frac{r_1}{r_2} \quad (2.28)$$

$$\beta = \frac{c}{r_1} \quad (2.29)$$

$$V = \sqrt{1 + \left(\frac{e}{r_2}\right)^2 - 2e \cos\left(\frac{\phi}{r_2}\right)} \quad (2.30)$$

$$u(k) = \left(\frac{2}{g} - g\right) K(g) - \frac{2}{g} E(g) \quad (2.31)$$

$E(g)$ ve $K(g)$ tamamlanmış eliptik integrallerdir.

$$K(g) = 0.5\pi \left(1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 g + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 g^2 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 g^3 + \dots \right) \quad (2.32)$$

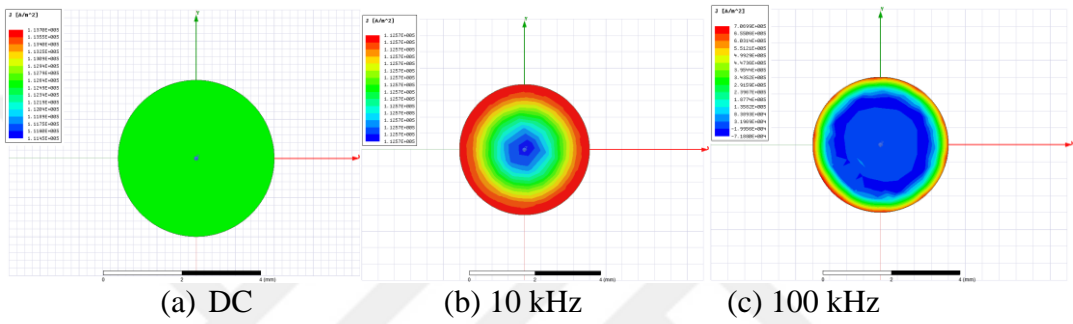
$$E(g) = 0.5\pi \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 \frac{g}{1} - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \frac{g^2}{3} - \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 \frac{g^3}{5} - \dots \right) \quad (2.33)$$

2.2.3. Frekansın Manyetik Kuplaja Etkisi

İkincil tarafta endüklenen gerilim miktarı ortak endüktans ile ilgilidir. Ortak endüktans ise daha önce de Faraday yasasında belirtildiği gibi, değişen manyetik akı ile orantılıdır. Bu temellere göre, birim zamandaki manyetik akı değişimi ne kadar yüksek olursa ortak endüktans artacak, dolayısı ile ikincil tarafta, yani kaynak bulunmayan tarafta endüklenen gerilim miktarı da artacaktır. Birim zamandaki manyetik akı değişimi de elektriksel karşılık olarak AC anlamına gelmektedir. Ülkemizdeki elektrik ağı için sağlanan 50 Hz frekansı bu tarife uymakta ve trafolarla enerji aktarımına uygun olmakla beraber, KET’de gereken enerji transferi için daha yüksek frekans değerlerinde çalışılması gerekmektedir. Bunun sebebi manyetik akı yolunun hava üzerinden tamamlanması gerekliliğidir. Örneğin trafolarla kullanılan, çok katmanlı silisyumlu saçlar ile elde edilen manyetik akı yolunun sağlanmasında yararlanılan çeliğin manyetik akı geçirgenliği boşluğun 2000-6000 kat fazlasıdır. Bu sebeple ikincil tarafa istenilen enerji transferinin yapılmasında kHz-MHz seviyelerinde AC kaynaklar kullanılmaktadır. Yüksek frekans kaynakları kendi başına daha farklı güç elektroniği bileşenleri gerektirmekle beraber KET özelinde, bobinlerde deri etkisi ve yakınlık etkisi gibi hesaba katılması gereken parametreler meydana getirir (Sullivan, 1999).

Deri etkisi açıklanırken öncelikle iletkenlerin akım taşıma hususundaki davranışları hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Bir iletken üzerinden geçen akım zamanla değişmeyen bir değerde yani DC akım ise, taşınan akım iletkenin kesit alanına eşit biçimde dağılır. AC sinyallerde ise, taşınan akım zamanla değişen bir değere sahip olduğu için, iletkenin kesit alanına bakıldığında, iletken üzerindeki akım yoğunluğunun (J) iletken konumuna göre farklılık gösterdiği görülür. Frekans arttıkça, taşınan akım iletken merkezinin dışına doğru yönelme eğilimindedir. Buna deri etkisi denmektedir (Casanova ve ark., 2009). Yuvarlak bir kesit alanına sahip bir iletken kullanıldığında düşünülürse, akımın merkezden

uzak bölgelerde daha yoğun olduğu görülür. Şekil 2.5 'te bu durumu gösteren ANSYS Maxwell ile analiz edilmiş örneklemeler gösterilmiştir. Şekil 2.5.(a)'da gösterildiği gibi iletkenin geçen akım zamana göre değişmediğinde J iletken kesit alanına eşit olarak dağılmıştır. Şekil 2.5.(b)'deki gibi 10 kHz frekansında bir akım uygulandığında akım yoğunluğu iletkenin merkezden uzak bölgelerine doğru yoğunlaşmaktadır. Şekil 2.5.(c)'de gösterildiği gibi daha yüksek bir frekans uygulandığında ise iletkenin neredeyse sadece dış yüzeyinde bir akım yoğunluğu görülmektedir.



Şekil 2.5. Frekansa bağlı deri etkisi

Deri etkisi sonucunda oluşan deri kalınlığı Eşitlik 2.34'deki ifade ile hesaplanır;

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2.34)$$

Deri etkisinden kaçınmak için tek bir iletken yerine, birbirine paralel çok sayıda iletken kullanılabilir (Covic ve Boys, 2013). Bu durumda da yakınlık etkisini göz önünde bulundurmak gerekir. Yakınlık etkisi birbirine çok yakın iki iletken üzerinden geçen akımların birbirlerini etkilemesidir. Yakınlık etkisi iletkenlerin AC direncinin artmasına sebep olur. Bu sebeple yüksek frekanslardaki etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Deri derinliği, bir iletkenin etkili akım taşıma alanını belirlediğinden, derinin derinliğinden daha kalın bir iletken, etkili bir malzeme kullanımı olmayacaktır. Frekansın getirdiği bu olumsuzluklardan kurtulmak için KET sistemlerinde litz teli kullanılmaktadır (Cederlöf, 2012; Fincan, 2015). Şekil 2.6'da bir Litz teli, her biri ayrı ayrı yalıtılmış, bir telin içine sarılmış damarlı burulmuş tellerden oluşur. Her damar, deri derinliğinden daha kalın değildir, bu da iletken alanın etkili kullanımını sağlar. Teller daha sonra birlikte örülür, böylece her bir telin yeri, telin merkezi ile telin kenarı arasında değişir. Bu, yakınlık

etkisinin her bir damarı aynı şekilde etkileyeceğini ve böylece her telden aynı akımı taşıyacağını garanti eder (Sullivan ve Zhang, 2014).



Şekil 2.6. Litz kablo

2.2.4. Kalite Faktörü

Bir bobin için kalite faktörü (Q), bobinin belli bir frekanstaki reaktansı ile direnci arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Yüksek kalite faktörü, daha yüksek seviyede enerjinin direnç üzerinde harcanmadan bobin üzerinde depolanabilmesi anlamına gelir (Alanson ve Smith, 2010). Bu da beraberinde aynı akım değeri için daha iyi verimlilik anlamına gelir. Aşağıdaki kalite faktörü denkleminde de anlaşılacağı gibi yüksek frekanslarda yüksek kalite faktöründen bahsedilmekle beraber, yüksek frekansın direnç üzerindeki olumsuz etkisi, kalite faktörüne de olumsuz etkileyecektir. Kalite bir anlamda rezonans devrelerindeki kayıp ölçümüdür (Pozar, 2005). Yani daha az kayıp daha yüksek Q değeri anlamına gelir. KET sistemlerinde enerji aktarımının aslen birincil ve ikincil bobinler arasında yapıldığı göz önünde bulundurulduğunda, kalite faktörünün önemi ortaya çıkmaktadır (Acero ve ark., 2005).

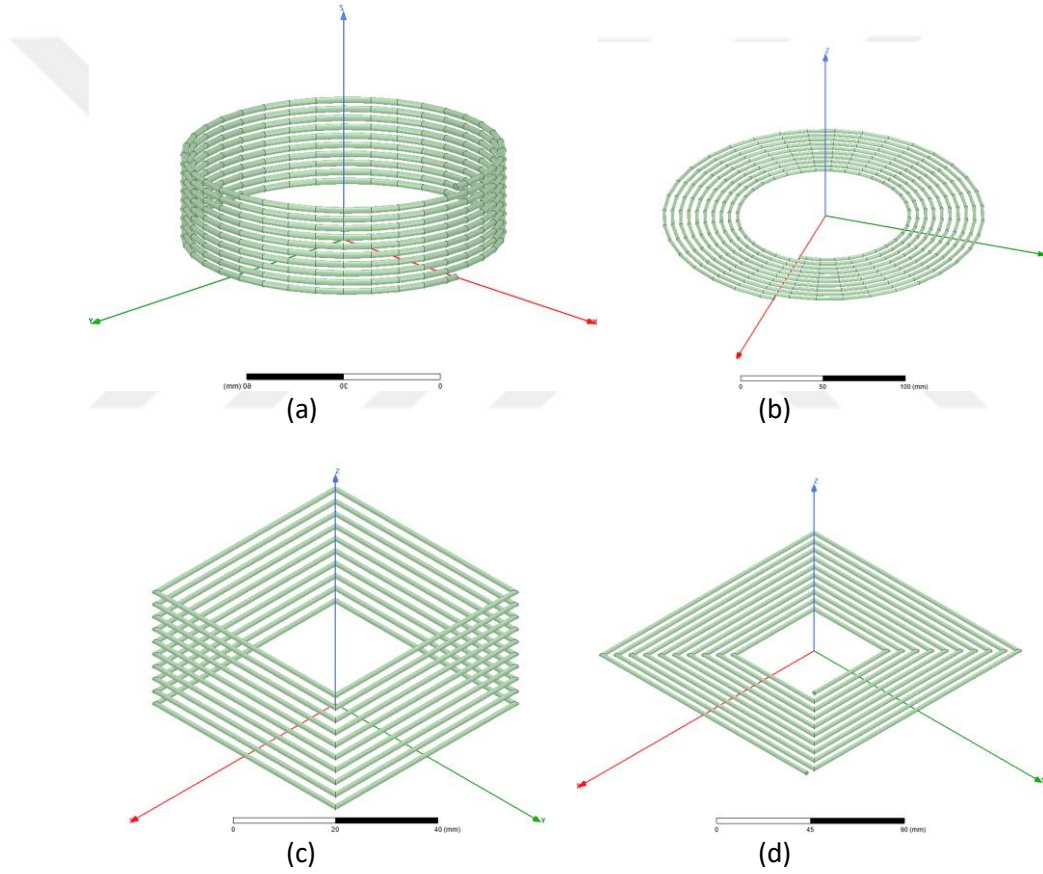
$$Q \equiv \frac{\omega L}{r_L} = \frac{X_L}{r_L} \quad (2.35)$$

$$R_L = \frac{1}{n} \frac{8\rho}{d_s^2} \sum_{i=1}^{n_t} r_i \quad (2.36)$$

Burada; ω açısal hız, n damar sayısı, ρ materyal resistivitesi, d_s damar çapıdır.

2.2.5. Bobin Geometrisi

KET sistemlerinde bobin geometrisi olarak köşesiz tasarımı bobinlerde, sarmal (spiral) veya solenoid (helis, helix) tipteki bobinlerden bahsedilirken, köşeli tasarımlarda kare, dikdörtgen vb. şekilde sarmal veya solenoid geometriler sahip bobinler tercih edilebilmektedir (Shi ve ark., 2014). Bu bobinlerin görünüşleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bobin geometrisi verim, eşleşme katsayısı, ortak endüktans ve kalite faktörü gibi enerji transferinde verimliliği etkileyen parametrelere etkisi bulunmaktadır (Shi ve ark., 2014; Luo ve Wei, 2018).



Şekil 2.7. KET bobin çeşitleri (a) yuvarlak solenoid, (b) yuvarlak spiral, (c) kare solenoid, (d) kare spiral

Yapılan bu tezde köşe içermemesi ve bu sayede manyetik alan dağılımında uç nokta oluşturmayarak süreklilik sağlanması sebebiyle spiral tip bobin tercih edilmiştir.

2.3. Manyetik Rezonans

KET daha önce de bahsedildiği gibi temelde iki bobinden oluşmaktadır. Bu bobinler belli endüktans değerlerine sahiptirler. Birincil ve ikincil taraf arasındaki enerji aktarımının bu bobinlerin endüktanslarına bağlı olduğundan daha önce bahsedilmişti. Bu bobinler devre üzerinde incelendiğinde, sahip oldukları endüktans değerlerinden dolayı giriş sinyaline göre belli faz kaymalarına sebep olacaktır. Bu faz kayması birincil ve ikincil taraf için ayrı ayrı hesaba katılmalıdır. Fakat ortak endüktans dolayısı ile birbirinden tamamen bağımsız olarak değil, birbirine bağlı olarak etkileri düşünülmelidir. Bobinlerden kaynaklanan endüktif etkiyi gidermek için devreye kapasitif etki oluşturacak kondansatör bağlanmalıdır. Bu sayede, sistem rezonansa sokulmaktadır. KET sistemlerinde, rezonansın verim üzerinde oynadığı kilit rol yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (Kurs ve ark., 2007; Sample ve Smith, 2010; Imura, 2010).

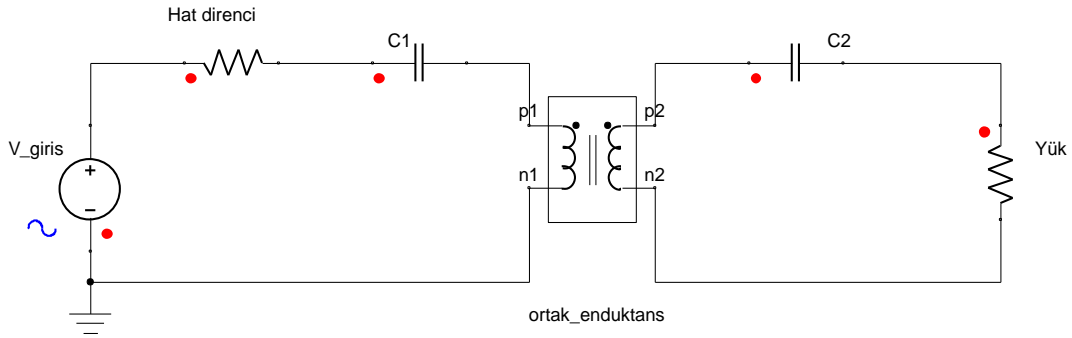
Rezonans oluştuğunda, endüktördeki azalan manyetik alanın neden olduğu akım, kondansatörü şarj eder. Deşarj kondansatörü daha sonra bir manyetik alan üretecek olan endüktörü sağladığı akım ile tahrik eder. Sistemdeki enerji manyetik enerji ve elektrik enerjisi arasında değişir. İdeal durumda kayıp yoktur ve sistem rezonansa devam eder. Ancak gerçekte, endüktör ve kondansatörde kayıplara yol açacak dirençler vardır. Rezonans frekansında endüktör ve kapasitör empedansları birbirlerini sıfırlar ve devrede sadece omik dirençler kalır. Bu da akımın genliğinin en yüksek seviyede elde edilmesine olanak sağlar. Ayrıca birincil ve ikincil tarafta sırası ile yüksek frekans besleme ve yük için doğrultma işlemi yapılacağı zaman, rezonans frekansında çalışılması güç elektroniği elemanlarından yarıiletkenlerin anahtarlamalarının akım veya gerilim sıfırlarında yapılması açısından avantaj sağlayacaktır. Bu yumuşak anahtarlama kayıpları azaltacaktır. Rezonans işlemi sağlayacak olan kondansatörlerin devreye bağlanmasına göre devre topolojisinin ismi değişir. Hem birincil tarafa hem de ikincil tarafa kondansatör bağlanacağı için dört farklı topolojiden bahsedilebilir: Seri-Seri topolojisi, Seri-Paralel topolojisi, Paralel-Seri topolojisi, Paralel-Paralel topolojisi. Rezonans frekansını belirleyen formül Eşitlik 2.36'da verildiği gibidir;

$$X_L = X_C \quad (2.37)$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.38)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.39)$$

Seri-Seri topolojisi: Kaynağın bağlı bulunduğu birincil tarafta, rezonans kapasitörü bobine seri olarak bağlanırken, yükün bulunduğu ikincil tarafta da rezonans kapasitörü bobine seri olarak bağlanır. Seri-Seri topolojisinde, verici taraf bir akım kaynağı gibi davranarak sabit bir çıkış akımı verme eğilimindedir (Cederlöf, 2012). Bu şartlar altında birincil ve ikincil taraflara bağlanacak olan kapasitörlerin kapasite hesapları ve basitleştirilmiş devre şeması Şekil 2.8'deki gibidir.

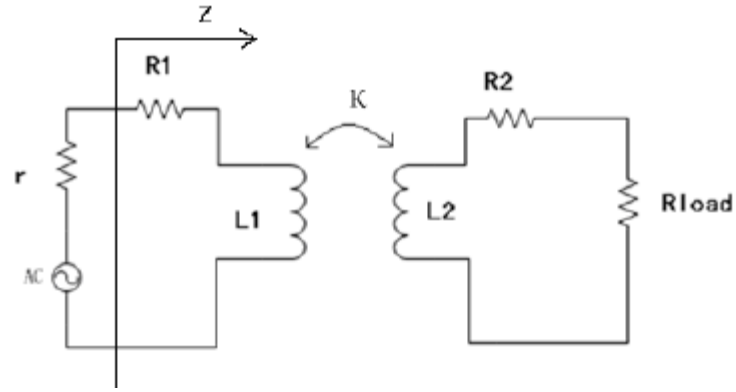


Şekil 2.8. Seri-seri topolojisi

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1} \quad (2.40)$$

$$C_2 = \frac{2}{\omega_0^2 L_2} \quad (2.41)$$

Seri-seri devre topolojisinde birincil taraftan bakıldığında devrenin toplam empedansının (Z), devre akımı hesabında bilinmesi gerekir. Z 'in hesaplanmasında Şekil 2.9'de görülen devre pratik olarak kullanılabilir. Bu devre için KET sisteminin rezonans durumunda devre analizi yöntemleri ile hesaplanan eşdeğer empedans Eşitlik 2.42'deki ifade ile hesaplanabilir.

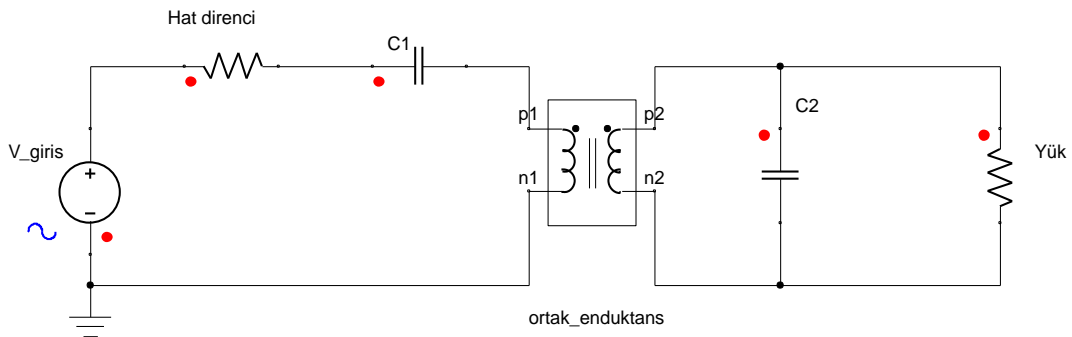


Şekil 2.9. KET Eşdeğer direnç devre modeli (Shen ve ark., 2010)

Rezonans durumunda;

$$Z = R_1 + \frac{K^2 \omega^2 L_1 L_2}{R_2 + R_{load}} \quad (2.42)$$

Seri-Paralel topoloji: Kaynağın bağlı bulunduğu birincil tarafta, rezonans kapasitörü bobine seri olarak bağlanırken, yükün bulunduğu ikincil tarafta rezonans kapasitörü bobine paralel olarak bağlanır. Seri-paralel topolojisinde verici taraf sabit bir gerilim kaynağı gibi davranma eğilimindedir (Cederlöf, 2012). Bu şartlar altında birincil ve ikincil taraflara bağlanacak olan kapasitörlerin kapasite hesapları ve basitleştirilmiş devre şeması Şekil 2.10'daki gibidir.

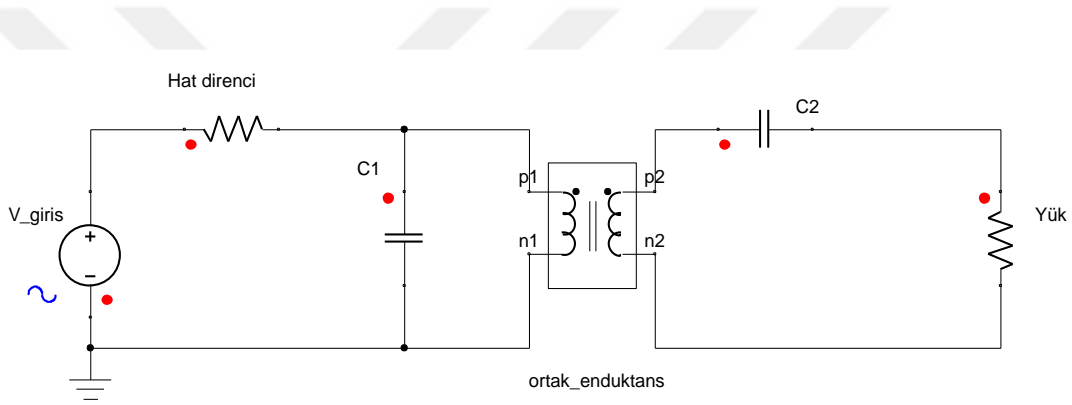


Şekil 2.10. Seri-paralel topoloji

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)} \quad (2.43)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \quad (2.44)$$

Paralel-Seri topoloji: Kaynağın bağlı bulunduğu birincil tarafta, rezonans kapasitörü bobine paralel olarak bağlanırken, yükün bulunduğu ikincil tarafta rezonans kapasitörü bobine seri olarak bağlanır. Paralel-seri topolojisinde de seri-paralelde olduğu gibi, verici taraf sabit bir gerilim kaynağı gibi davranma eğilimindedir (Cederlöf, 2012). Bu çalışmada da seri-paralel topolojisi kullanılmıştır. Bu şartlar altında birincil ve ikincil taraflara bağlanacak olan kapasitörlerin kapasite hesapları ve basitleştirilmiş devre şeması Şekil 2.11'deki gibidir.

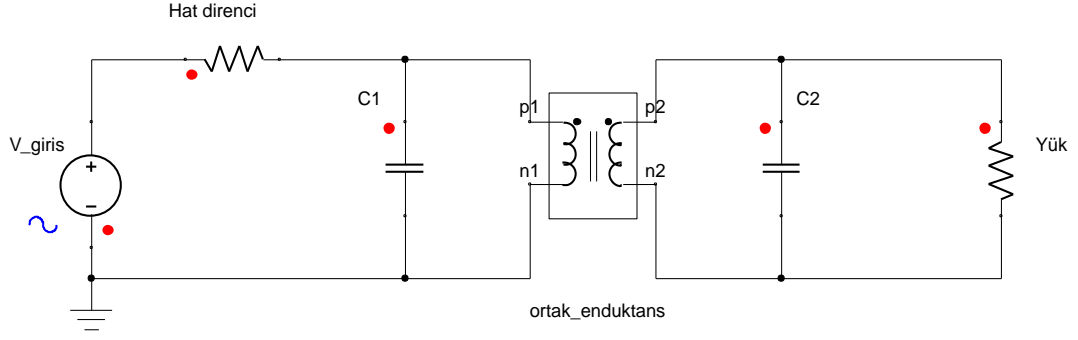


Şekil 2.11. Paralel-seri topolojisi

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \quad (2.45)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 \left(L_2 - \frac{M^2}{L_1} \right)} \quad (2.46)$$

Paralel-Paralel topoloji: Kaynağın bağlı bulunduğu birincil tarafta, rezonans kapasitörü bobine paralel olarak bağlanırken, yükün bulunduğu ikincil tarafta da rezonans kapasitörü de bobine paralel olarak bağlanır. Paralel-paralel topolojisinde de seri-seri'de olduğu gibi, verici taraf bir akım kaynağı gibi davranarak sabit bir çıkış akımı verme eğilimindedir (Cederlöf, 2012). Bu şartlar altında birincil ve ikincil taraflara bağlanacak olan kapasitörlerin kapasite hesapları ve basitleştirilmiş devre şeması Şekil 2.12'deki gibidir.



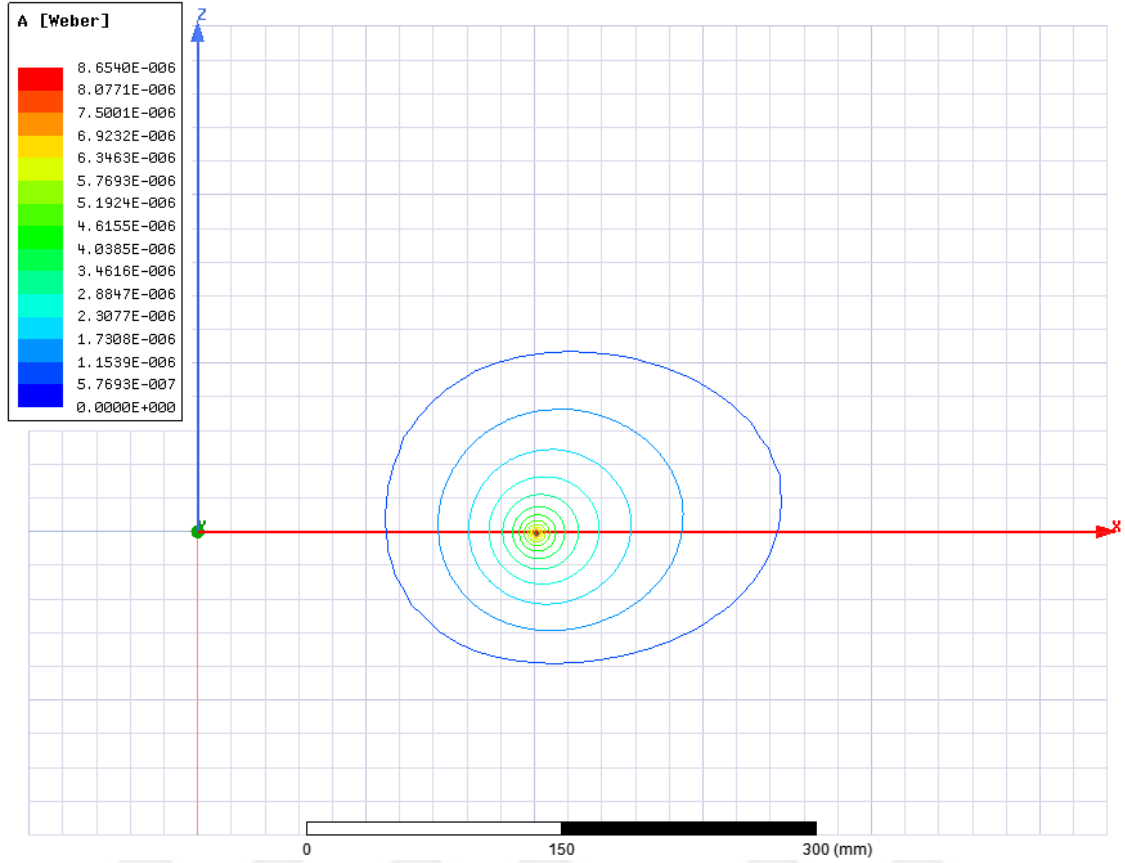
Şekil 2.12. Paralel-paralel topolojisi

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)} \quad (2.47)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 \left(L_2 - \frac{M^2}{L_1} \right)} \quad (2.48)$$

2.4. Manyetik Alan Yönlendirmesi

Bir bobin etrafında oluşan manyetik alan tıpkı akım taşıyan bir iletken olduğu gibi, bobinin her tarafında eşit olarak dağılacak şekildedir. Şekil 2.13’de akım taşıyan bir iletken etrafında oluşan manyetik akı dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Akım geçen iletkendeki manyetik akı çizgilerinin dağılımı

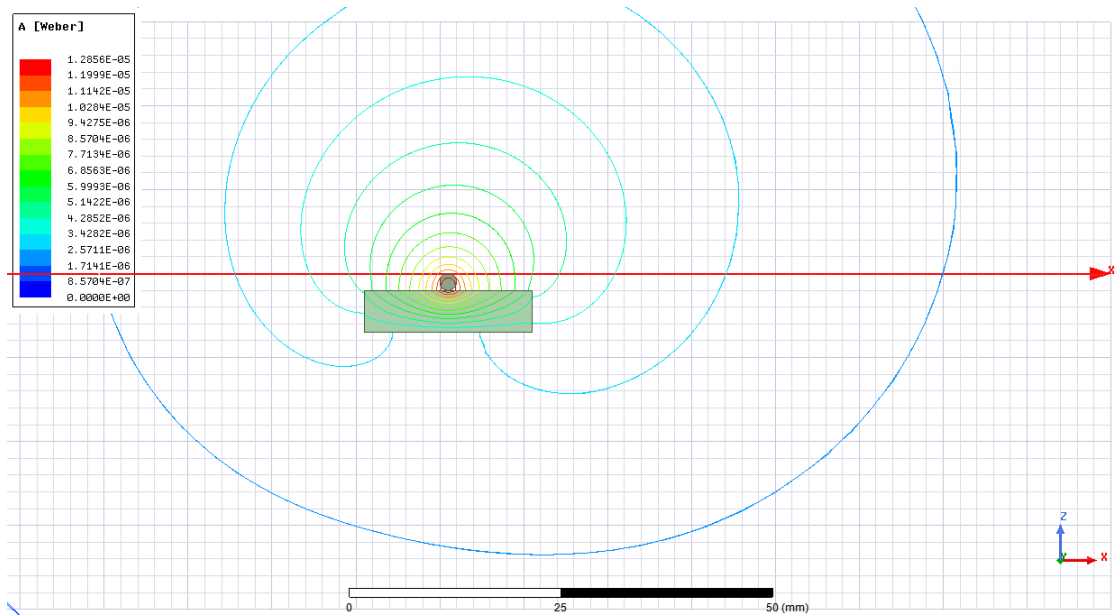
KET’de manyetik alanın mümkün olan en fazla miktarda birincil ve ikincil bobinler arasında dağılmasını, bu alan dışında bir alana kaçmamasını beklenir (Budhia ve ark., 2011). Manyetik alanın geçirgenliği μ_r , göreceli geçirgenlik ile belirlenir.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.49)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (2.50)$$

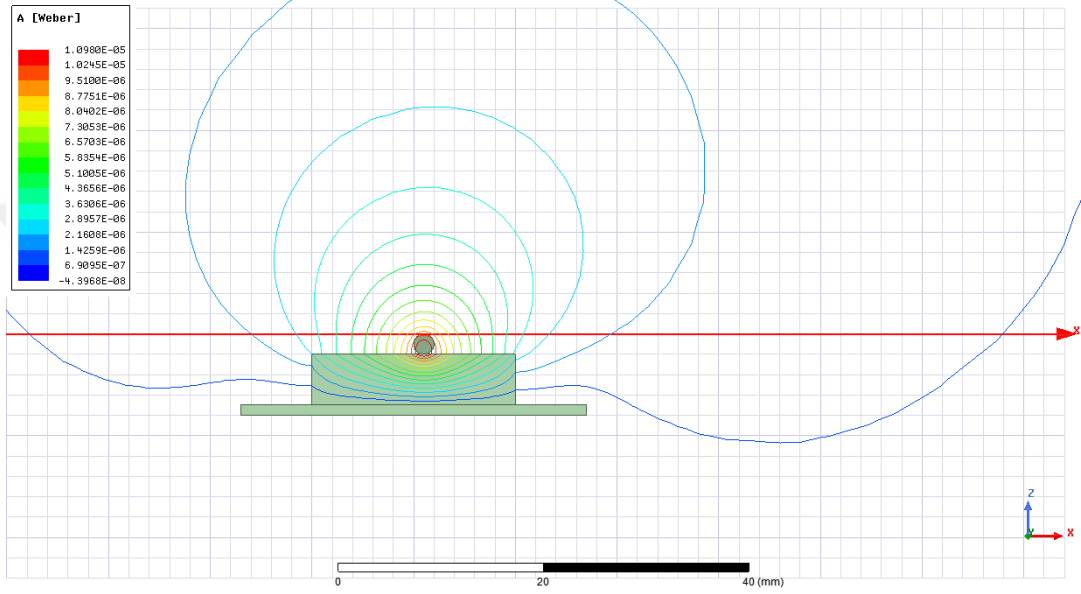
Manyetik malzemeler dimanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik malzemeler olarak üçe ayrılır. Bu malzemelerin sınıflandırılması bağlı manyetik geçirgenlikleri, dimanyetik malzemelerde birden biraz daha küçük, paramanyetik malzemelerde birden biraz daha büyük, ferromanyetik malzemelerde ise birden oldukça büyüktür. Örneğin transformatörlerde kullanılan çeliğin bağlı manyetik geçirgenliği 4000 civarındadır (Nave, 2013).

Bir manyetik alan bakır gibi bir paramanyetik malzeme ile karşılaştığında, göreceli geçirgenlik neredeyse bire eşittir ve alan bakırın üzerini çok az miktarda tercih eder ve bununla birlikte, bakır iletkenidir ve bakırda endüklenen endüksiyon akımları olacaktır. Bu girdap akımları kendi manyetik alanlarını, harici alanın ters yönünde bir alan yaratacaktır. Bu, malzemeye girmek yerine harici alanın bükülmesine ve itmeye neden olacaktır. Bir manyetik alan ferromanyetik bir malzeme ile karşılaştığında ise yüksek geçirgenlik, manyetik alanın boşluk yerine malzemeyi tercih etmesine neden olur ve bu sayede manyetik alan malzeme tarafından yakalanır. Bu etki Şekil 2.14’de açıkça görülmektedir. Örneğin demir bir ferromanyetik malzemedir fakat aynı zamanda iletkenidir. Demirin bağlı geçirgenliği girdap akımlarının itici etkisinden kurtulmak için yeterlidir fakat yakalanan manyetik alan çok olacağından ve iletkenlik özelliğinden dolayı girdap akımı kaybı çok olacak ve neticede demir ısınacaktır. Transformatörlerde kullanılan nüveler, girdap akımlarını azaltmak için ince, birbirinden izole edilmiş çelik tabakalardan oluşur, bu katmanlı çekirdek hem aşırı ısınmayı aynı zamanda da kaybı önemli ölçüde azaltır (Barranger, 1965). KET sistemlerinde ise yüksek frekanslı çalışmalar söz konusu olduğu için, iletkenliği daha düşük olan daha yüksek bağlı geçirgenliğe sahip, ferromanyetik bir malzeme olan ferrit nüveler tercih edilmektedir.



Şekil 2.14. Ferrit'in manyetik akı üzerindeki etkisi

Buna rağmen oluşacak olan kaçak akıları toplayarak faydalı akı yoluna dahil etmek amacıyla, ferrit nüvenin bitişiğine iletkenliği ferrite göre daha yüksek olan bir materyal olan alüminyum ile desteklemek verimliliği artıracaktır (Ogawa ve ark., 2012; Choi ve ark., 2014). Alüminyumun manyetik akı üzerindeki etkisi Şekil 2.15’de görüldüğü gibidir.

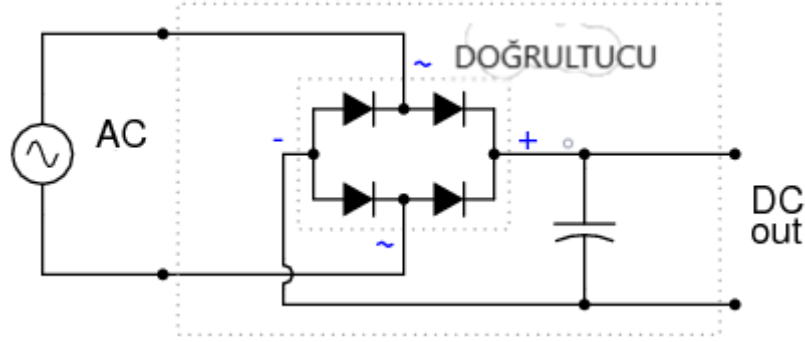


Şekil 2.15. Alüminyum manyetik akı üzerindeki etkisi

2.5 Frekans Çeviriciler ve Doğrultucular

KET sistemlerinde birincil bobin beslemesinde, şebeke frekansı olan 50 Hz değerine göre yüksek frekanslarda çalışmanın gerekliliğinden daha önce bahsetmiştik. Bu frekans değerinin elde edilmesi için motor sürücüler gibi endüstride sıklıkla kullanılan ve birtakım elektronik tasarımları gerektiren aşamalar bulunmaktadır. Bu aşamalar sonucunda istenilen frekansta ve formda bir elektrik sinyali elde edilebilmektedir. Öncelikle şebekeden sağlanan AC sinyal doğrultmalıdır. Bu doğrultma köprü olarak bilinen ve diyotlardan oluşan devre sayesinde yapılabilir. Köprü doğrultucu çıkışında dalgalı bir sinyal elde edilmektedir. Bu sinyalin mümkün olan en iyi doğrultulmuş sinyale dönüşebilmesi için köprüye paralel olarak bir kondansatör bağlanır. Bu kondansatör şebekeden sağlanan alternatif akımın pozitif alternansı ile doğrultulmuş negatif alternansı arasında geçen sürede meydana gelen gerilim düşümünden kaynaklı dalgalılığı kompanze

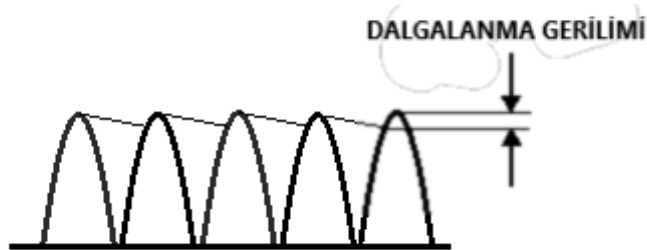
ederek depoladığı enerjiyi gerilim düşümü anlarında çıkışa sağlar ve bu sayede DC sinyal elde edilir (Mohan ve ark., 1989). Bu işlem her periyotta aynı şekilde tekrar eder. AC-DC doğrultucu için kullanılan bir köprü devresi Şekil 2.16’da gösterildiği gibidir.



Şekil 2.16. Köprü devre diyagramı

Devre çıkışında bağlanacak olan bu kondansatörün değeri çıkışta tolere edilebilecek gerilim düşümüne göre belirlenir. Bu kondansatörün kapasite hesabı ve Şekil 2.17’deki gibi gösterilen çıkış sinyali üzerindeki etkisi aşağıdaki gibidir.

$$V_{rip} = \frac{I_{yük}}{2fC} \quad (2.51)$$

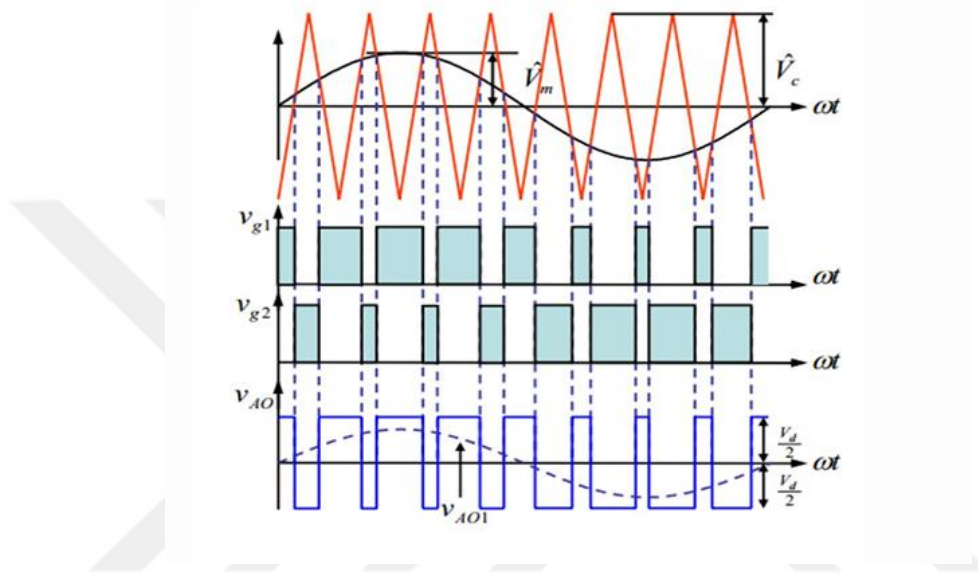


Şekil 2.17. Doğrultucu yumuşatılmış sinyal

Elde edilen DC sinyal verici bobine bu haliyle uygulanırsa ikincil tarafta herhangi bir etkisi, yani gerilim endüklenmesi olmayacaktır. Dolayısı ile bu sinyalin istenilen frekanstaki AC sinyale dönüştürülmesi için inverter (evirici) kullanılmalıdır.

Bir eviricinin çalışma prensibi temelde doğru akım kaynağından alınan sinyalin, belli zaman ve sürelerde, farklı kutuplamalarla açılıp kapatılmasıyla AC sinyal üretilmesidir.

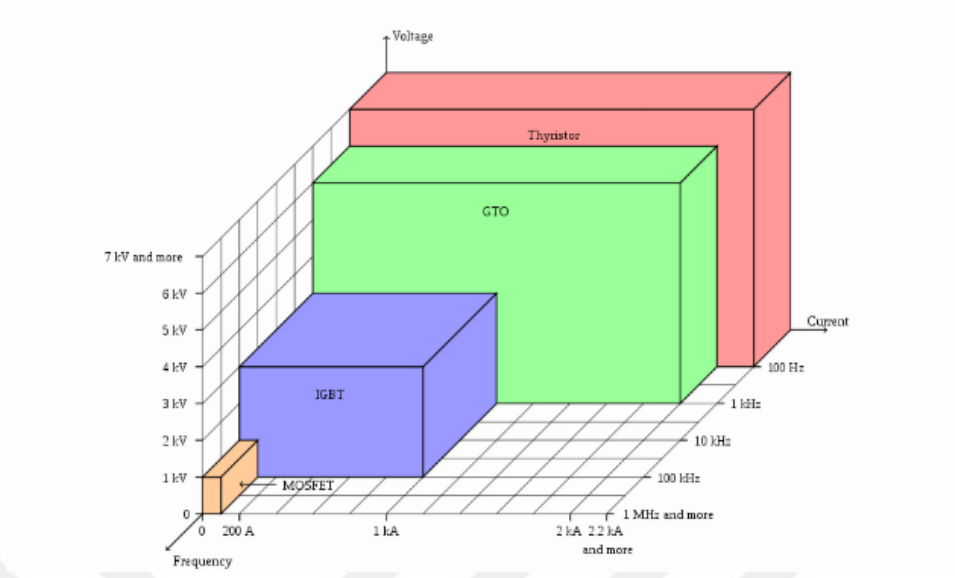
Genellikle tam kontrollü elemanlar ile kontrol edilirler. Giriş sinyalindeki dalgalanmalar ve çıkış sinyalindeki harmonikler engellendiği ölçüde temiz bir sinyal elde edilebilmektedir. DC kaynak pozitif ve negatif anahtarlanarak kare dalga üretilir ve ardından PWM (pulse width modulation) ve filtreleme yöntemleri ile sinüs sinyali elde edilir. Şekil 2.18’de taşıyıcı sinyal, kapı sinyalleri ve çıkış sinyali gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Anahtarlama sinyali ve PWM tek fazlı invertör çıkış dalga formu (Mohan ve ark., 1989)

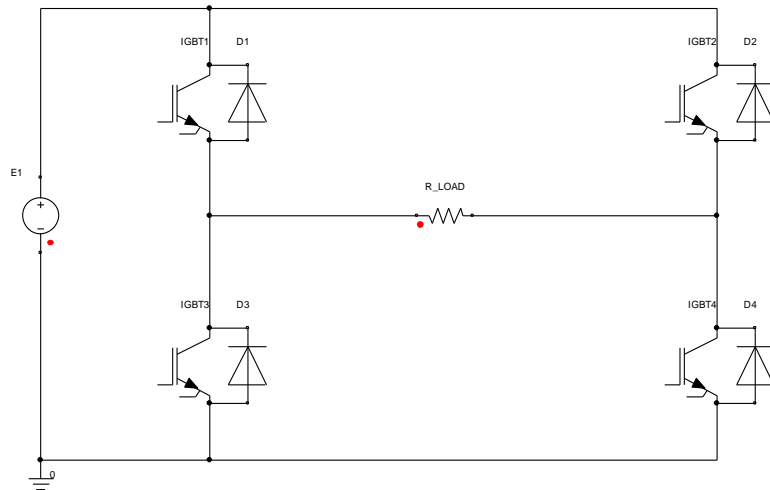
Üretilen pozitif ve negatif sinyaller ilgili pozitif ve negatif elemanlara uygulanır. Belirlenen frekansa göre üretilen kare dalga daha yüksek frekanstaki bir taşıyıcı gerilim ile karşılaştırılarak AC sinyal elde edilir. Bu taşıyıcı sinyal üçgen dalga formuna sahiptir. Bu yöntem AC darbe genişlik modülasyonu (DGM, PWM) adı verilmektedir. Eviriciler pwm metodu ile DC gerilimi belirli, birbirinden farklı sürelerde açık tutarak çıkışta bir sinüs sinyali üretir. Bu bahsedilen açık kalma süresi görev süresi (duty cycle) olarak isimlendirilir (Mohan ve ark., 1989; Imbertson ve Mohan, 1993).

Evirici devrelerinde birbirinden farklı birçok anahtarlama elemanı kullanılabilir. Şekil 2.19’da görüldüğü gibi bu anahtarlama elemanlarının seçiminde çalışma frekansı ve güç seviyesi belirleyici faktördür. Yaklaşık olarak 10 kW altındaki güçlerde genellikle MOSFET kullanılırken daha büyük güçlerde IGBT tercih edilmektedir (Mohan ve ark., 1989). Bu tez çalışmasında anahtarlama elemanı olarak IGBT seçilmiştir.



Şekil 2.19. Güç elektroniği yarı iletkenlerin yetenekleri (Mohan ve ark., 1989)

Şekil 2.20’de görülen devrede bir evirici devresi görülmektedir. Bu devreye göre Q1 ve Q4 anahtarlama elemanı iletimdeyken Q2 ve Q3 anahtarlama elemanı kapalı konumdadır. AC sinyalin pozitif alternans kısmı oluşurken bu konumlandırılmalar gerçekleşirken, negatif alternans kısmında ise bunun tam tersi işlem yüke uygulanarak AC sinyal elde edilir. Diyotlar ise geçişler sırasında oluşan potansiyel gerilimi sınırlandırmak için endüktif akıma gereken yolu sağlarlar.

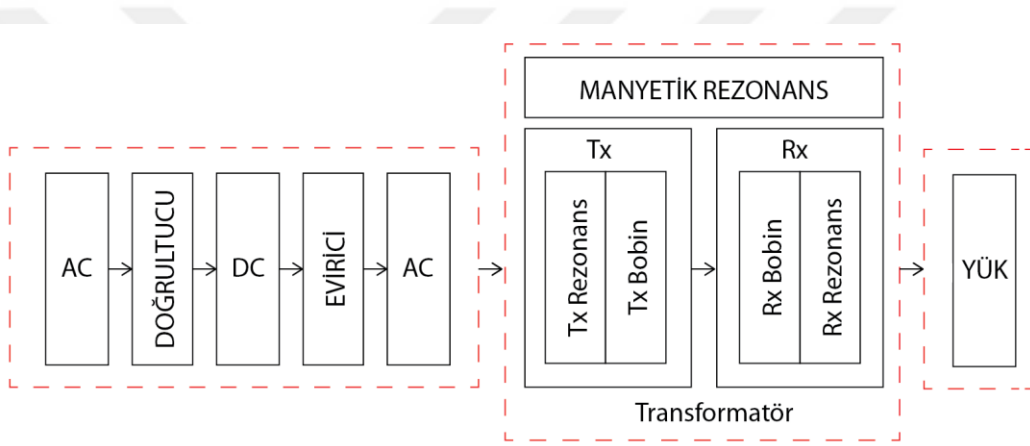


Şekil 2.20. IGBT Köprü devresi

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında manyetik kuplaj yöntemi kullanılarak endüktif güç transferi yapan bir sistemin tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan bileşenler, analiz edilmiş ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi bu çalışma 3 ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

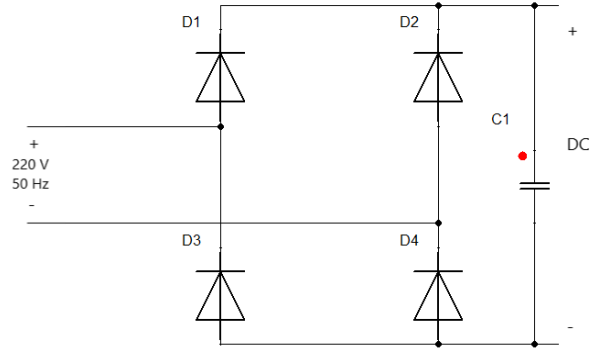
1. Besleme
2. KET Trafo Tasarımı
3. Yük



Şekil 3.1. KET Sistemi blok diyagramı

3.1. Besleme

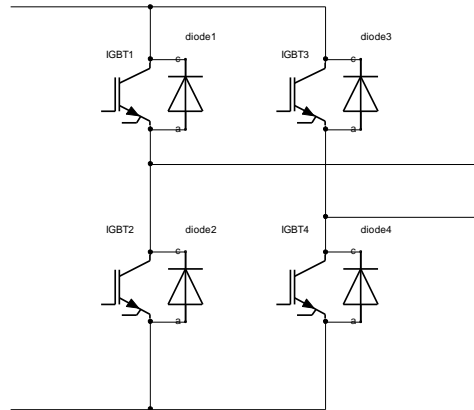
Ülkemizde bulunan bir fazlı şebeke besleme gerilimi 220V geriliminde ve 50Hz frekansındadır. Tasarlanan KET sisteminde birincil bobin beslemesi 10 kHz’lik sinüzoidal bir AC kaynaktan yapılmaktadır. Bu yüksek frekanslı gerilimin elde edilmesinde, 4 adet diyot ile oluşturulmuş bir köprü devresi yoluyla öncelikle AC sinüs sinyali doğrultulmuştur. Doğrultucu devrede kullanılan diyotlar 20 A, 400 V nominal değerlere sahiptir. Doğrultucu devre Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. KET Doğrultucu devre diyagramı

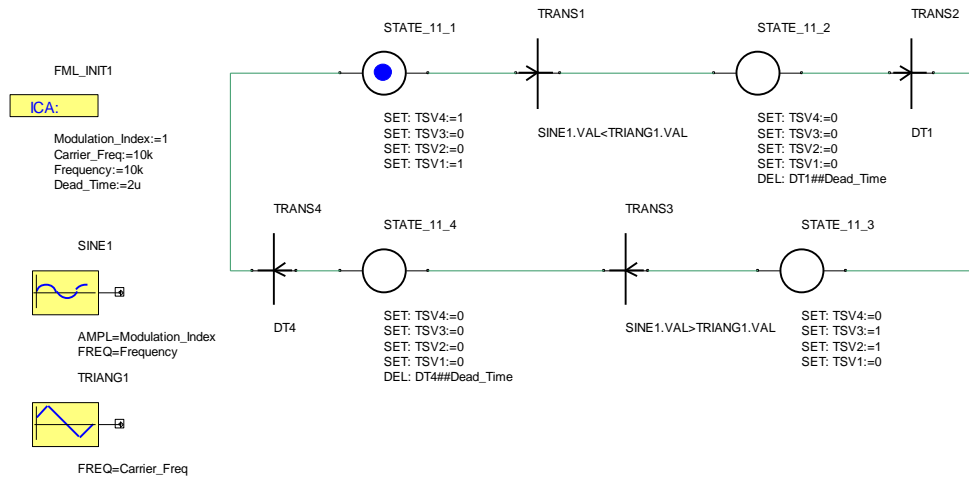
Köprü çıkışına, daha düzgün bir doğrultulmuş sinyal elde edebilmek amacıyla bağlanan kondansatörün değeri bölüm 2’de belirtilen Eşitlik 2.51 nolu denkleme göre hesaplanmıştır. Bu denklemden parametrelerden I_{max} değeri, nominal giriş geriliminin eşdeğer direncine bölünmesiyle elde edilmiştir.

Elde edilen DC sinyalden istenilen frekanstaki AC sinyali elde etmek için kullanılan evirici devresi ise Şekil 3.3’deki gibidir. Bu devrede istenilen frekanstaki pozitif alternans oluşurken IGBT1 ve IGBT4 kapalı yani iletim durumundayken, negatif alternansta IGBT2 ve IGBT3 kapalı konumdadır. Ayrıca KET sistemlerinde endüktif çalışma olduğu için MOSFET’lerin açık olması gereken süreler söz konusudur. Bu sürelerde akım ters yönde akmıştır. IGBT’lere paralel ve ters yönde bağlanmış olan diyotlar bu ters yöndeki akımlara gereken sürelerde uygun yolu sağlamaktadır.



Şekil 3.3. KET Evirici devre modeli

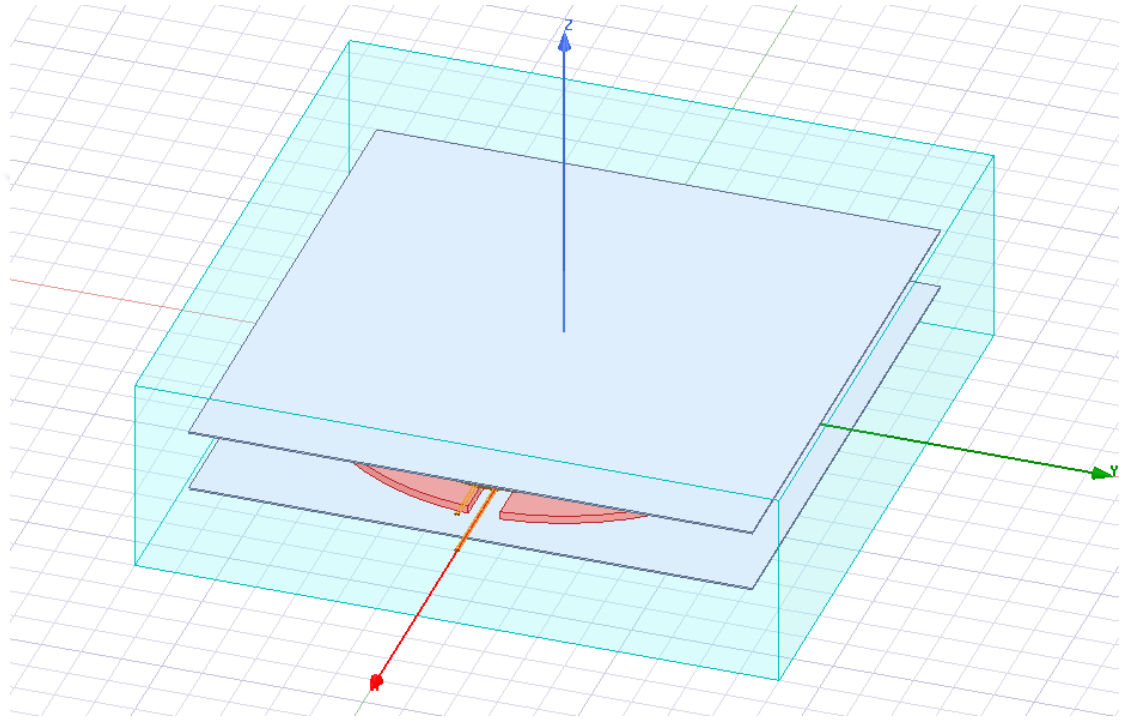
Şekil 3.4 'te ise, Şekil 3.3'te görülen IGBT'lere anahatarlama sinyalinin gönderildiği, gate uçlarının kontrol sinyalinin durum diyagramı verilmiştir. Bu diyagram ANSYS Simplorer programında oluşturulmuştur. Evirici devresinde her IGBT için kapı sinyaline uygun isimlendirme yapılmıştır. Şekil 3.4'te kontrol şeması görülen IGBT'ler için sırasıyla kapı sinyali isimleri TSV1, TSV2, TSV3 ve TSV4 olarak ayarlanmıştır. Herbir periyottaki 4 durum ise sırası ile STATE_11_1, STATE_11_2, state_11_3 ve STATE_11_4 olarak isimlendirilmiştir. Bu durumlar arasındaki geçişler ise sırası ile TRANS1, TRANS2, TRANS3 ve TRANS4 olarak isimlendirilmiştir. Bu geçişlerin sağlanabilmesi için gereken koşul tanımları ise sırasıyla birinci durumdan ikinci duruma ve üçüncü durumdan dördüncü duruma geçerken, daha önce tanımlanmış olan üçgen formundaki taşıyıcı sinyal ile karşılaştırılırken, ikinci durumdan üçüncü duruma ve dördüncü durumdan tekrar başa dönme şartı olan birinci duruma geçişlerde, daha önceden ölü zaman olarak tanımlanmış sürenin geçiş durumunun karşılaştırmasına göre belirlenmiştir. İnverter çalışma frekansı bu aşamada belirlenmektedir ve yapılan bu çalışmada frekans 10 kHz olarak belirlenmiştir. Ölü zaman ise 100 µs lik periyot süresi göz önünde bulundurularak 2µs olarak belirlenmiştir. AC sinyali nominal değerinin, taşıyıcı sinyal nominal değerine bölünmesiyle elde edilen modülasyon indeksi (Aboadla ve ark., 2016), harmonikler üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak 1 olarak belirlenmiştir. Tasarlanan evirici devresinde, 40A değerine kadar 8-60 kHz frekans aralığında yumuşak anahatarlama yapabilen IGBT özellikleri kullanılmıştır.



Şekil 3.4. KET Evirici kapı sinyalleri durum diyagramı

3.2. KET Trafo Tasarımı

KET sitemlerindeki en önemli bölümü, trafo tasarımı bölümüdür. Bu tezde tasarlanan KET trafo yapısı birincil ve ikincil bobinler, manyetik nüve ve kaçak akı sınırlandırılması amacıyla kullanılan levhalardan oluşmaktadır. KET'in gerçekleştirildiği trafo tasarımı ANSYS Maxwell ile yapılmıştır. Gerçekleştirilen tasarım Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. KET Trafo

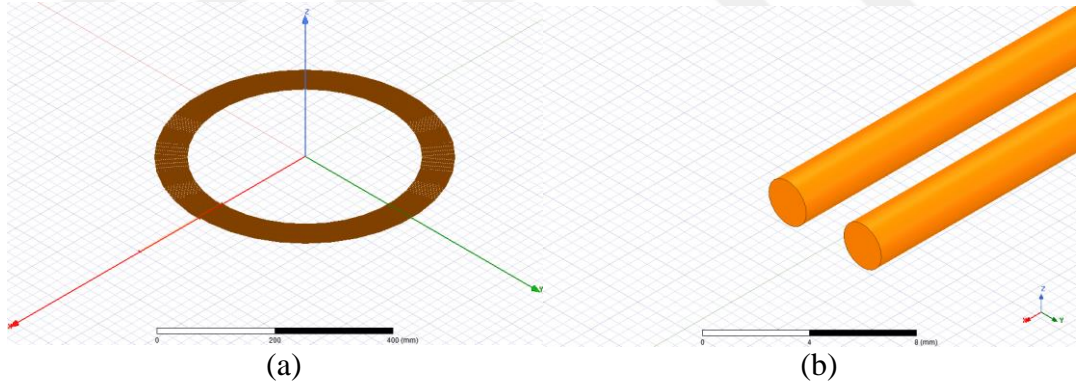
Burada rezonans kuplajı ile enerji transferi yapıldığından, bütün tasarım bu temel üzerinden şekillendirilmiştir. Bu açıdan bir frekans değeri belirlenmiş ve buna uygun nüve malzeme özellikleri belirlenerek işlem yapılmıştır. Daha önce Eşitlik 2.39'da verilen eşitliğe göre rezonans frekansı 10kHz'dir. Rezonans frekansında asıl belirleyici faktör bobinlerin endüktans değeridir. Seçilen bu frekansa göre devrenin rezonans durumu dikkate alınarak uygun kapasitör seçimi yapılmıştır. Bu kapasitör seçimi seri-seri topolojisine göre Eşitlik 2.40 ve Eşitlik 2.41'e bağlı olarak hesaplanmıştır.

3.2.1. Bobin Tasarımı

Genel olarak bütün transformatör yapılarında en önemli kısım birincil ve ikincil bobinlerin tasarımıdır. Bu tasarımlarda transformatörün tipine göre spir sayısı, bobin şekli, bobin damar sayısı vs. bobin özellikleri hassas bir şekilde belirlenmelidir.

KET sistemlerinde çoğunlukla yüksek frekanslı enerji aktarımı söz konusu olduğu için bu çalışmada tasarlanan bobinler, litz kablo özelliğindedir. Burada bobin tasarımı bakır litz kablo parametreleri baz alınarak yapılmıştır. Litz kablolarda damar sayısı ve o damarların kalınlığı iletken çapını belirlemektedir. Ayrıca litz kablolar kablo kesitinin içerisinde birden fazla kablo demeti de barındırabilmektedir.

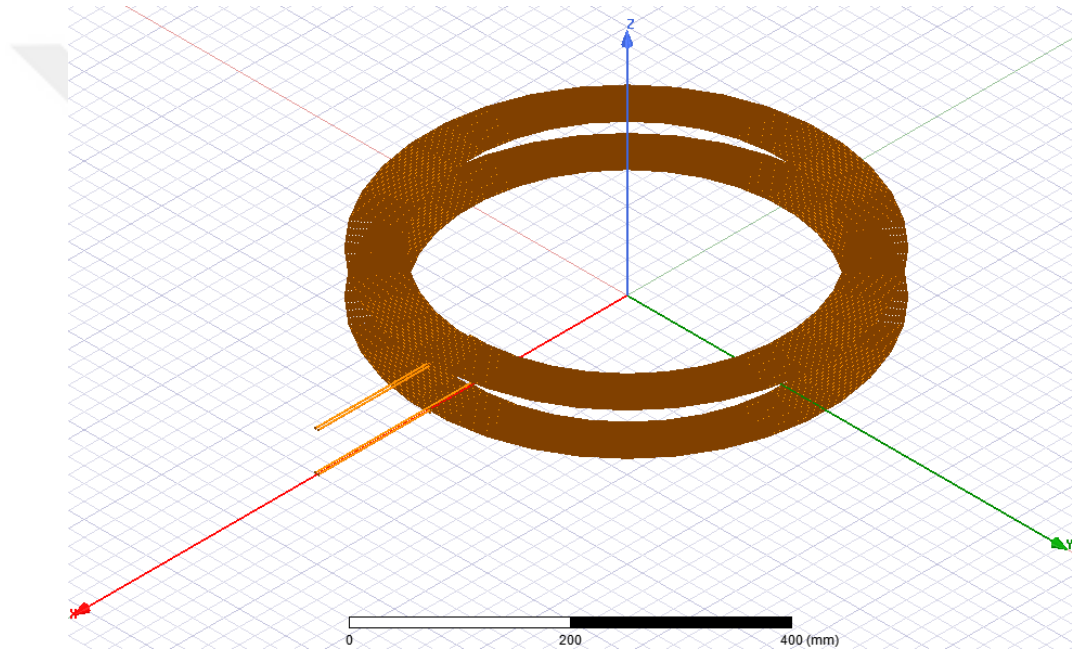
Bu çalışmada tek demet, 2 mm çapındaki bir iletken içerisinde 0.08 çapında emaye izoleli 384 iletken geçirilmektedir. ANSYS Maxwell'de gerçekleştirilen tasarım Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.6. Bobin Tasarımı

ANSYS Maxwell'in üç manyetik analiz metodundan birisi olan "Eddy Akımı" analizi tercih edilerek Eddy etkileri bir bütün olarak veya her uygun geometri için ayrı ayrı etkisizleştirilebilmektedir. Buna bağlı olarak yapılan çalışmada bu analiz uygulanmıştır. Bu sayede amacı Eddy etkisini önlemek olan litz kablo modellemesi için çok daha karmaşık ve analizi uzun sürecek bir tasarım yerine daha pratik bir tasarım uygulanabilmektedir.

Yapılan çalışmada birincil ve ikincil taraf bobinleri birbirine özdeşdir. Her bir bobin 19 sarımdan oluşmaktadır. Bobin iç çapı 400 mm'dir. Her bir sarımda yarıçaptaki değişim 3 mm'dir. İletken şekli (uçlar hariç) analiz süresini makul seviyeye indirmek amacıyla altıgen olarak belirlenmiştir. Birincil ve ikincil bobinler arası mesafe 50 mm olarak belirlenmiştir. Bir bobin için toplam bobin uzunluğu yaklaşık olarak 27.57 m'dir. Bobinin çevrelediği alan yaklaşık olarak 0.204 m²'dir. Birincil ve ikincil bobinlerin görünüşleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Ayrıca bobin parametrelerini gösteren Çizelge 3.1 aşağıdaki gibidir.



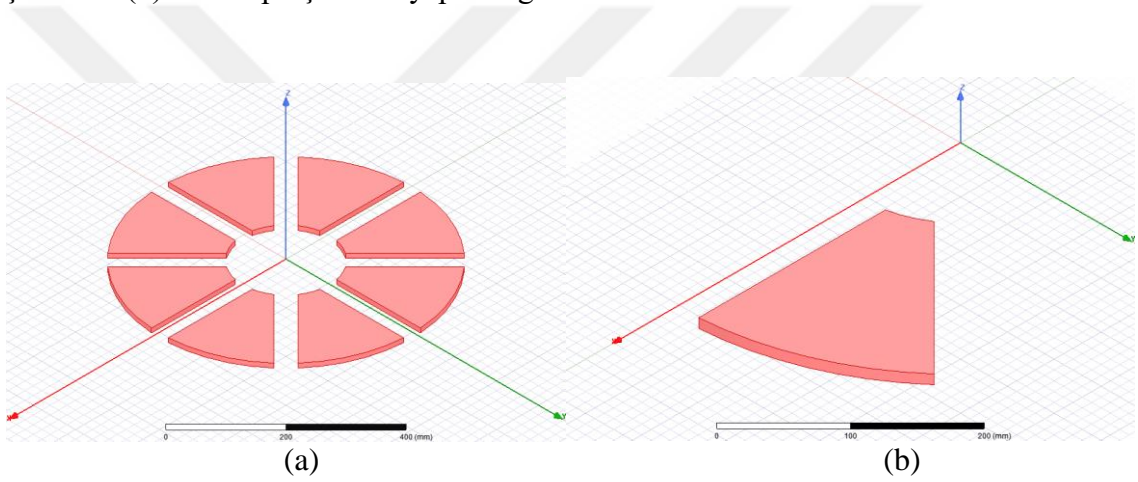
Şekil 3.7. Birincil ve ikincil bobinler

Çizelge 3.1. Bobin özellikleri

Özellik	Değer
Bobin Dış çapı	262 mm
Bobin İç çapı	200 mm
Spir sayısı	19
Paralel tel sayısı	384
Tel çapı	2 mm
Endüktans	603.91 μ H
Bobin Direnci	228 m Ω

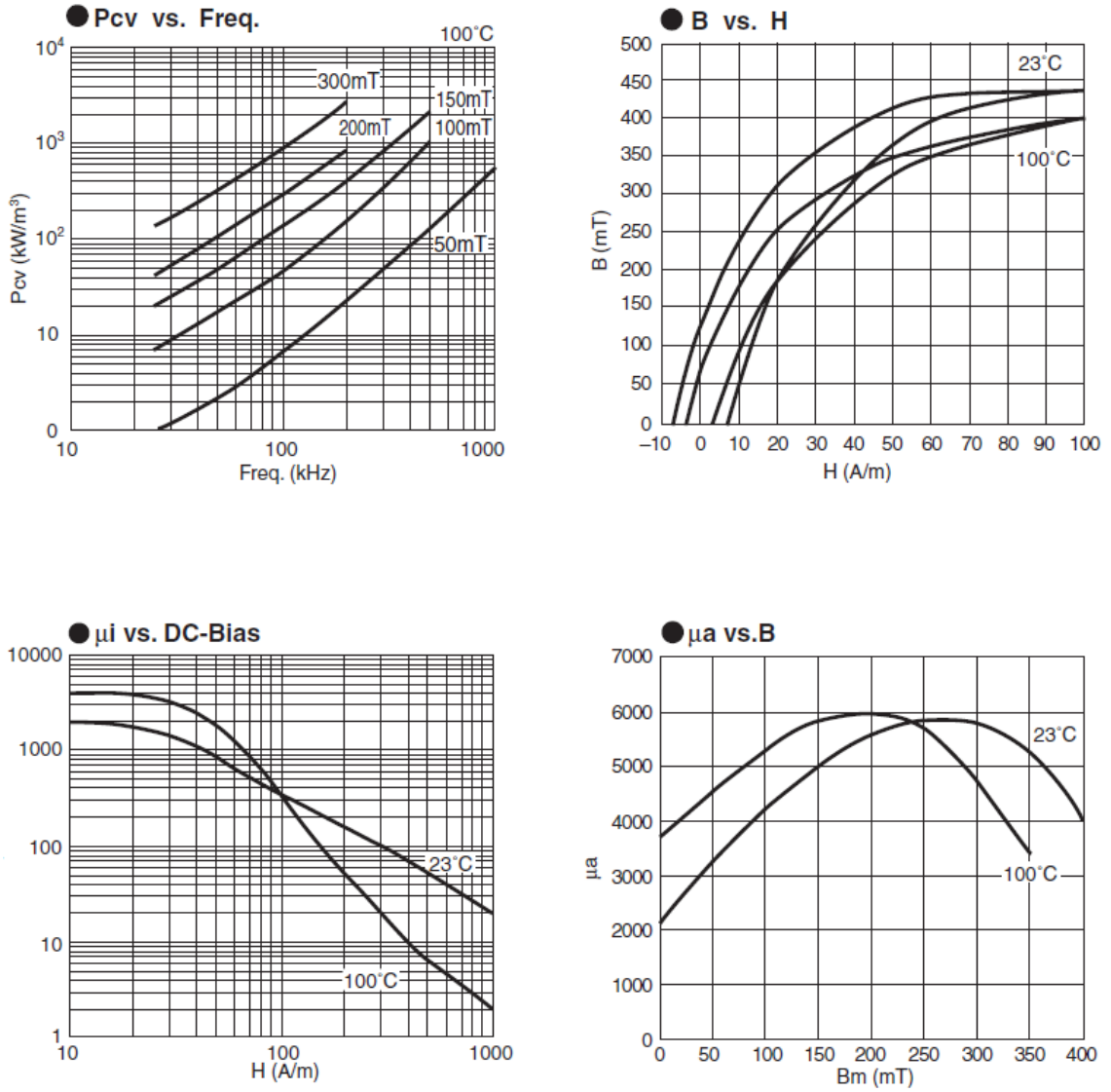
3.2.2. Nüve Tasarımı

Bu çalışmada tamamen özgün bir nüve tasarımı yapılmıştır. Farklı çalışmalarda parçalı nüve yapıları kullanılmasına rağmen(Li ve Mi, 2017; Onar ve ark., 2013), Şekil 3.8'deki gibi parçalı nüve yapısı literatürde ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Yapılan çalışmada manyetik alan yönlendirmesini doğru şekilde yaparak, manyetik akı yolunun mümkün oldukça birincil ve ikincil bobinler arasında kalmasını sağlamak amacıyla, manyetik geçirgenliği havaya göre oldukça yüksek olan ferrit nüve kullanılmıştır. Tasarlanan nüve Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Bu şekilde Şekil 3.8.(a) tam nüve yapısını, Şekil 3.8.(b) ise tek parça nüve yapısını göstermektedir.



Şekil 3.8. Nüve tasarımı .(a) tam nüve yapısı (b) Tek parça nüve yapısı

Bu nüve 10 mm kalınlığındadır. Dış yarıçapı 300 mm, iç yarıçapı 101 mm özelliğindedir. KET sistemlerinde nüveli tasarımlarda kullanılan bir malzeme çeşidi olduğu için, FDK6H40 kodlu ferrit malzeme seçilmiştir. Seçilen bu malzeme 6H serisi, düşük çekirdek kaybı ve yüksek doygunluk akı yoğunluğuna sahip FDK'nın standart güç malzemesidir ve güç kaynağını değiştirmek için çok çeşitli transformatörler ve şok bobinleri için uygundur. Daha düşük çekirdek kaybı ve daha yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip malzemelerden 6H40 daha önceki 6H20'ye göre yaklaşık %25 daha düşük çekirdek kaybına sahiptir. Kullanılan malzemenin grafikleri Şekil 3.9'da gösterilen BH eğrisi ANSYS Maxwell üzerinden tanımlanarak analize dâhil edilmiştir.

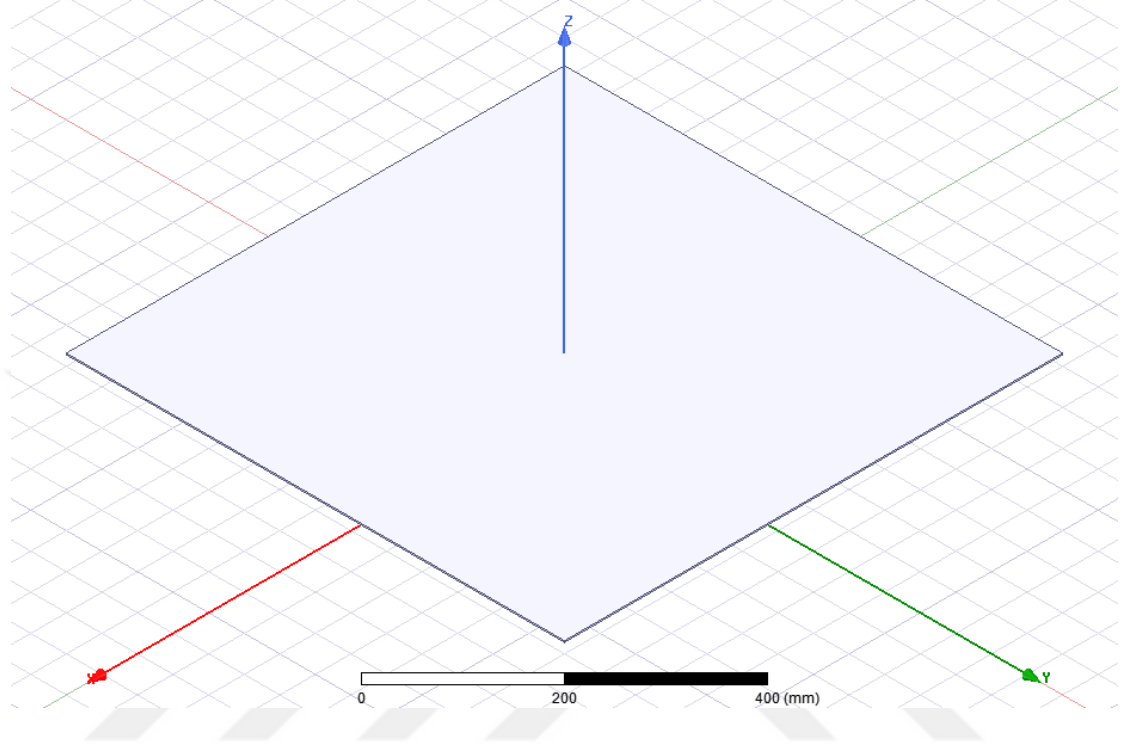


Şekil 3.9. Ferrit Özellikleri

3.2.3. Manyetik Alanın Yönlendirilmesi

KET trafo tasarımında manyetik akı yolunun mümkün olduğunca birincil ve ikincil bobinler arasında yönlendirmek, kaçak akıyı minimuma indirerek, kayıpları azaltmak ve verimi yükseltmek amacıyla, her bir bobin için bir Alüminyum levha kullanılmıştır. Bu levhalarda kullanılan Alüminyumun, bağıl permitivitesi 1, bağıl permabilitesi 1,000021 bulk kondaktivitesi 38000000 siemens/m değerindedir. Bu levhalardan, kaynağın bağlı olduğu tarafta olanı bobinin alt tarafına gelecek şekilde, ikincil taraf için olanı bobinin

üst tarafına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. 2 mm kalınlığında ve 350 mm² yüzey alanına sahip bu Alüminyum levhaların görünümü Şekil 3.10’da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.10. Alüminyum levha tasarımı

3.3. Yük

Girişten alınan enerji KET trafosu ile ikincil tarafa aktarıldığında yüksek frekansta AC sinyal formundadır. Bu çalışmada iki farklı yük durumu incelenmiştir. Bunlardan biri omik yük ve diğeri ise batarya şarjı için tasarlanmış yüküdür.

Omik yük değeri Maxwell optimizasyon yöntemlerinden biri olan Genetik Algoritma kullanılarak 26.5 Ω olarak hesaplanmıştır. Batarya şarjı için ikinci taraf AC sinyalin faydalı yük olarak belirlenen bataryaya aktarılabilmesi amacıyla DC sinyale dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla daha önce şebeke sinyalini yüksek frekansa dönüştürmek için kullanılan ve Şekil 3.2’de gösterilen doğrultucu devresi burada da kullanılmıştır. Burada birincil tarafta kullanılan doğrultucu devreden farklı olarak, köprüyü oluşturan diyotlar schottky diyot olarak bilinen ve RF sistemlerinde doğrultma amacıyla da yaygın olarak kullanılan diyotlardan seçilerek özellikleri simülasyonda

kullanılmıştır. Yine birincil tarafta olduğu gibi filtre kapasitör burada da kullanılmıştır. Şekil 3.11’de özellikleri verilen bataryaya, devredeki yükün parametrelerini göstermektedir.

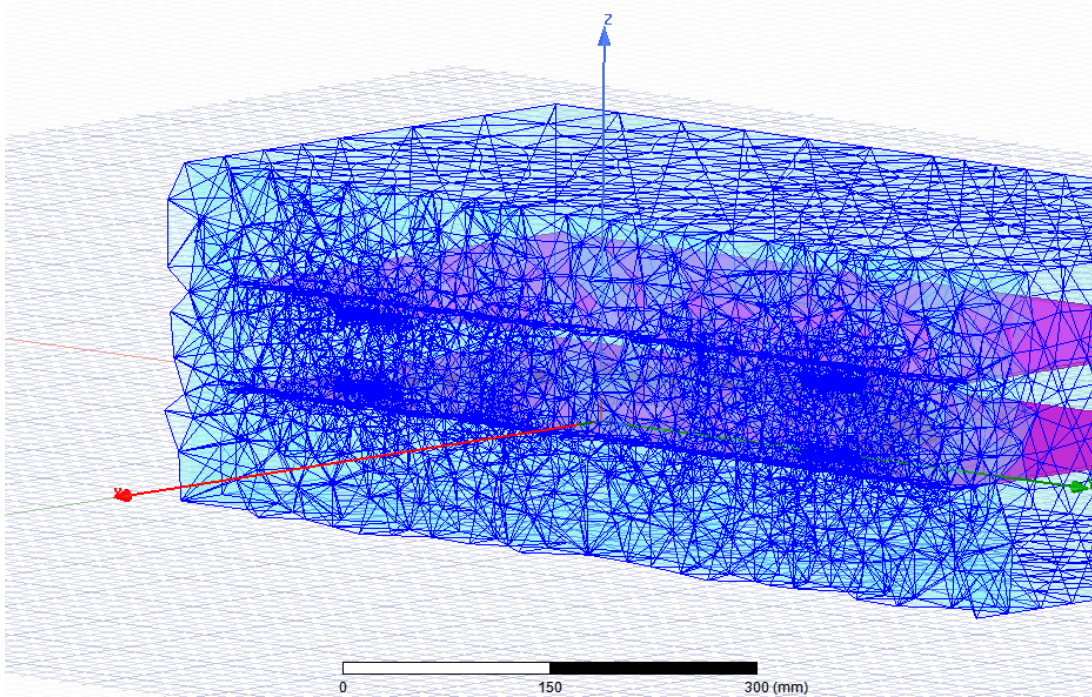
Name	Value	Units	Description
ad0	1.27	g_per_cm3	Initial acid density
temperature	25	cel	Battery temperature
cap	100	Ahour	Rated capacity
r_curr	5	A	Rated discharge current
r_time	20	hour	Rated discharge time
nom_res	0.01	ohm	Internal resistance at full charge and nominal temperature
num_cells	6		Number of cells
ad_full	1.28	g_per_cm3	Acid density at full charge
ad_disc	1.01	g_per_cm3	Acid density at complete discharge
nom_temp	25	cel	Nominal temperature
f_low_cap	0.6		Fraction of capacity at low temperature
f_hi_cap	1.02		Gain limit of capacity at high temperature
low_temp	-20	cel	Low temperature
f_plate_cap	0.3		Fraction of capacity near plate
f_slow_cap	1.03		Capacity gain at low current limit
sdpd	0.25	percent_per_day	Self discharge rate per day
sd_t	16.37	cel	Temperature dependency of self discharge
flt_curr	0.002	A_per_Ahour	Float current
flt_volt	2.3	V	Cell voltage where float current is reached
gass_th	2.39	V	Gassing threshold voltage at 25°C
gass_sl	0.2	V	Scaling of gassing current with terminal voltage
t_coeff_ocv	0.00015	V_per_Cel	Temperature coefficient of OCV
t_coeff_res	0.0075	per_Cel	Temperature coefficient of full charge internal resistance
soc_coeff_res	0.5		Coefficient for internal resistance variation with SOC

Şekil 3.11. Bataryaya yükü parametreleri

3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi

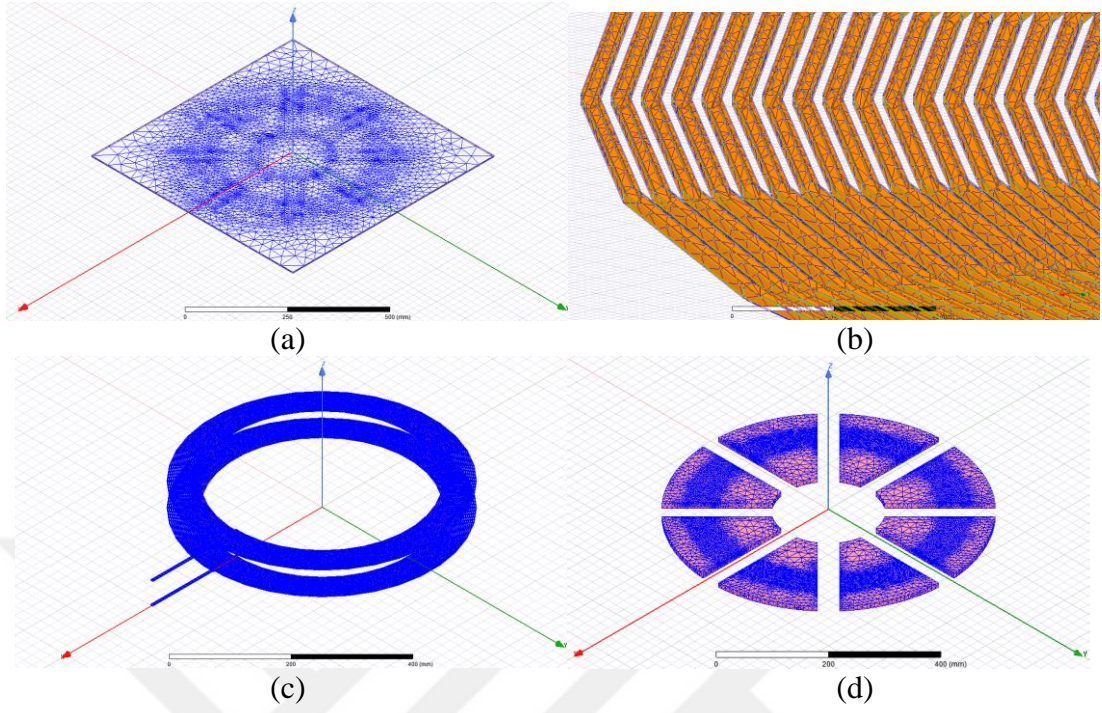
Yapılan çalışmada manyetik analizler için ANSYS Maxwell yazılımı kullanılmıştır. ANSYS Maxwell programı oluşturulan geometrilere tayin edilen materyallere göre belirlenen şartlar altında tasarımı sonlu elemanlar yöntemine göre analiz etmektedir. ANSYS Maxwell kısmında KET sisteminin transformator kısmı analiz edilmiş ve bu analizlerden endüktans, ortak endüktans ve bağlantı faktörü değerleri ve kayıplar bu sayede elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların devre simülasyonu ise yine ANSYS’in Simplorer yazılımı ile yapılmıştır.

KET sisteminde en önemli nokta transformatör tasarımıdır. Bu amaçla ANSYS Maxwell kısmında üç boyutlu bir transformatör tasarımı ortaya konmuştur. Bu tasarımın manyetik analizlerden “Eddy Akımı” analizine tabi tutulmuştur. Eddy akımı analizinden endüktans, ortak endüktans, bağlantı faktörü değerlerinin yanı sıra her bobinin direnç değeri, nüve ve sargı kayıpları elde edilmiştir. Bu parametrelerin hesaplanması için gerekli malzeme tanımlamaları yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin doğru sonuçlar üretebilmesi için gerekli sınırlandırmalar da bu aşamada belirlenmiştir. Ayrıca endüktans, bağlantı faktörü gibi sargı parametrelerini hesaplamak için bir endüktans matrisi tanımlanmış ve uyarım akımları belirlenmiştir. Eddy analizi ile elde edilmiş KET transformatörün, dört yüzlü tetrahedron ağ kurgusunun kesit görünümü Şekil 3.12’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.12. KET SEY ağ kurgusu

Eddy analizi için tasarımda yer alan materyal özellikleri tanımlanmış tasarımların mesh atamaları Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



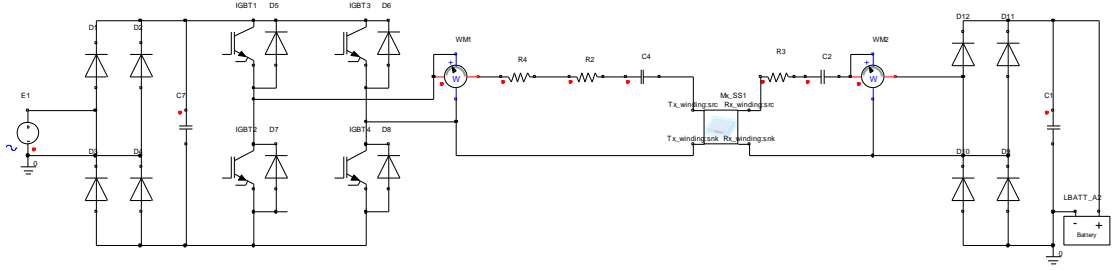
Şekil 3.13. KET parçaları ağ kurguları

Eddy analizi 8-30 kHz frekans aralığında yapılmıştır. Bu analizin rezonans frekansı olan 10 kHz değerinde yapılması manyetik analiz açısından yeterlidir. Fakat oluşturulan tasarımın simülasyon programında alt devre olarak kullanılabilmesi için en az 20 adet çözüme ihtiyacı vardır. Bu sebeple frekans aralığı rezonans frekansını da kapsayacak şekilde 8-30 kHz olarak genişletilmiş ve 23 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Bu genişletme analiz süresini oldukça uzatmasına rağmen “transient “ analizine kıyasla hala çok daha avantajlı olduğu için tercih edilmiştir.

ANSYS Maxwell de yapılan tasarım Simplorer üzerinden simülasyona sokulurken, Simplorer’a bir ANSYS Maxwell bileşeni olarak dinamik Eddy analizi alt devre olarak tanıtılmıştır. Bu sayede manyetik analizden elde edilen sonuçlar ara işleme gerek kalmaksızın kullanılabilmiştir. Simplorer’da analiz edilen devrenin tam görünümü Şekil 3.14’te görüldüğü gibidir.

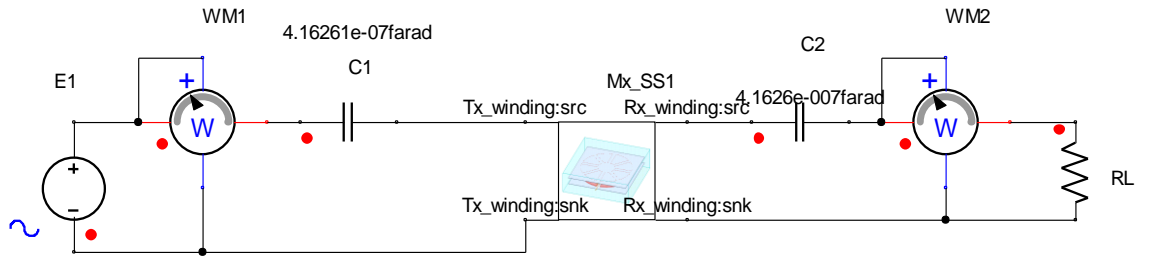
Devre hem “AC” analize hem de “transient” analize tabi tutulmuştur. Transient analiz rezonans frekansında devrenin davranışını gözlemleyerek, akım gerilim ve güç

değerlerini elde etmeye olanak sağlamıştır. Bu çalışmada yapılması hedeflenen güç aktarımı için verim bu ölçümler ile bu simülasyondan alınmıştır.



Şekil 3.14. KET tam devre diyagramı

Ayrıca Şekil 3.14'de tam eşdeğer devresi gösterilen tasarım ile beraber sadece KET trafosunun performansını görebilmek adına Şekil 3.15'de gösterilen devre analizi yine Simplorer ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15. KET ideal şartlara göre devre diyagramı

Bu devrenin simülasyonunun Simplorer üzerinden yapılması, analiz süresi yönünden ciddi avantaj sağlamıştır. Eğer bu devre Simplorer yerine ANSYS Maxwell'de transient analiz ile çözümlenirse, her zaman adımı için tekrar parça analizi yapılarak ilerlenmesi gerektiğinden bu devrenin simülasyonu doğrudan Simplorer'da yapılmıştır.

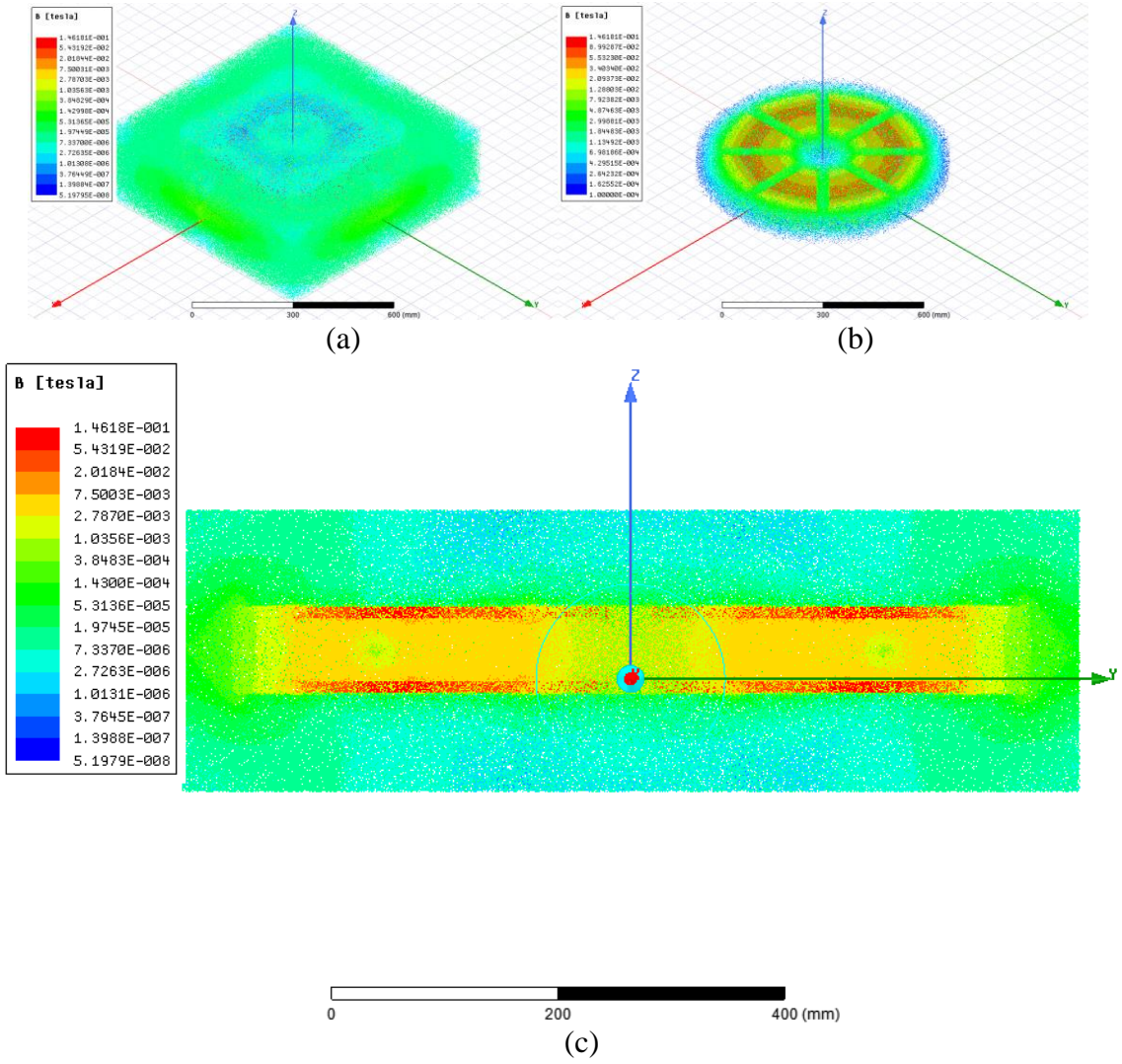
4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında önerilen KET sisteminin nihai tasarımı yapıldıktan sonra ANSYS Maxwell programı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak manyetik analize tabi tutulmuş ve k , L_1 , L_2 , R_1 , R_2 ve kayıp değerleri bu sayede hesaplanmış ve analitik hesaplar ile birbirlerini doğrulayan sonuçlar elde edilmiştir. Manyetik analizlerde KET sisteminin 3D modeli ve 2D modeli için analizler yapılmıştır. Tasarım, Simplerer üzerinden transient analiz edilerek, akım, gerilirim, güç değerleri hesaplanmış ve verim sonuçları elde edilmiştir. Tasarlanan transformatörün frekans tepkisi de yine bu devre simülasyonundan elde edilmiştir.

4.1. KET Manyetik Analiz ve Analitik Sonuçları

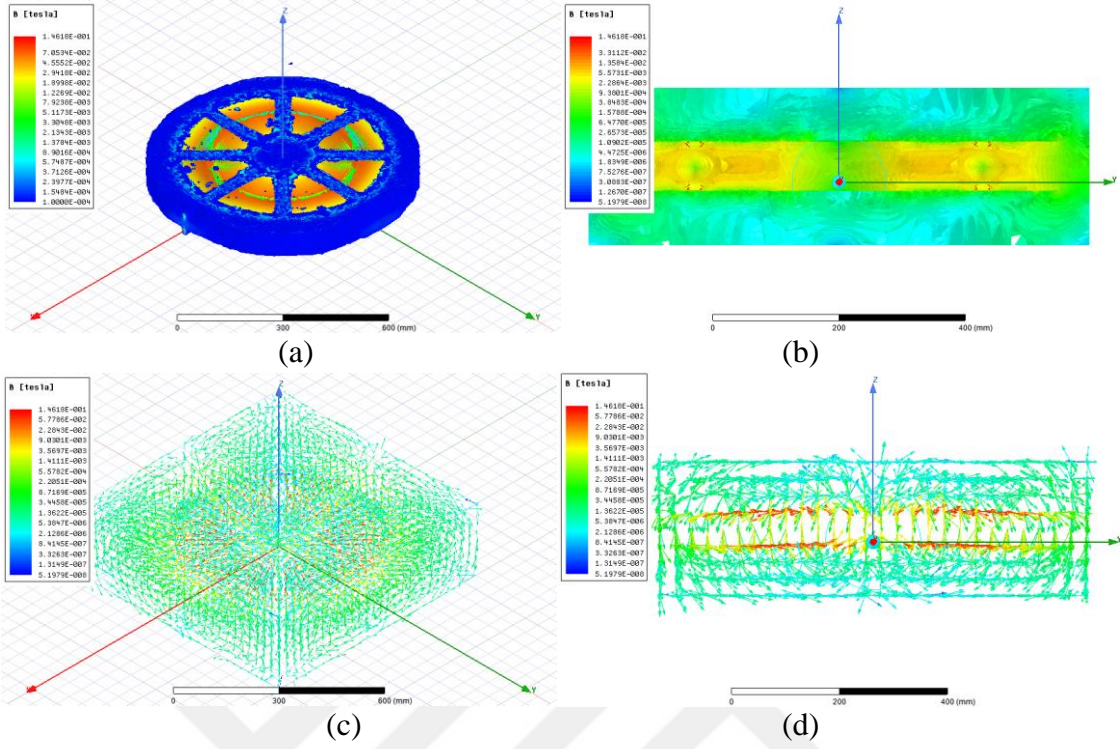
Şekil 4.1'de tasarlanmış modeli görülen KET transformatörünün rezonans frekansında 3D analizlerden elde edilmiş manyetik akı yoğunluğu dağılımının havadaki dağılımları verilmiştir. Şekil 4.1'de gösterilen manyetik akı dağılımları, skaler büyüklüktür. Şekil 4.1(a)'da KET trafosunun izometrik görünümünde hava üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları, Şekil4.1(b)'de çok küçük değerlerdeki manyetik akı değerlerinin filtre edilmiş dağılımı Şekil4.1(c)'de ise yan profilden görünümü verilmiştir.

Burada birincil ve ikincil bobinleri arasındaki maksimum manyetik akı yoğunluğunun 30-40 mT olduğu görülmektedir. Alüminyum levhaların dış kısmında 0.001 mT değerlerine düştüğü görülmektedir. Bobinlerin alt ve üst kısmına yerleştirilmiş olan bu levhalar manyetik alanın yönlendirilmesinde başarılı olmuştur. Levha bulunmayan yan bölgelerde ise yaklaşık 0.15 mT büyüklüğünde kaçak akıların az da olsa var olduğu görülmüştür.



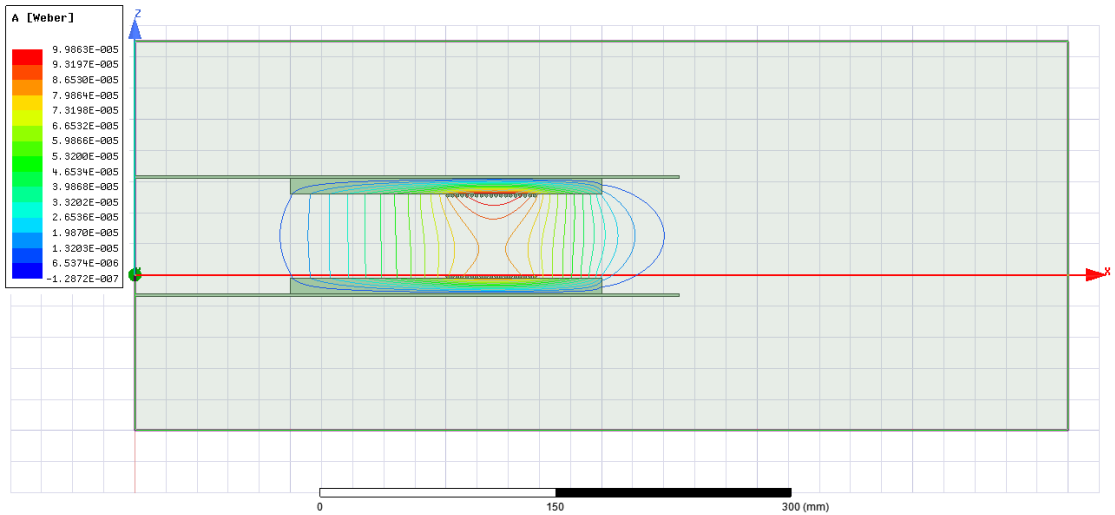
Şekil 4.1. Havadaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 4.2’de ise KET sisteminin donanımsız akı dağılımı ve ona ait kesit görünümü ile aynı bölgelerdeki manyetik akı yoğunluğu vektörel dağılımları gösterilmektedir. Manyetik akı geçişlerinin tamamına yakınının, hedeflenen bölge olan bobinler arasında istenilen düzeyde gerçekleştiği görülmektedir.

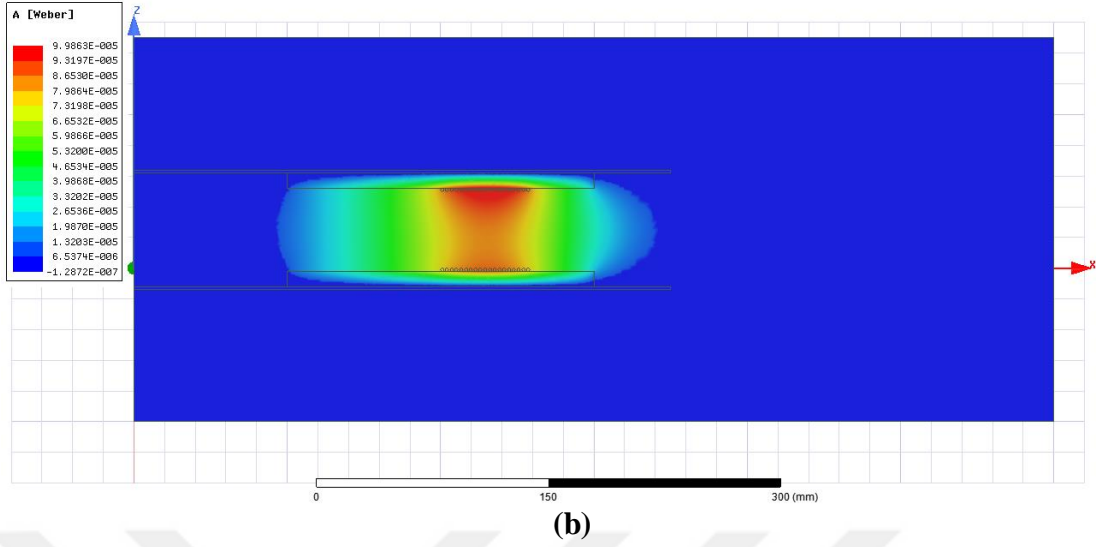


Şekil 4.2. Havadaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve vektörü

2D analizlerden elde edilen, tüm KET trafosu üzerindeki manyetik akı çizgi dağılımı Şekil 4.3 (a)'da gösterilmektedir. Şekil 4.3 (b)'de ise tüm alan üzerindeki manyetik akı dağılımı görülmektedir. 2D analizde tasarım Z eksenine etrafında döndürülerek yapılmıştır. Dolayısı ile Şekil 4.3'te gösterilen tüm trafonun sadece çeyrek kısmını oluşturmaktadır

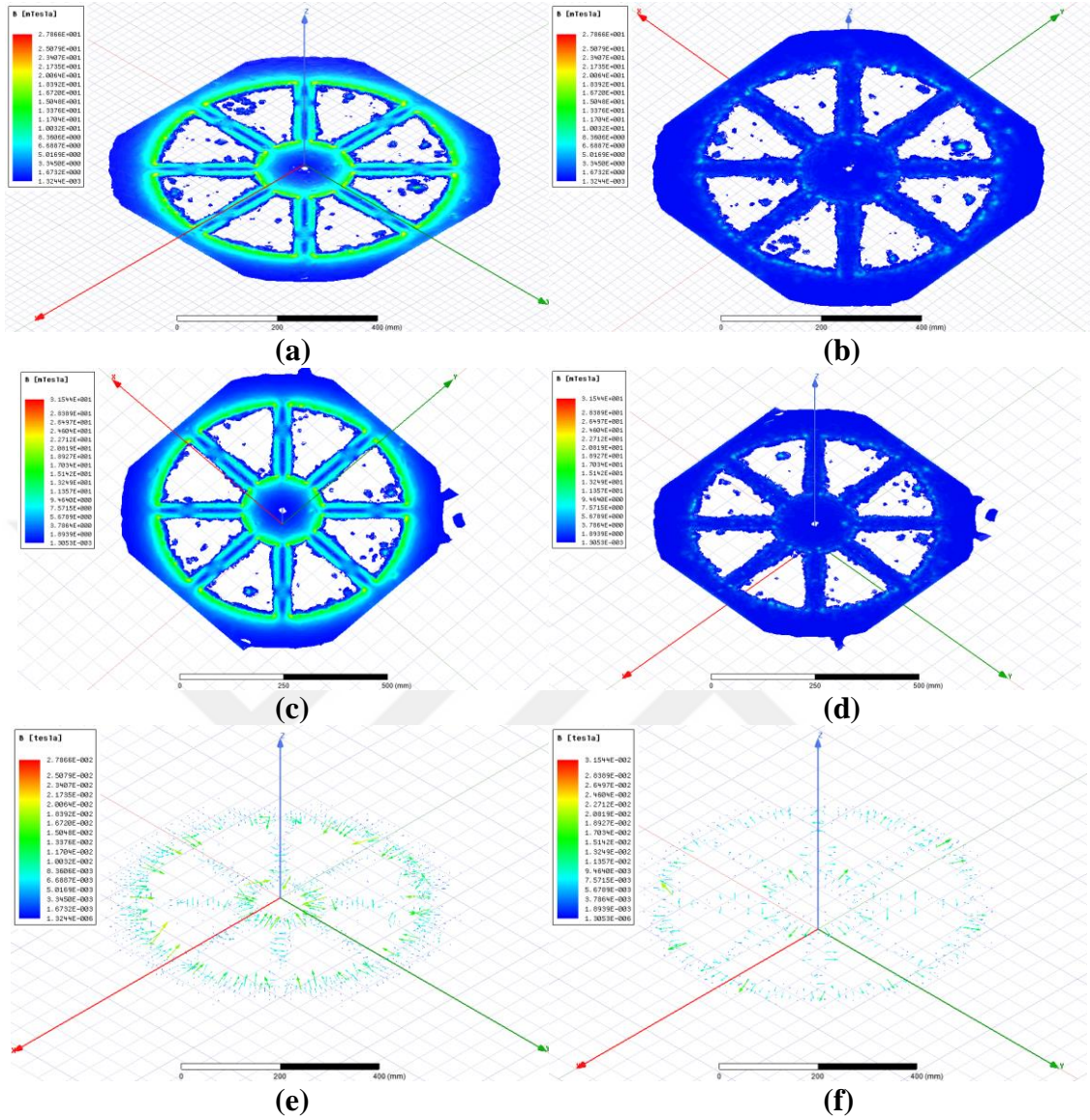


(a)



Şekil 4.3. Havadaki manyetik akı dağılımı 2D görünümü

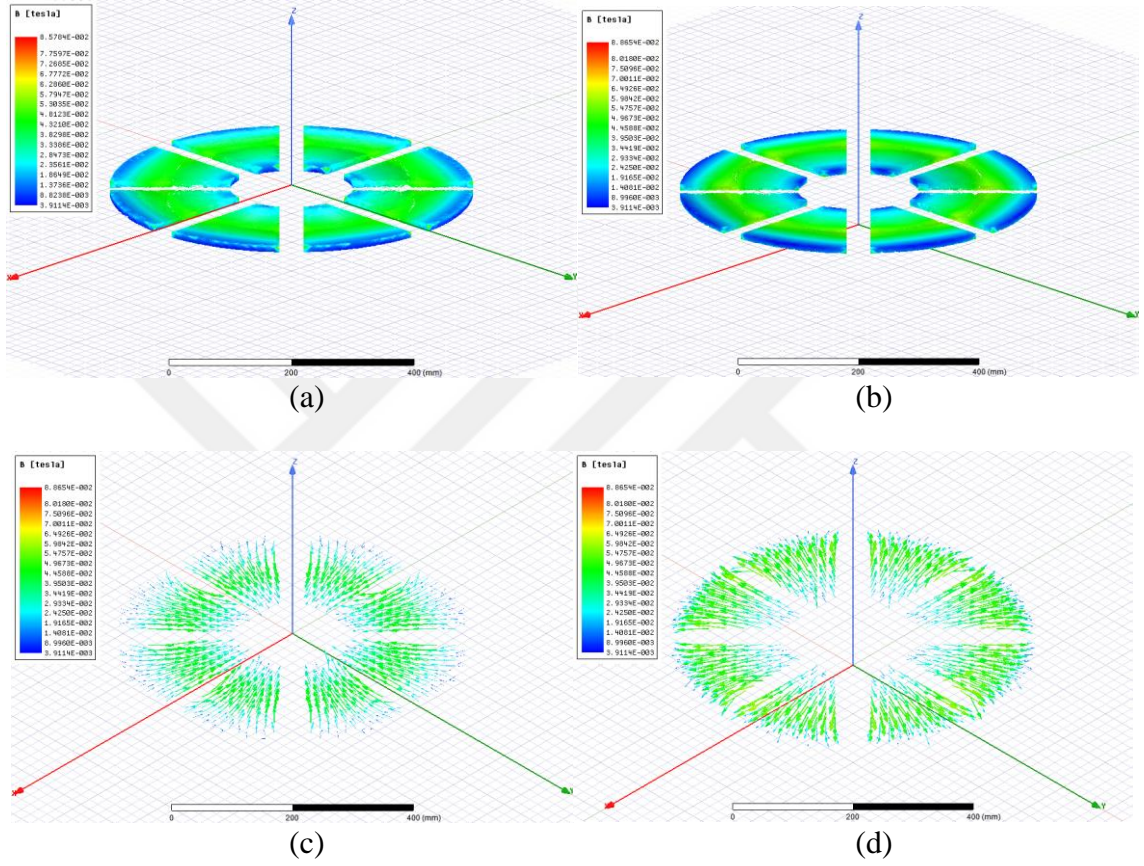
Şekil 4.4'te birincil taraf (Şekil 4.4 (a), Şekil 4.4 (b)) ve ikincil taraf (Şekil 4.4 (c), Şekil 4.4 (d)) alüminyum levhalarının manyetik akı yoğunluğu dağılımları ve bu bölgelerdeki vektörel dağılımlar gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere manyetik akı, kapalı manyetik devre yolunu oluştururken, ferrit olan yerlerde yolunu ferrit üzerinden tamamlamıştır. Bunun sebebi manyetik geçirgenlik bakımından ferrite göre daha zayıf olmasıdır. Ayrıca alüminyum levhaların iç (Şekil 4.4 (a), Şekil 4.4 (c)), yani birbirlerine bakan yüzeyleri ile dış (Şekil 4.4 (b), Şekil 4.4 (d)) yüzeyleri arasında görünür bir manyetik akı yoğunluğu farkı bulunmaktadır. İç yüzeylerde bu değer 10-16 mT değerlerindekiyken, dış yüzeylerde 1-3 mT değerlerine ulaşmaktadır. Bu da yine alüminyum levhalar ile manyetik alanı hedef bölgede tutma bakımından doğru tercih yapıldığının göstergesidir. Şekil 4.4 (e) ve Şekil 4.4 (f) 'de ise yine alüminyum levhalar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu vektörü gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Alüminyum levhalarının manyetik akı yoğunluğu dağılımları ve vektörü (a) T_x üstten görünümü (b) T_x alttan görünümü (c) R_x alttan görünümü (d) R_x üstten görünümü (e) T_x B vektörü (f) R_x B vektörü

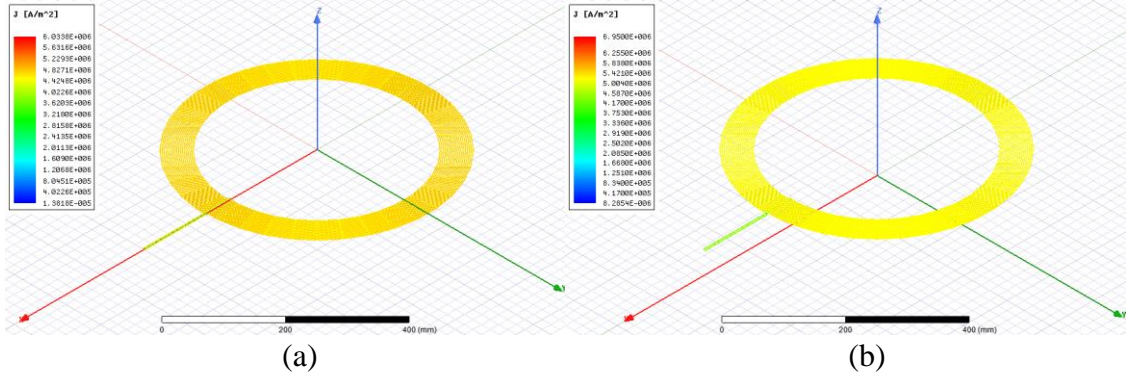
Şekil 4.5'te nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik akı vektör dağılımları gösterilmiştir. Birincil bobin olduğu tarafta bulunan nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımına göre (Şekil 4.5 (a)), en yüksek değer olarak 80 mT değerleri görünürken, bobin hizasında bulunan bölgelerde en fazla 55 mT seviyelerinde bir manyetik akı dağılımı görülmektedir. İkincil bobinin bulunduğu taraftaki nüve üzerindeki manyetik akı dağılımına (Şekil 4.5 (b)) bakıldığında ise yine köşe noktalarda minimal seviyede 80-85 mT değerleri görülürken, daha yoğunluklu olarak 55-60 mT değerleri görülmüştür. Şekil 4.5 (d) ve Şekil 4.5 (e)'de görülen manyetik akı

yoğunluğunun vektörel dağılımlarından görüldüğü üzere, birincil taraf nüvesinde vektör dıştan içe iken ikincil taraf nüvesinde içten dışa doğrudur. Bu da tüm sistem üzerinde oluşan manyetik devrenin bu parçalara düşen kısmındaki davranışının beklendiği gibi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5 Nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ile vektörel dağılımı (a) Tx Manyetik akı yoğunluğu dağılımı (b) Rx Manyetik akı yoğunluğu dağılımı (c) Tx Manyetik akı yoğunluğu vektörü (d) Rx Manyetik akı yoğunluğu vektörü

Şekil 4.6’da birincil taraf bobini (Şekil 4.6 (a)), ikincil taraf bobini (Şekil 4.6 (b)) üzerindeki akım yoğunluğu dağılımları gösterilmiştir. Buna göre birincil bobin üzerinde $5,8 - 5,9 \text{ A/mm}^2$ bir değer görülürken, ikincil bobin üzerinde $5,2 - 5,4 \text{ A/mm}^2$ bir değer görülmektedir.



Şekil 4.6. Bobinler üzerindeki akım yoğunluğu dağılımı

Frekans değeri 8 kHz ile 30 kHz arasında 1kHz adımlarla belirlenerek parametrik bir analiz belirlenmiştir. 3D manyetik analizlerden elde edilen parametrik frekans kurgulu sonuçlar aşağıda gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de rezonans frekansı olan 10 kHz değerini de içeren, 23 frekans değeri için ayrı ayrı yapılmış analizler sonucunda elde birincil bobin (Tx) endüktans değeri, ikincil bobin (Rx) endüktans değeri, ortak endüktans (Rx,Tx) değeri ve bağlantı faktörü (CplCoef) değeri bulunmaktadır. Litz kablonun bir sonucu olarak hem bobin endüktans değerleri hem ortak endüktans değeri hem de bunlara bağlı bağlantı faktörü değerleri bakımından, bütün frekans spektrumunda birbiri ile hemen hemen aynı elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Frekansa bağlı enduktans ve bağlantı faktörü hesaplamaları 3D

Freq [kHz]	R _x Endüktans [μH]	T _x Endüktans [μH]	Ortak Endüktans [μH]	Bağlantı Faktörü
8	608,5778429	608,583669	390,4366139	0,641552678
9	608,5440045	608,5487748	390,4040132	0,641535337
10	608,5192085	608,5245598	390,3808265	0,641523069
11	608,4984208	608,5033299	390,3609747	0,641512594
12	608,4810824	608,4854877	390,344376	0,64150386
13	608,4684762	608,4727731	390,3323948	0,641497517
14	608,4560841	608,4606712	390,3208606	0,641491472
15	608,4462103	608,4501142	390,311212	0,641486385
16	608,4379205	608,4418552	390,3034481	0,641482348
17	608,4295453	608,4333353	390,2953998	0,641478027
18	608,4226959	608,4265363	390,2889896	0,641474686
19	608,4177617	608,4213109	390,2842463	0,641472246
20	608,4118581	608,4151902	390,2785017	0,641469143
21	608,4071059	608,4104006	390,2739895	0,641466756
22	608,4030055	608,4061825	390,2700457	0,641464659
23	608,3983308	608,401188	390,2654966	0,64146228
24	608,394828	608,3975087	390,2621123	0,641460503
25	608,3920271	608,3949147	390,2594959	0,641459047
26	608,3889256	608,3915973	390,2564432	0,641457413
27	608,3866772	608,3891885	390,254316	0,641456372
28	608,3840398	608,3863817	390,2517165	0,641454969
29	608,3812055	608,3834129	390,2489616	0,6414535
30	608,3793035	608,3817088	390,2472154	0,641452531

Çizelge 4.2’de 3D analizlerden elde edilmiş frekansa bağlı nüve kayıpları, sargı kayıpları ve sargı dirençleri gösterilmiştir. Mesafe sabit 50 mm olduğu için kayıplar üzerindeki etkisi sınırlı olarak görülmektedir.

Çizelge 4.2. Frekansa Kayıplar ve sargı dirençleri 3D

Freq [kHz]	Nüve Kayıpları [W]	Sargı kayıpları [W]	R _x [mOhm]	T _x [mOhm]
8	137.9632041	292.3852279	226,8466659	226,9049475
9	138.5189193	292.3852279	227,0225887	227,0632961
10	138.8949187	292.3852279	227,1511663	227,2077677
11	139.3179833	292.3852279	227,2805878	227,3298041
12	139.6746647	292.3852279	227,4082144	227,449306
13	139.9251675	292.3852279	227,5000742	227,5452194
14	140.1009079	292.3852279	227,5555544	227,6041427
15	140.2991614	292.3852279	227,6347933	227,6789895
16	140.5227191	292.3852279	227,6932852	227,7361013
17	140.676381	292.3852279	227,7455299	227,7895605
18	140.8157546	292.3852279	227,7825816	227,8321418
19	140.9624694	292.3852279	227,833575	227,8777253
20	141.0322001	292.3852279	227,8566599	227,8982523
21	141.1173278	292.3852279	227,8847604	227,927022
22	141.2354917	292.3852279	227,9209067	227,964564
23	141.2394745	292.3852279	227,9214935	227,9595343
24	141.3421305	292.3852279	227,9634521	227,9959402
25	141.3684336	292.3852279	227,9775985	228,0183991
26	141.4299564	292.3852279	227,9918025	228,0259025
27	141.4495885	292.3852279	227,9967083	228,0304243
28	141.5051512	292.3852279	228,0219047	228,0520716
29	141.4834371	292.3852279	228,0098482	228,0383042
30	141.5315175	292.3852279	228,033152	228,0646018

Çizelge 4.3'te 2D analizlerden elde edilmiş olan endüktans değerleri ve bağlantı faktörü değerleri bulunmaktadır.

Çizelge 4.3. Frekansa bağlı enduktans ve bağlantı faktörü hesaplamaları 2D

Freq [kHz]	R _x Endüktans [μH]	T _x Endüktans [μH]	Ortak Endüktans [μH]	Bağlantı Faktörü
8	653,1143729	653,1196962	440,7130981	0,674784265
9	653,0402069	653,0456435	440,6390514	0,674747454
10	652,9734257	652,9789894	440,5723899	0,674714308
11	652,9135516	652,9192481	440,5126325	0,674684588
12	652,8599628	652,8657923	440,4591553	0,674657988
13	652,8119834	652,8179418	440,4112806	0,67463417
14	652,7689444	652,7750249	440,3683388	0,674612804
15	652,7302196	652,7364142	440,3297036	0,674593578
16	652,6952436	652,7015434	440,2948096	0,674576212
17	652,6635171	652,6699131	440,2631578	0,674560457
18	652,634606	652,6410893	440,2343146	0,6745461
19	652,6081364	652,6146986	440,2079067	0,674532953
20	652,5837883	652,5904217	440,1836147	0,674520859
21	652,5612891	652,5679863	440,1611663	0,674509682
22	652,5404068	652,5471613	440,1403301	0,674499307
23	652,520944	652,5277496	440,1209092	0,674489636
24	652,5027328	652,5095842	440,1027362	0,674480586
25	652,4856301	652,4925224	440,0856683	0,674472086
26	652,469514	652,4764427	440,0695839	0,674464075
27	652,4542799	652,4612411	440,0543788	0,674456502
28	652,4398381	652,4468284	440,0399637	0,674449322
29	652,4261117	652,4331277	440,0262616	0,674442497
30	652,4130339	652,4200728	440,0132062	0,674435993

Çizelge 4.4’de 2D analizlerden elde edilmiş frekansa bağlı nüve kayıpları ve alüminyum levhalardan kaynaklanan kayıplar ile sargı kayıpları gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Frekansa göre kayıplar ve sargı dirençleri 2D

Freq [kHz]	Nüve Kayıpları [W]	Sargı Kayıpları [W]	R _x [mOhm]	T _x [mOhm]
8	50,85378289	120,1120239	213,7500559	213,7072585
9	54,85760938	120,1120239	218,7668579	218,7120416
10	58,64312206	120,1120239	223,5105955	223,4439325
11	62,21164736	120,1120239	227,9824829	227,9045891
12	65,57732461	120,1120239	232,1998972	232,1116857
13	68,76040049	120,1120239	236,1879727	236,0905305
14	71,78301872	120,1120239	239,974308	239,8688033
15	74,66678579	120,1120239	243,5858963	243,4735121
16	77,43150518	120,1120239	247,0475208	246,9294114
17	80,09463471	120,1120239	250,3810595	250,2583233
18	82,67116647	120,1120239	253,6053234	253,478988
19	85,17373684	120,1120239	256,7361854	256,607201
20	87,61284879	120,1120239	259,786853	259,6560909
21	89,99713704	120,1120239	262,7681961	262,6364512
22	92,33363719	120,1120239	265,6890814	265,5570764
23	94,62803858	120,1120239	268,5566873	268,4250781
24	96,88491142	120,1120239	271,3767871	271,2461692
25	99,10790512	120,1120239	274,1539973	274,0249113
26	101,2999182	120,1120239	276,8919896	276,7649277
27	103,4632419	120,1120239	279,593671	279,4690823
28	105,5996801	120,1120239	282,2613343	282,13963
29	107,7106486	120,1120239	284,8967824	284,7783406
30	109,7972572	120,1120239	287,5014315	287,3866014

Rezonans frekansında, 2D ve 3D analizlerden elde edilen sonuçlar ile analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5'te gösterildiği gibidir. Verilen değerler nüveler ve manyetik yönlendirme için kullanılan alüminyum levhalar olmaksızın, hava nüveli bobinler için hesaplanmıştır. Çizelgeden de görüldüğü gibi değerler birbirini

doğrular niteliktedir. 2D analiz sonuçlarındaki kısmi farklılığın sebebi 3D’de tam olarak gerçekleştirilmiş olan tasarımım 2D’de eksen etrafında döndürülerek oluşturulamamış olmasıdır.

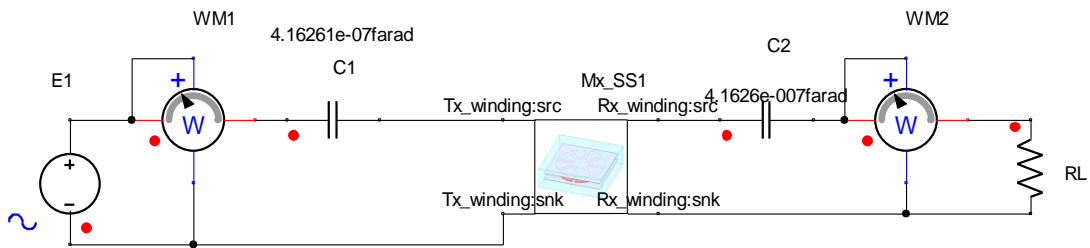
Çizelge 4.5. Rezonans frekansındaki değerler

	ANSYS MAXWELL 3D	ANSYS MAXWELL 2D	HESAPLANAN DEĞER
L_{Tx} (μH)	298,5245598	294,9789894	301
L_{Rx} (μH)	298,5192085	294,8534257	301
k	0,641523069	0,674714308	0.64

4.2. KET Devre Simülasyonu Sonuçları

Tasarlanan KET transformatörünün Simplorarda elde devre simülasyon sonuçları aşağıda gösterilmektedir. Devre simülasyonunda transformatörün 3D tasarımı kullanılmıştır.

KET’de öncelikli hedef yüksek verimli enerji akatarımı yapılabilmesidir. Şekil 4.7’de gösterildiği gibi rezonans durumunda transformatörün birincil bobini AC sinyal ile beslenmiştir. İkincil taraf bobinine ise omik bir yük bağlanmıştır.



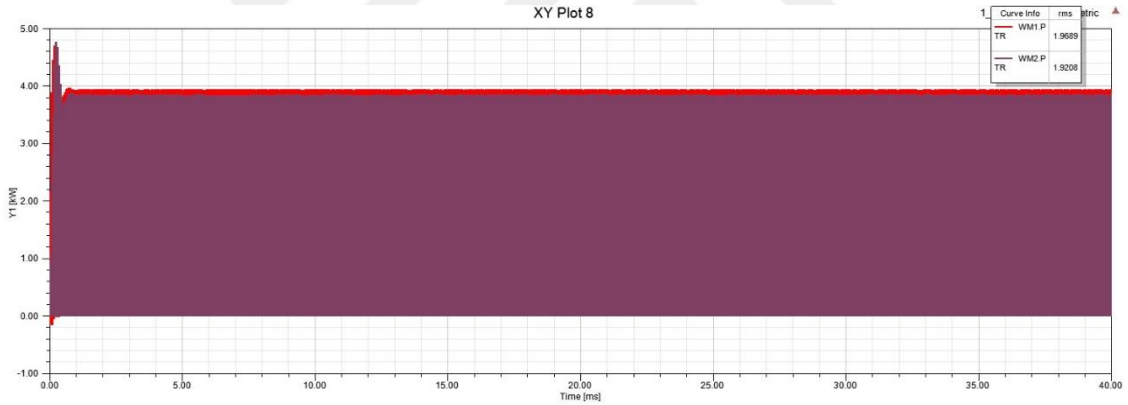
Şekil 4.7. KET rezonans devresi ve yük

Şekil 4.7’de birincil tarafa bağlanan wattmetrede (WM1), ve ikincil tarafa bağlanan wattmetrede (WM2) görünen sinyaller Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Buna göre giriş gücü

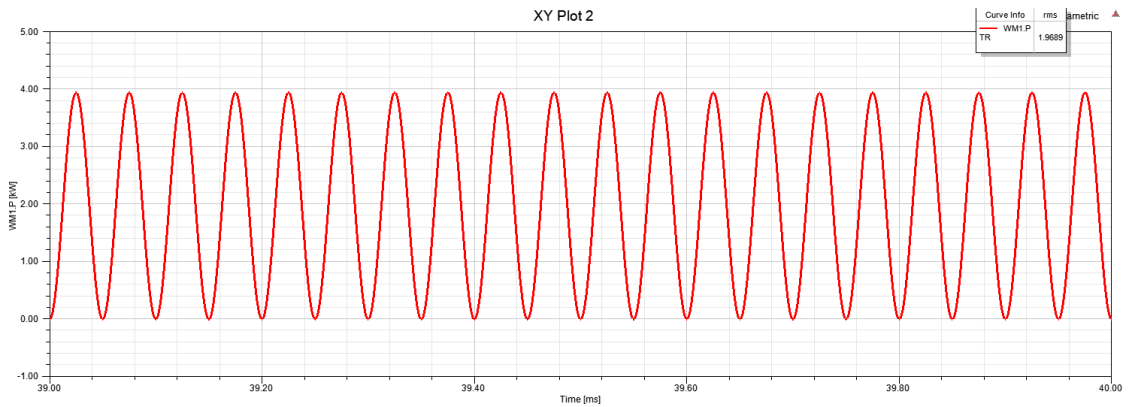
1.96 kW, çıkış gücü 1.92 kW olarak ölçülmüştür. Yük direnci (R_L), ANSYS'in sağladığı optimizasyon tekniklerinden, tasarımcı tarafında önceden tanımlanmış ve belirlenen kısıtlara göre en uygun değeri bulmasına olanak sağlayan "Genetic Algorithm (Random Search)" tekniği ile optimize edilerek 26.5Ω olarak hesaplanmış ve simülasyona dahil edilmiştir. Giriş ve çıkış akım, gerilim ve güç değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. Buna göre maksimum verim % 97 elde edilmektedir.

Çizelge 4.6. KET Giriş-çıkış değerleri

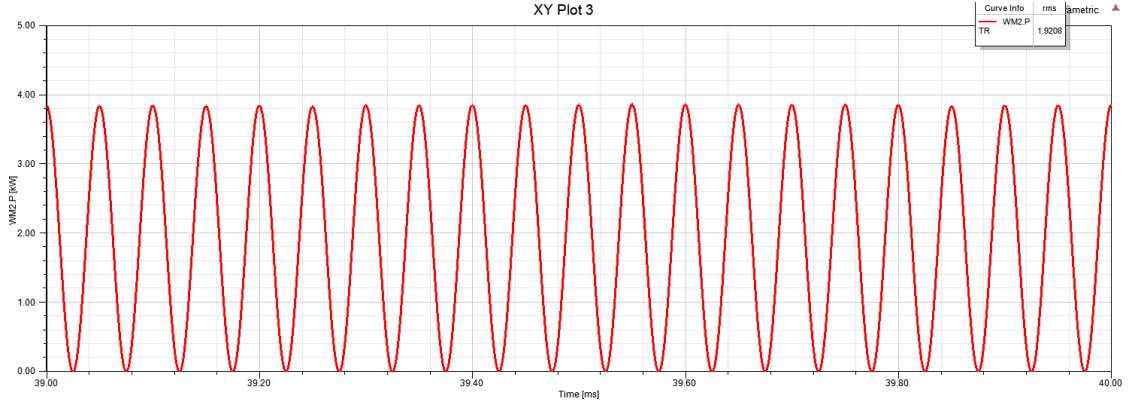
	Akım (rms)	Gerilim (rms)	Güç (rms)
Giriş	8.95 A	220 V	1.96 kW
Çıkış	8.96 A	214.33 V	1.92 kW



(a)



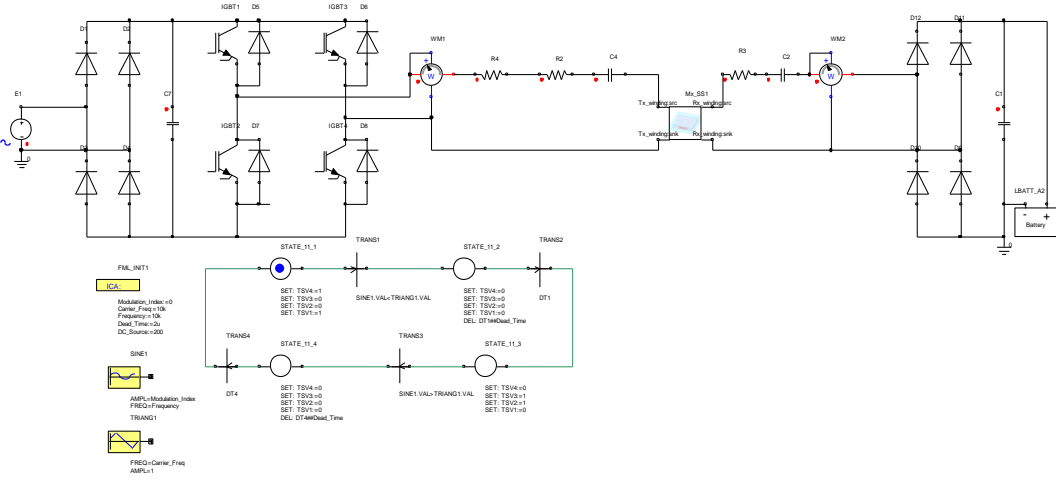
(b)



(c)

Şekil 4.8. WM1 ve WM2’de okunan güç sinyalleri (a) WM1 ve WM2 (b) WM1 (c) WM2

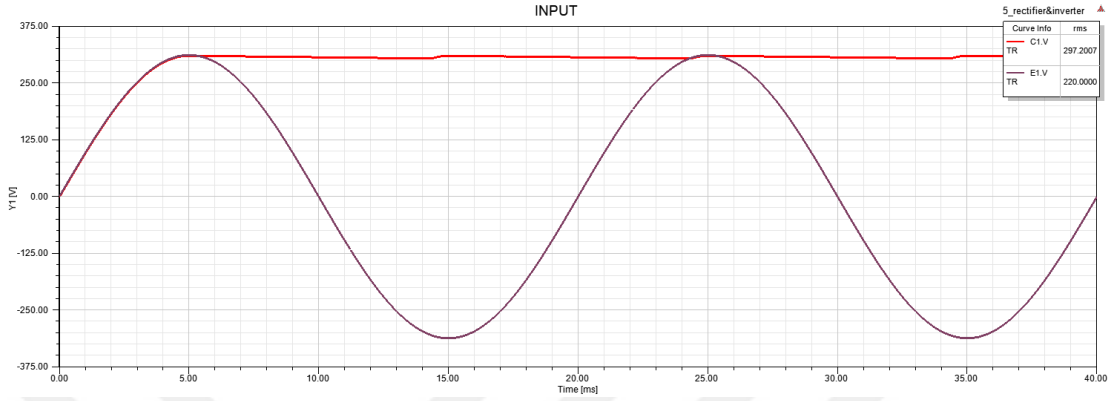
Elektrikli araçlardaki artış, cep telefonunun bireysel ihtiyaç haline gelmesi gibi örnekler sahada batarya kullanımını yaygınlaştırmıştır. Tüm bu ihtiyaçlar KET sistemlerinin özellikle batarya şarjı amacıyla kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Tasarlanan transformatörün batarya şarjı gibi amaçlarla kullanılabilmesini sağlayan sistemin tam devre modellenmesi ise Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Bu analizde şebeke girişi geriliminden, çıkıştaki batarya yüküne kadar tüm ara elemanlar ve kayıpları simülasyona dâhil edilmiştir.



Şekil 4.9. KET tam devre modeli durum diyagramı

Şekil 4.10’da şebekeden sağlanan bir faz 220 V 50 Hz giriş sinyali ve bu sinyalin doğrultulmasından elde edilen evirici besleme sinyali gösterilmektedir. Şekil 4.10’da

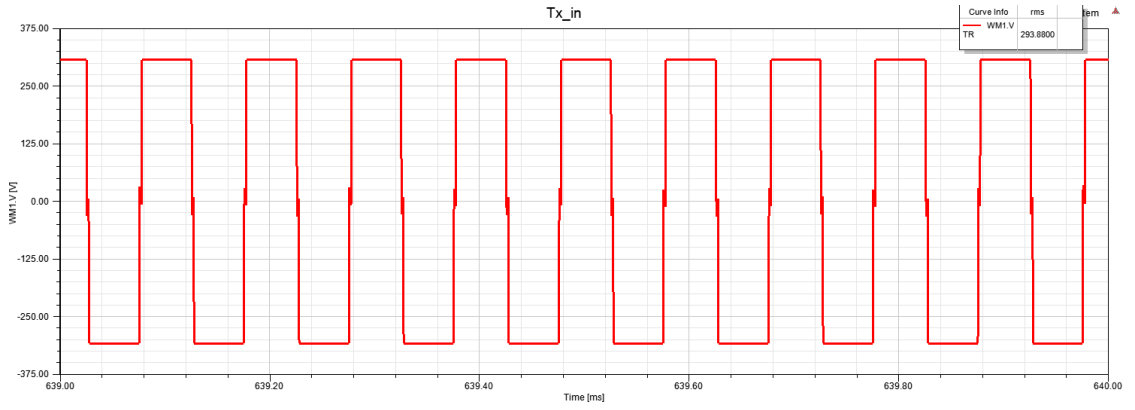
kırmızı olarak gösterilen sinyal evirici girişine uygulanmış ve 10 kHz frekansında bir sinyal elde edilmiştir.



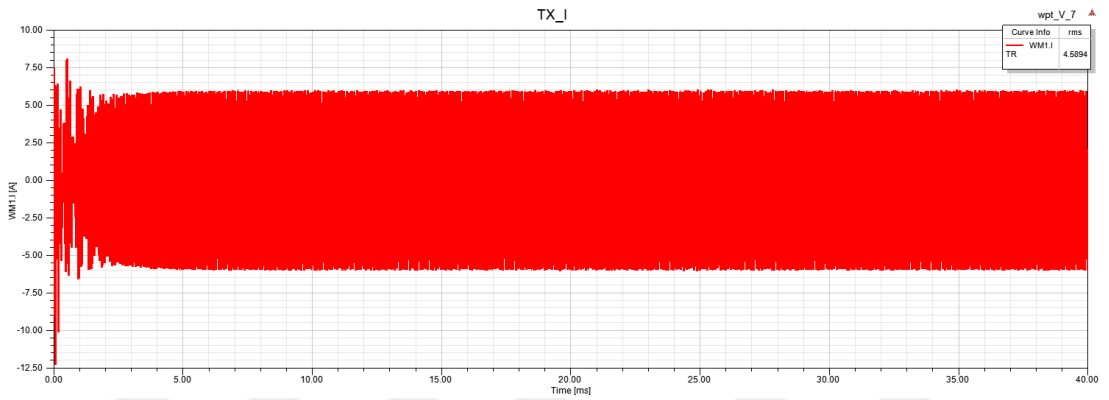
Şekil 4.10. Giriş sinyali ve Doğrultulmuş şekli

Evirici çıkışında pozitif ve negatif 293 V değerinde salınım yapan bir kare dalga elde edilmiştir. Birincil bobine uygulanan 293 V gerilim 4.6 A akım ikincil bobin tarafında % 76 verimle yüke aktarılmıştır. Yük tarafına bağlanan bataryayı beslemek için ikincil bobin tarafında elde edilen sinyal doğrultulmuş ve bataryaya uygulanmıştır. Birincil taraf bobinine uygulanan giriş sinyalinde tam olarak sinüs formunun elde edilememiş olması verimi olumsuz etkilemiştir. Bunun yanında yukarıda Şekil 4.7’de verilen ideal şartlardaki sitemden farklı olarak, doğrultucu ve evirici kullanılması verimi etkileyen faktörler olmuştur.

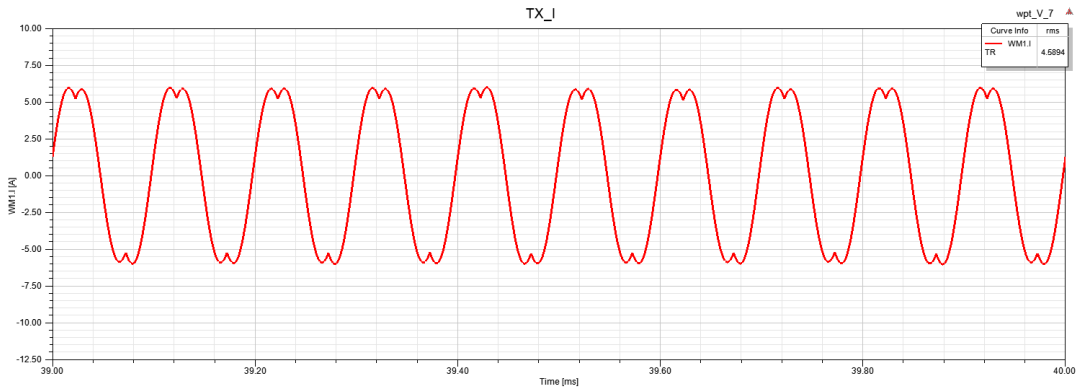
Birincil tarafa uygulanan gerilim şebeke frekansından elde edilen 220 V değerine bağlı olarak evirici çıkışından 293 V gerilim elde edilmiştir. Buradaki gerilim düşümü, devredeki yarıiletkenlere bağlı olarak meydana gelmiştir. Birincil bobine uygulanan akım yaklaşık 4.6 A olarak elde edilmiştir. Şekil 4.11 (b)’deki sinyalin daha ayrıntılı olarak görülebilmesi için zaman aralığı 0-40 ms değerinden, 39-40 ms aralığına güncellenmiştir. Bunun sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.11’(c) de gösterilmektedir.



(a)



(b)

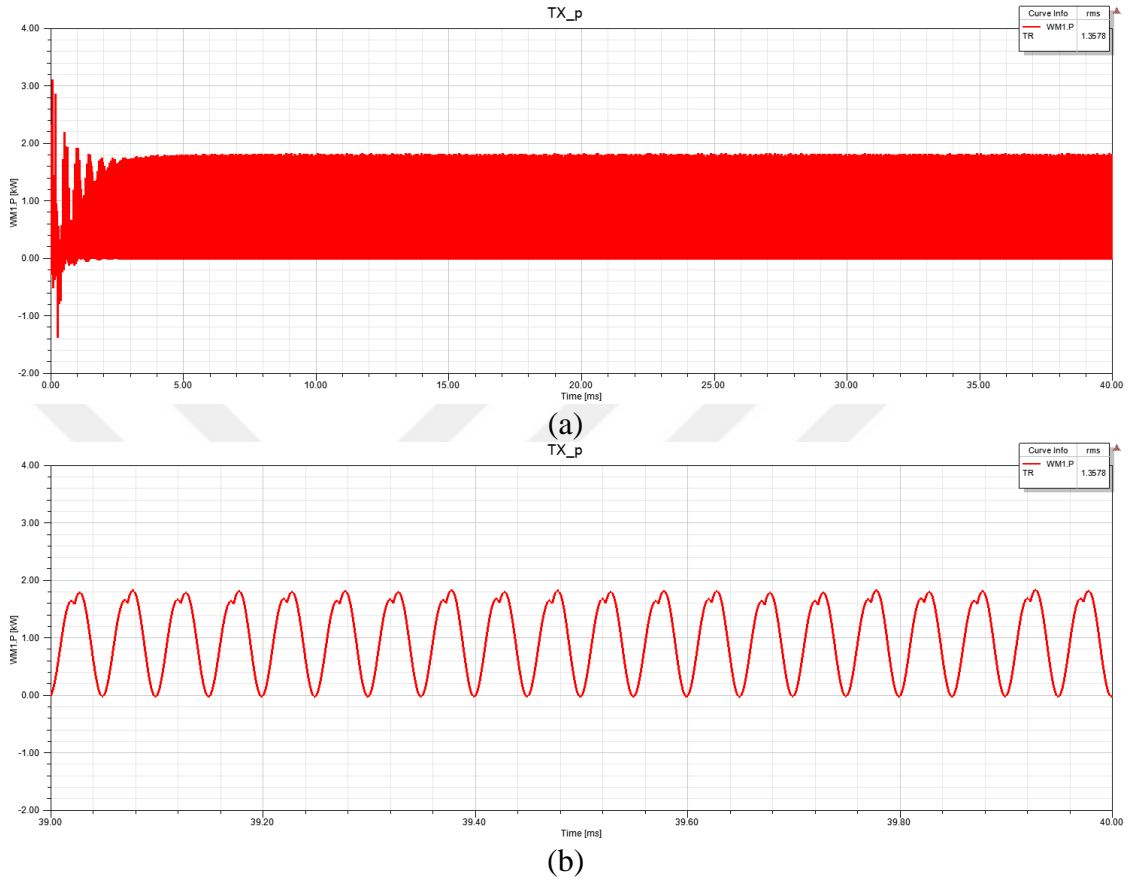


(c)

Şekil 4.11. Birincil bobine uygulanan sinyal

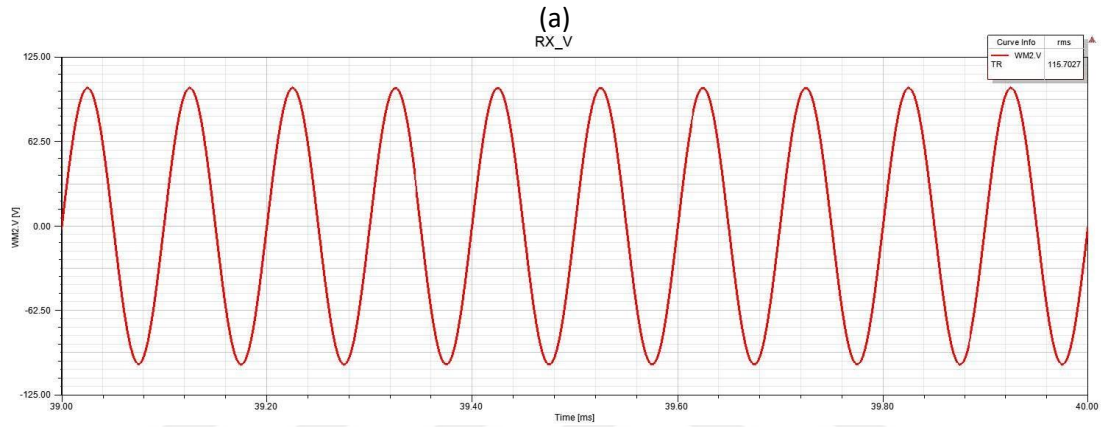
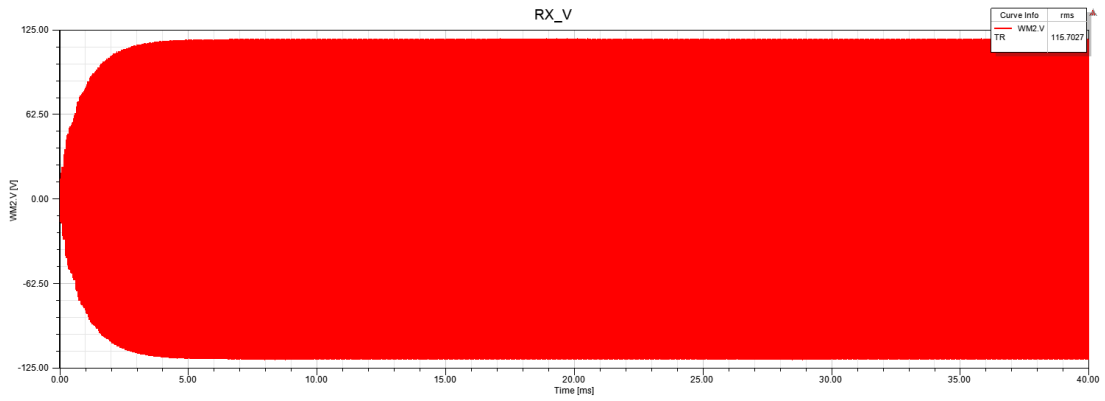
Şekil 4.12’de görüldüğü gibi sistem yaklaşık 3ms içinde kararlı duruma geçmektedir. Elde edilen güç değerlerinin tıpkı rezistif devrelerde olduğu gibi negatif değerlere düşmemesi rezonansın başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğinin göstergesidir. Birincil taraftaki güç değeri 1.35 kW olarak elde edilmiştir. Şekil 4.12 (a)’daki sinyalin daha ayrıntılı olarak

görülebilmesi için zaman aralığı 0-40 ms değerinden, 39-40 ms aralığına güncellenmiştir. Bunun sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.12 (b) de gösterilmektedir.



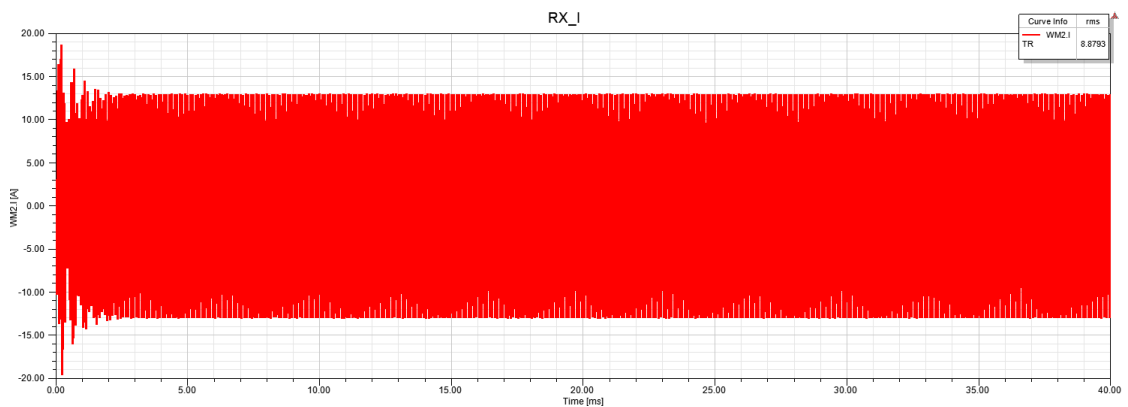
Şekil 4.12. Birincil bobin güç grafiği

İkincil tarafta ise yaklaşık 115 V gerilim değeri elde edilmiştir. Şekil 4.13 (a)'da görülen ikincil taraf gerilimi de yine birincil tarafa bağlı olarak 3 ms sonra kararlı pozisyonuna ulaşmaktadır. Şekil 4.13. (a)'daki sinyalin daha ayrıntılı olarak görülebilmesi için zaman aralığı 0-40 ms değerinden, 39-40 ms aralığına güncellenmiştir. Bunun sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.13. (b)'de gösterilmektedir.

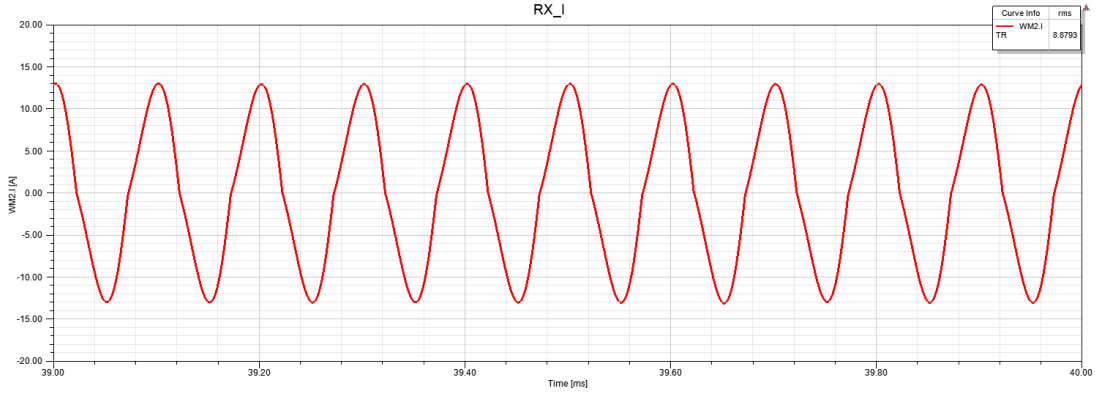


Şekil 4.13. İkincil bobin gerilim sinyali

İkincil tarafta yaklaşık 8.8 A akım değeri elde edilmiştir. Şekil 4.14. (a)'da görülen ikincil taraf akımı da yine birincil tarafa bağlı olarak 3 ms sonra kararlı pozisyonuna ulaşmaktadır. Şekil 4.14 (a)'daki sinyalin daha ayrıntılı olarak görülebilmisi için zaman aralığı 0-40 ms değerinden, 39-40 ms aralığına güncellenmiştir. Bunun sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.14.(b)'de gösterilmektedir.



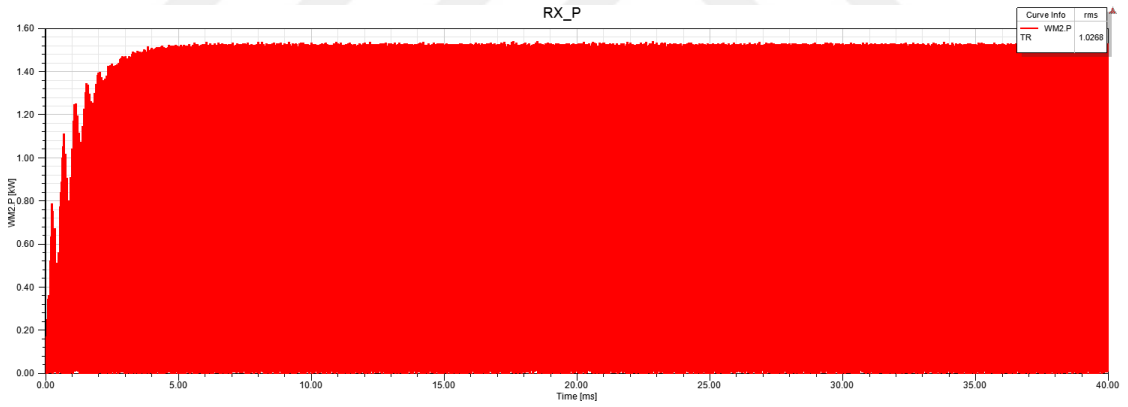
(a)



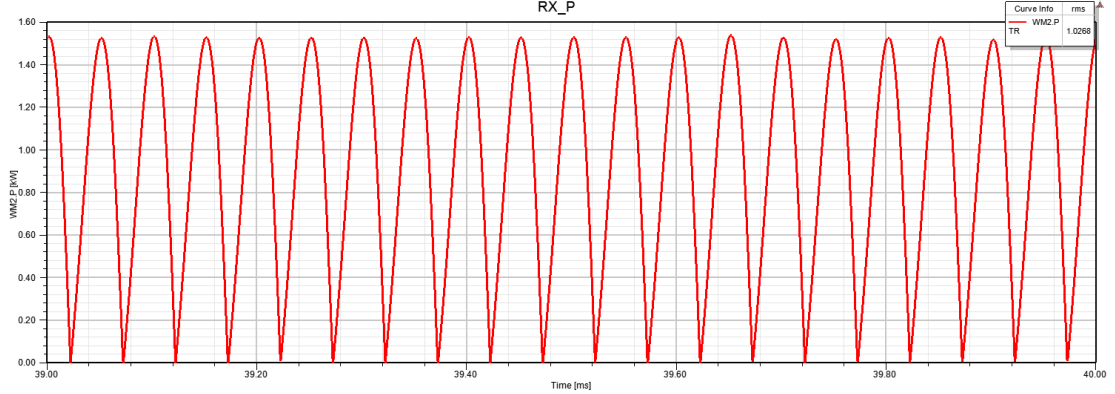
(b)

Şekil 4.14. İkincil bobin akımsinyali

İkincil taraftan elde edilen yaklaşık 1 kW güç sinyaline ait grafik Şekil 4.15.'te gösterilmiştir. Şekil 4.15. (a)'daki sinyalin daha ayrıntılı olarak görülebilmesi için zaman aralığı 0-40 ms değerinden, 39-40 ms aralığına güncellenmiştir. Bunun sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.15.'(b) de gösterilmektedir.



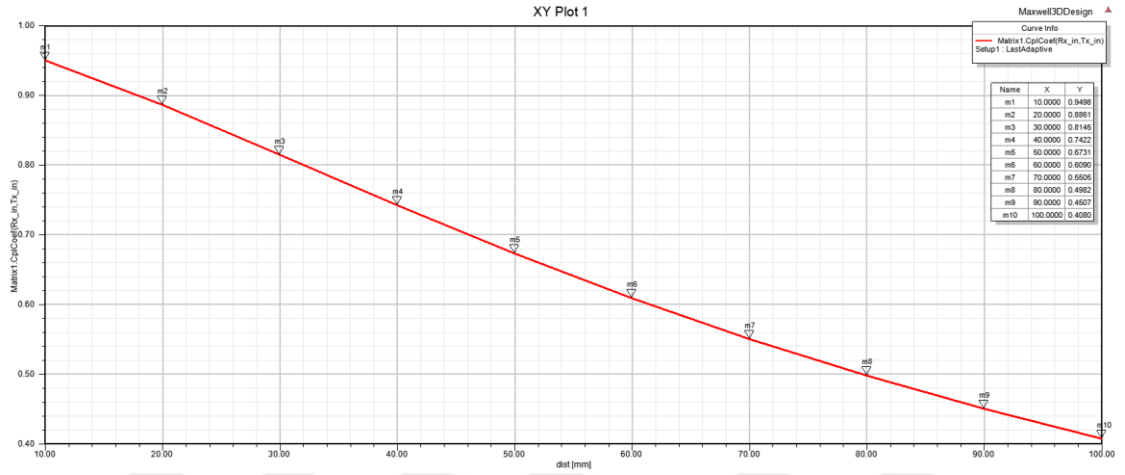
(a)



(b)

Şekil 4.15. İkincil bobin güç grafiği

Şekil 4.16’da 10 mm ile 100 mm hava arlığına göre bağlantı faktörünü göstermektedir. Buna göre mesafe arttıkça bağlantı faktörünün düştüğü görülmektedir. Bağlantı faktöründeki değişim ortak endüktans ile doğrudan ilgili olduğu için rezonansı etkilemektedir. Bozulan rezonansı tekrar elde etmek için iki yol vardır. Ya değeri hedeflenen mesafeye göre tekrar hizalanma yapılmalı ya da yeni konuma göre tekrar kondansatör değerleri belirlenmelidir.



Şekil 4.16. Bağlantı faktörü mesafe ilişkisi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında son yıllarda artan elektriğin dinamik kullanımı ihtiyacına üretilen bir çözüm olan KET sistemi çalışılmıştır. 10 kHz frekansında çalışan bir KET sistemi tasarımı yapılmıştır. KET mesafesi 50 mm olarak belirlenmiştir. Tasarımda litz kablo iletkenlerine sahip özdeş bobinleri olan transformatörün analizi SEY ile analiz edilmiştir. Birincil sargı üzerindeki akım yoğunluğunun, 5.8 A/mm^2 ve ikincil sargı üzerinde bu akımdan kaynaklı oluşan akımın yoğunluğu ise 5.3 A/mm^2 olarak ölçülmüştür. Birincil ve ikincil sargılar arasındaki manyetik akı yoğunluğunun ise yaklaşık 40 mT olduğu görülmüştür. Birincil sargıya uygulanan akımın oluşturduğu manyetik akı yolunun mümkün olduğunca hedeflenen bölge olan sargılar arasında kalarak kapalı manyetik devresini tamamlaması için birincil sargının altına, ikincil sargının üstüne yerleştirilen ferrit nüvelerin 60 mT seviyelerinde manyetik akı yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür. Bu değer tercih edilen ferrit nüvenin doyumuna ulaştığı 500 mT değerinin altında olduğu için nüvelerde herhangi bir doyum olmamıştır. Ayrıca yine manyetik akıyı hedef bölge içerisinde kalmaya zorlamak için manyetik geçirgenliği ferrit nüveye göre oldukça düşük olan alüminyum levhalar kullanılmıştır. Levhalar üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun 10 mT seviyelerinde olduğu görülmüştür. Ayrıca 3D tasarlanan transformatör ile aynı parametrelere sahip olan bir transformatör 2D olarak da tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen manyetik akı çizgileri ile hem ferrit nüvelerin hem de alüminyum levhaların sistemde beklenen etkiyi yarattığı gözlemlenmiştir.

Ferrit nüvelerin ve alüminyumun etkisi ile bobinlerin endüktans değerleri değişeceğinden, çalışmada kullanılan bobinler hem 2D, hem de 3D olarak analiz edilmiştir. 2D analiz sonuçlarına göre $294 \mu\text{H}$, 3D analiz sonuçlarına göre $298 \mu\text{H}$ endüktans elde edilmiştir. Wheeler yöntemine göre yapılan analitik hesaba göre ise $301 \mu\text{H}$ endüktans elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre analitik hesaplamalar ile analiz sonuçları birbirleri ile yaklaşık olarak örtüşmektedir. Sargı dirençleri ise 2D analize göre $225 \text{ m}\Omega$, 3D analize göre $227 \text{ m}\Omega$ olarak hesaplanmıştır.

Tasarlanan transformatöre, Simplerer ile 220 V sinüzoidal kaynaktan bir giriş sinyali uygulanmıştır. İkincil tarafa ise omik bir yük bağlanarak bu yük üzerindeki akım, gerilim ve güç değerleri elde edilmiştir. Buna göre birincil taraf sargıları üzerinden geçen akım 8.95 A iken, ikincil tarafta bağlanan omik yük üzerinden geçen akım 8.96 A'dır. Buna göre verim %97 olarak elde edilmiştir. Yük olarak bir batarya bağlandığı durumda ise, birincil taraftan çekilen akım 4.6 A iken, ikincil tarafta görülen akım 8.8 A olmuştur. Bu durumda verim %76 olarak hesaplanmıştır. Omik yüklü sistemle batarya yüklü sistem arasındaki fark devreye bağlanan doğrultucu ve evirici gibi ara elemanlardan kaynaklanmaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda girişe uygulanan sinyali üreten eviricinin tasarımı iyileştirilerek birincil sargıya tam bir sinüs formuna sahip sinyal uygulanarak verim yükseltilebilir. Yapılan çalışmada bobin sargılarının birbiri ile tam olarak hizalandığı durum baz alınmıştır, bu bobinlerin birbiri ile hizalanamadıkları durumdaki ortak endüktansa göre yeni bir kapasite hesabı yaparak devreye alınıp devreden çıkartılabilen bir değişken kapasite bağlanabilir. Ya da giriş frekansını değiştirerek tekrar rezonans elde etmeye yönelik çalışılabilir. Ayrıca tasarlanan KET sisteminin bir prototipi üretilerek sistemin çalışması gözlemlenebilir.

6. KAYNAKLAR

- A. Karalis, J.D. Joannopoulos, M. Soljagic. 2008. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of Physics* 34-38.
- A. Neves, D. M. Sousa, A. Roque, . 2011. Analysis of an inductive charging system for a commercial electric vehicle. *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*. Birmingham, UK: IEEE.
- Aboadla, Ezzidin Hassan Elmabrouk, Sheroz Khan, Mohamed Hadi Habaebi, Teddy Gunawan, Belal Ahmed Hamidah, Mashkuri Bin Yaacob. 2016. Effect of Modulation Index of Pulse Width Modulation inverter on Total Harmonic Distortion for Sinusoidal. *2016 International Conference on Intelligent Systems Engineering (ICISE)*. Islamabad, Pakistan.
- Alanson P. Sample, Joshua R. Smith. 2010. Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58 (2): 544-554.
- Aldhaher, Samer. 2014. PhD Thesis. Design and Optimization of Switched-Mode Circuits for Inductive Links. Cranfield University, School of Engineering.
- André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljačić. 2007. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science* 317 (5834): 83-86.
- Barranger, John. 1965. Hysteresis and Eddy-Current Losses of a Transformer lamination Viewed as an application of the Poynting Theorem. Cleveland, Ohio: NASA Technical Note.
- Cederlöf, Mikael. 2012. Master Thesis. Inductive Charging of Electrical Vehicles. Stockholm: KTH, School of Electrical Engineering (EES), Electromagnetic Engineering.
- Charles R. Sullivan, R. Y. Zhang. 2014. Simplified design method for litz wire. *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014* 2667-2674.
- Chinthavali, Madhu, Omer C. Onar. 2016. Tutorial on wireless power transfer systems. *IEEE Transportation Electrification Conference & Expo*. Dearborn, MI, USA.
- Chwei-Sen Wang, G.A. Covic, O.H. Stielau. 2004. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 51 (1): 148-157.
- Dai, Jiejian. 2015. A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Applications. *IEEE Transactions On Power Electronics* 30 (11): 6017-6029.
- F. Z. Shen, W. Z. Cui, W. Ma, J. T. Huangfu, L. X. Ran. 2010. Circuit analysis of wireless power transfer by “coupled magnetic resonance”. *IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2009)*. Shanghai, China, China.
- Fincan, B. 2015. Elektrikli Araçlar için Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fincan, B., Üstün Ö. 2015. A study on comparing analytical methods for coil design in high frequency wireless energy transfer. *2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (2015 WoW)*. Daejeon, South Korea: IEEE.

- Grant Anthony Covic, John Talbot Boys. 2013. Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 1 (1): 28-41.
- Grover, F. W. 1964. Chaps. 2 and 13. *Inductance Calculations*. New York: Dover.
- Hiroya Takanashi, Yukiya Sato, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe, Tomio Yasuda. 2012. A large air gap 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Raleigh, NC, USA: IEEE.
- Imura, Takehiro. 2010. Study on maximum air-gap and efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer using Equivalent Circuit. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Bari, Italy.
- Jaegue Shin, Seungyong Shin, Yangsu Kim, Seungyoung Ahn, Seokhwan Lee, Seong-Jeub Jeon, Dong-Ho Cho. 2013. Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 1179-1192.
- Jesús Acero, Pablo J. Hernández, José M. Burdío, Rafael Alonso, Luis A. Barragán. 2005. Simple Resistance Calculation in Litz-Wire Planar Windings for Induction Cooking Appliances. *IEEE Transactions On Magnetics* 41 (4): 1280-1288.
- Joaquin J. Casanova, Zhen Ning Low, Jenshan Lin. 2009. A Loosely Coupled Planar Wireless Power System for Multiple Receivers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56 (8): 3060-3068.
- John M. Miller, Omer C. Onar, Madhu Chinthavali. 2014. Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.
- Kenichiro Ogawa, Noriaki Oodachi, Shuichi Obayashi, Hiroki Shoki. 2012. A study of efficiency improvement of wireless power transfer by impedance matching. 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications. Kyoto, Japan.
- Kesler, Dr. Morris. 2013. Highly resonant wireless power transfer: Safe, Efficient, and over Distance. WiTricity Corporation.
- Leopold Summerer, Oisin Purcell, W.L. Brown. 2008. Concepts for wireless energy transmission via laser.
- Liguang Xie, Yi Shi, Y. Thomas Hou, Andwenjing Lou. 2013. Wireless power transfer and applications to sensor networks. *IEEE Wireless Communications* 20 (4): 140-145.
- Lundin, R. 1985. A handbook formula for the inductance of a single-layer circular coil. IEEE.
- Máñez, Alejandro Llop. 2014. Master Thesis. Optimization of Inductive Resonant Coupling Links for low Power and Mid-Range Wireless Power Transfer.
- Maxwell, J. Clerk. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 459-512.
- Maxwell, James Clerk. 1873. A Treatise. Electricity and Magnetism.
- Mickel Budhia, Grant A. Covic, John T. Boys. 2011. Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics* 11 (26): 3096 - 3108.
- Nave, C.R. 2013. Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials", "Iron". hyperphysics.

- Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins. 1989. Power Electronics. John Wiley & Sons Inc.
- Omer C. Onar, John M. Miller, Steven L. Campbell, Chester Coomer, Cliff. P. White, and Larry E. Seiber. 2013. Oak Ridge National Laboratory Wireless Power Transfer Development for Sustainable Campus Initiative. 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Detroit, MI, USA.
- P. Imbertson, N. Mohan. 1993. Asymmetrical duty cycle permits zero switching loss in PWM circuits with no conduction loss penalty. IEEE Transactions on Industry Applications 121-125.
- Pappas, P.T. 1983. The Original Ampere Force and Biot-Savart and Lorentz Forces. II Nuovo Cimento B 76 (2): 189-197.
- Pozar David M., 2005. Microwawave Engineering, 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc.
- Qi Jiang, Yuannian Qin, Yubin Zhao, Cheng-Zhong Xu, Xiaodong Wang. 2017. Maximum Power Transfer Scheme for Magnetic Resonance Charging System. 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). Taipei, Taiwan.
- Queiroz, Antonio Carlos M. de. 2005. Mutual Inductance and Inductance Calculations by Maxwell's Method.
- Rui Zhang, Chin Keong Ho. 2013. MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. IEEE Transactions on Wireless Communications 12 (5): 1989-2001.
- S. Y. R. Hui, Wenxing Zhong, C. K. Lee. 2013. A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer. IEEE Transactions on Power Electronics.
- Seung-Hwan Lee, Robert D. Lorenz. 2011. Development and Validation of Model for 95%-Efficiency 220-W Wireless Power Transfer Over a 30-cm Air Gap. IEEE Transactions on Industry Applications 47 (6): 2495-2504.
- Siqi Li, Chunting Chris Mi. 2017. Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 4-17.
- Su Y. Choi, Beom W. Gu, Seog Y. Jeong, Chun T. Rim. 2014. Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway-Powered Electric Vehicles. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 3 (1): 18-36.
- Sullivan, C.R. 1999. Optimal choice for number of strands in a litz-wire transformer winding. IEEE Transactions on Power Electronics 14 (2): 283-291.
- Takehiro Imura, Yoichi Hori. 2011. Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula. IEEE Transactions on Industrial Electronics 4746-4752.
- Takuya Ichihara, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara. 2012. Study on intermittent microwave power transmission to a ZigBee device. 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications. Kyoto, Japan: IEEE.
- Tang Zed (Zhanjun), Christini Mark, Koga Takahiro, 2012. Wireless Power Transfer using Maxwell and Simplorer. Automotive simulation World Congress, ANSYS Inc.
- Tesla, Nikola. 1900. U.S. Patent: 649,621.
- Wheeler, Harold A. 1928. Simple Inductance Formulas for Radio Coils. Proceedings of the Institute of Radio Engineers 16 (10): 1398 - 1400.
- Xinzhi Shi, Chang Qi, Meiling Qu, Shuangli Ye, Gaofeng Wang, Lingling Sun, Zhiping Yu. 2014. Effects of coil shapes on wireless power transfer via magnetic

- resonance coupling. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 28 (1316-1324): 11.
- Yiming Zhang, Zhengming Zhao, Kainan Chen., 2013. Frequency Decrease Analysis of Resonant Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics* 1058-1063.
- Young Chul Noh, Cheolung Cha, Jun Park, Jong Chan Choi, Moonil Kim. 2009. Optimized wireless power transmission circuit for energy transfer. *INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference*. Incheon, South Korea: IEEE.
- Zhichao Luo, Xuezhe Wei. 2018. Analysis of Square and Circular Planar Spiral Coils in Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles. *IEEE Transactions On Industrial Electronics* 65 (1): 331-341.



7. ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Isparta’da doğdu. İlköğretim ve lise eğitimlerini Isparta’da tamamladıktan sonra 2008 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü kazandı. 2013 yılında üniversite eğitimini tamamladı. ARTEM Mühendislik’te Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak çalıştıktan sonra 2014 yılında Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen görevine devam etmektedir. 2014 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladığı yüksek lisans eğitimini 2017 yılında, halen devam ettiği GOP Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı’na yatay geçiş ile taşımıştır. Evli ve bir çocuk babasıdır