İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bager ÖZBEY

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bager ÖZBEY
(504181006)

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Murat YILMAZ

AĞUSTOS 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504181006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Bager ÖZBEY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Dr. Öğr. Üyesi Murat YILMAZ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Dr. Öğr. Üyesi Deniz YILDIRIM** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. K. Nur BEKİROĞLU Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 18 Temmuz 2020
Savunma Tarihi : 18 Ağustos 2020

ÖNSÖZ

Öncelikli olarak tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat Yılmaz'a desteği ve rehberliği için teşekkür etmek isterim. Ayrıca çalışma arkadaşım Y. Müh. Bekir Fincan'a da destekleri için teşekkür ederim.

Akademik anlamdaki desteklerin yanı sıra yüksek lisans öğrenimim süresince bana manevi anlamda destek olan aileme ve sevdiklerime de minnettarım. Onların sayesinde kararlı duruşumu devam ettirebildim.

Temmuz 2020

Bager Özbey
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
SEMBOLLER ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi 1
1.2 Batarya Şarj Sistemleri 3
1.2.1 Kablolu şarj sistemi 3
1.2.2 Kablosuz şarj sistemi 6
1.3 Tezin Amacı 10
1.4 Literatür Araştırması 11
1.5 Hipotez 17
2. KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMLERİNİN TEMEL PRENSİPLERİ **19**
2.1 Kablosuz Şarj Sistemlerinde Rezonans Çeviriciler 20
2.2 Kompanzasyon Devreleri 21
2.3 Verici (Primer) ve Alıcı (Sekonder) Bobinler 23
2.4 Kablosuz Şarj Sisteminin Matematiksel Modeli 24
2.5 Kablosuz Enerji Transferinde Kayıplar 27
2.5.1 Deri etkisi 28
2.5.2 Yakınlık etkisi 28
2.5.3 Litz teli 28
3. OPTİMİZE EDİLECEK ŞARJ SİSTEMİNİN İNCELENMESİ **29**
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) 29
3.2 LTspice Ortamında Benzetişim 31
3.3 Optimize Edilecek Kablosuz Şarj Sistemi 31
3.3.1 Bobin topolojisi seçimi 31
3.3.1.1 D topolojisi tasarımı 31
3.3.1.2 DD topolojisi tasarımı 33
3.3.2 Kompanzasyon topolojisi seçimi 35
3.3.3 LCC topolojinin analizi 36
3.3.4 Devre modelinin LTspice ortamında oluşturulması 37
3.3.5 Yumuşak anahtarlama 39
3.4 Optimize Edilecek Sistemin İncelenmesi 40
4. KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMİNİN OPTİMİZASYONU **43**
4.1 Bobinlerin Boyutları, Kesit Alanları, Sarım Sayısı, Sarım Aralığı ve Hava Boşluğunun Belirlenmesi 43

4.2 Ferrit Malzemenin Boyutlarının, Sayısının ve Yerleşiminin Belirlenmesi 56
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 73
6. SONUÇLAR VE İLERİYE YÖNELİK ÇALIŞMALAR 75
KAYNAKLAR 77
EKLER 85
ÖZGEÇMİŞ 95

KISALTMALAR

AC	**:** Alternatif Akım **(**Alternative Current)
DC	**:** Doğru Akım (Direct Current)
ESR	**:** Eşdeğer Seri Direnç (Equivalent Series Resistor)
EV	**:** Elektrikli Araç **(**Electric Vehicle)
KET	**:** Kablosuz Enerji Transferi
HEV	**:** Hibrit Elektrikli Araç
PMSM	**:** Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SEY	**:** Sonlu Elemanlar Yöntemi
DF	**:** Kayıp Faktörü (Dissipation Factor)
PFC	**:** Güç Faktörü Düzeltici (Power Factor Correction)
EM	**:** Elektromanyetik
GF	**:** Güç Faktörü
ICE	**:** İçten Yanmalı Motor (Internal Combustion Engine)
IPT	**:** Endüktif Güç Transferi (Inductive Power Transfer)
BYS	**:** Batarya Yönetim Sistemi
SAE	**:** Society of Automotive Engineers
IEEE	**:** Institute of Electrical and Electronic Engineers
ISO	**:** International Organization for Standardization
IEC	**:** International Electro-mechanical Commission
JEVS	**:** Japan Electric Vehicle Association
ZCS	**:** Sıfır Akımda Anahtarlama (Zero Current Switching)
ZVS	**:** Sıfır Gerilimde Anahtarlama (Zero Voltage Switching)

SEMBOLLER

L_1 : Primer Bobin Endüktansı [µH]
L_2 : Sekonder Bobin Endüktansı [µH]
L_{f1} : Primer Kompanzasyon Bobini Endüktansı [µH]
L_{f2} : Sekonder Kompanzasyon Bobini Endüktansı [µH]
L_p : Primer Bobin Endüktansı [µH]
L_s : Sekonder Bobin Endüktansı [µH]
C_1 : Primer Seri Kapasitör Kapasitansı [nF]
C_2 : Sekonder Seri Kapasitör Kapasitansı [nF]
C_{f1} : Primer Paralel Kapasitör Kapasitansı [nF]
C_{f2} : Sekonder Paralel Kapasitör Kapasitansı [nF]
R_1 : Primer Bobin Direnci [mΩ]
R_2 : Sekonder Bobin Direnci [mΩ]
R_{C1} : Primer Seri Kapasitör Eşdeğer Seri Direnci [mΩ]
R_{C2} : Sekonder Seri Kapasitör Eşdeğer Seri Direnci [mΩ]
R_{Cf1} : Primer Paralel Kapasitör Eşdeğer Seri Direnci [mΩ]
R_{Cf2} : Sekonder Paralel Kapasitör Eşdeğer Seri Direnci [mΩ]
R_{f1} : Primer Kompanzasyon Bobini Direnci [mΩ]
R_{f2} : Sekonder Kompanzasyon Bobini Direnci [mΩ]
R_L : Endüktans İç Direnci [Ω]
N_1 : Primer Bobin Sarım Sayısı
N_2 : Sekonder Bobin Sarım Sayısı
N_{f2} : Kompanzasyon Bobini Sarım Sayısı
k_{12} : Primer-Sekonder Bobinler Arası Bağlantı Katsayısı
k_{13} : Primer-Kompanzasyon Bobinleri Arası Bağlantı Katsayısı
k_{23} : Sekonder-Kompanzasyon Bobinleri Arası Bağlantı Katsayısı
M_{12} : Primer ve Sekonder Bobinler Arasındaki Ortak Endüktans [µH]
M_{13} : Primer ve Kompanzasyon Bobini Arasındaki Ortak Endüktans [µH]
M_{23} : Sekonder ve Kompanzasyon Bobini Arası Ortak Endüktans [µH]
g : Primer ve Sekonder Bobinler Arası Hava Aralığı [mm]
f : Frekans [Hz]
Φ : Faz
w_1 : Primer Bobin Genişliği [mm]
w_2 : Sekonder Bobin Genişliği [mm]
w_{f2} : Kompanzasyon Bobini Genişliği [mm]
l_1 : Primer Bobin Uzunluğu [mm]
l_2 : Sekonder Bobin Uzunluğu [mm]
l_{f2} : Kompanzasyon Bobini Uzunluğu [mm]
q_1 : Primer Bobin Kesit Alanı [mm^2]
q_2 : Sekonder Bobin Kesit Alanı [mm^2]
q_{f2} : Kompanzasyon Bobini Kesit Alanı [mm^2]
a_1 : Primer Bobin Sarım Aralığı [mm]
a_2 : Sekonder Bobin Sarım Aralığı [mm]

a_{f2} : Kompanzasyon Bobini Sarım [mm]
l_{ferrit} : Ferrit Uzunluğu [mm]
q_{ferrit} : Ferrit Kesit Alanı [mm^2]
a_{ferrit} : Ferrit Sıraları Arası Hava Boşluğu [mm]
N_{ferrit_s} : Bir Sıradaki Birbirine Seri Ferrit Sayısı
N_{ferrit_p} : Birbirine Paralel Ferrit Sıraları Sayısı
I_p : Primer Akımı [A]
$I_{sargı}$: Sargı Akımı [A]
I_{sc} : Kısa Devre Akımı [A]
k : Bağlantı Katsayısı
M : Ortak Endüktans
P : Aktif Güç [kW]
P_{max} : Maksimum Aktif Güç [kW]
Q : Kalite Faktörü
S : Görünür Güç [kVA]
V_{oc} : Sekonder Açık Devre Gerilimi [V]
$V_{sargı}$: Sargı Gerilimi [V]
η : Verim
S_b : Bobin Yüzey Alanı [mm^2]

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Elektrikli araçlar için AC-DC şarj seviyeleri ve soketleri. **4**
Çizelge 1.2 : e-Şarj AC-DC şarj tarifeleri. **6**
Çizelge 1.3 : ZES AC-DC şarj tarifeleri. **6**
Çizelge 1.4 : Statik şarj - üniversite çalışmaları. **11**
Çizelge 1.5 : Statik şarj – özel şirket çalışmaları. **12**
Çizelge 1.6 : Dinamik şarj – arge çalışmaları. **12**
Çizelge 1.7 : Elektrikli araçlardaki KET ile ilgili uluslararası standartlar. **17**
Çizelge 2.1 : Temel kompanzasyon topolojileri karşılaştırması [7]. **22**
Çizelge 2.2 : Bobin topolojileri karşılaştırması [63]. **24**
Çizelge 3.1 : D topolojide bağlantı katsayısının hizalama hatasına göre değişimi. **33**
Çizelge 3.2 : Optimize edilecek sisteme ait mesh bilgileri. **35**
Çizelge 3.3 : DD topolojide bağlantı katsayısının hizalama hatasına göre değişimi. **35**
Çizelge 3.4 : Optimize edilecek sistemdeki bobin parametreleri. **40**
Çizelge 3.5 : Optimize edilecek sistemdeki ferrit parametreleri. **41**
Çizelge 3.6 : Optimize edilecek kablosuz şarj sisteminin genel parametreleri. **41**
Çizelge 3.7 : Optimize edilecek sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **42**
Çizelge 3.8 : Optimize edilecek sistemin verim analizi çıktıları. **42**
Çizelge 4.1 : İkinci sistemde değişen parametreler. **44**
Çizelge 4.2 : İkinci sistemdeki bobin parametreleri. **44**
Çizelge 4.3 : İkinci sisteminin genel parametreleri. **44**
Çizelge 4.4 : İkinci sistemdeki ferrit parametreleri. **45**
Çizelge 4.5 : İkinci sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **45**
Çizelge 4.6 : İkinci sistemin verim analizi çıktıları. **45**
Çizelge 4.7 : Üçüncü sistemde değişen parametreler. **45**
Çizelge 4.8 : Üçüncü sistemdeki bobin parametreleri. **46**
Çizelge 4.9 : Üçüncü sistemdeki ferrit parametreleri. **46**
Çizelge 4.10 : Üçüncü sisteminin genel parametreleri. **46**
Çizelge 4.11 : Üçüncü sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **46**
Çizelge 4.12 : Üçüncü sistemin verim analizi çıktıları. **47**
Çizelge 4.13 : Dördüncü sistemde değişen parametreler. **47**
Çizelge 4.14 : Dördüncü sistemdeki bobin parametreleri. **48**
Çizelge 4.15 : Dördüncü sistemdeki ferrit parametreleri. **48**
Çizelge 4.16 : Dördüncü sisteminin genel parametreleri. **48**
Çizelge 4.17 : Dördüncü sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **48**
Çizelge 4.18 : Dördüncü sistemin verim analizi çıktıları. **49**

Çizelge 4.19 : Beşinci sistemde değişen parametreler. **49**
Çizelge 4.20 : Beşinci sistemdeki ferrit parametreleri. **49**
Çizelge 4.21 : Beşinci sistemdeki bobin parametreleri. **50**
Çizelge 4.22 : Beşinci sisteminin genel parametreleri. **50**
Çizelge 4.23 : Beşinci sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **50**
Çizelge 4.24 : Beşinci sistemin verim analizi çıktıları. **51**
Çizelge 4.25 : Altıncı sistemde değişen parametreler. **51**
Çizelge 4.26 : Altıncı sistemdeki bobin parametreleri. **51**
Çizelge 4.27 : Altıncı sistemdeki ferrit parametreleri. **51**
Çizelge 4.28 : Altıncı sisteminin genel parametreleri. **52**
Çizelge 4.29 : Altıncı sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **52**
Çizelge 4.30 : Altıncı sistemin verim analizi çıktıları. **52**
Çizelge 4.31 : 6_1. sistemdeki ferrit parametreleri. **53**
Çizelge 4.32 : 6_1. sistemdeki bobin parametreleri. **54**
Çizelge 4.33 : 6_1. sisteminin genel parametreleri. **54**
Çizelge 4.34 : 6_1. sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **54**
Çizelge 4.35 : 6_1. sistemin verim analizi çıktıları. **54**
Çizelge 4.36 : 6_2. sistemdeki bobin parametreleri. **55**
Çizelge 4.37 : 6_2. sistemdeki ferrit parametreleri. **55**
Çizelge 4.38 : 6_2. sisteminin genel parametreleri. **55**
Çizelge 4.39 : 6_2. sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **55**
Çizelge 4.40 : 6_2. sistemin verim analizi çıktıları. **56**
Çizelge 4.41 : Yedinci sistemdeki bobin parametreleri. **58**
Çizelge 4.42 : Yedinci sistemdeki ferrit parametreleri. **58**
Çizelge 4.43 : Yedinci sisteminin genel parametreleri. **59**
Çizelge 4.44 : Yedinci sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **59**
Çizelge 4.45 : Yedinci sistemin verim analizi çıktıları. **59**
Çizelge 4.46 : Sekizinci sistemde değişen parametreler. **60**
Çizelge 4.47 : Sekizinci sistemdeki bobin parametreleri. **61**
Çizelge 4.48 : Sekizinci sistemdeki ferrit parametreleri. **61**
Çizelge 4.49 : Sekizinci sisteminin genel parametreleri. **61**
Çizelge 4.50 : Sekizinci sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **61**
Çizelge 4.51 : Sekizinci sistemin verim analizi çıktıları. **62**
Çizelge 4.52 : Dokuzuncu sistemde değişen parametreler. **62**
Çizelge 4.53 : Dokuzuncu sistemdeki bobin parametreleri. **62**
Çizelge 4.54 : Dokuzuncu sisteminin genel parametreleri. **63**
Çizelge 4.55 : Dokuzuncu sistemdeki ferrit parametreleri. **63**
Çizelge 4.56 : Dokuzuncu sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **63**
Çizelge 4.57 : Dokuzuncu sistemin verim analizi çıktıları. **63**
Çizelge 4.58 : Ferritler arası mesafeye göre bağlantı katsayısındaki değişim. **64**
Çizelge 4.59 : Onuncu sistemdeki ferrit parametreleri. **64**
Çizelge 4.60 : Onuncu sistemdeki bobin parametreleri. **65**
Çizelge 4.61 : Onuncu sisteminin genel parametreleri. **65**

Çizelge 4.62 : Onuncu sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi. **65**
Çizelge 4.63 : Onuncu sistemin verim analizi çıktıları. **66**
Çizelge 4.64 : ANSYS Maxwell tasarımındaki elemanlara ait kayıplar. **66**
Çizelge 4.65 : Onuncu sistem için değişken yük durumu analizi. **66**
Çizelge 4.66 : Ferrit optimizasyonu maliyet analizi. **68**
Çizelge 4.67 : Onuncu sisteme ait mesh bilgileri. **69**
Çizelge 4.68 : Sistem optimizasyonunda değişen parametreler. **72**
Çizelge 6.1 : İlk sistem ile optimize sistemin karşılaştırması **76**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : AC soketler: (a) Tip-1 SAE J1772. (b) Tip-2 Mennekes. (c) Tesla [4]. **4**
Şekil 1.2 : DC soketler: (a) CCS ABD tipi. (b) Avrupa tipi. (c) Chademo [4]. **5**
Şekil 1.3 : Seviye 1 ve 2 için kullanılan tek yönlü şarj topolojisi [5]. **5**
Şekil 1.4 : Seviye 3 için kullanılan çift yönlü şarj topolojisi [5]. **5**
Şekil 1.5 : Kapasitif KET temel blok diyagramı [7]. **7**
Şekil 1.6 : Endüktif KET temel blok diyagramı [7]. **7**
Şekil 1.7 : Manyetik dişli KET temel blok diyagramı [7]. **7**
Şekil 1.8 : Rezonant endüktif KET temel blok diyagramı [7]. **8**
Şekil 1.9 : Toyota Prius durağan şarj sistemi [8]. **8**
Şekil 1.10 : BMW durağan şarj sistemi [9]. **9**
Şekil 1.11 : Tesla durağan şarj sistemi [10]. **9**
Şekil 1.12 : EV'ler için kablosuz şarj yöntemleri [11]. **10**
Şekil 1.13 : Bobin yapıları: (a) Dairesel. (b) Kare. (c) Dikdörtgen. (d) DD. (e) BP. (f) DDQ. (g) QDQ [7]. **14**
Şekil 1.14 : DD bobin topolojisi [44]. **14**
Şekil 1.15 : DDQ bobin topolojisi [50]. **15**
Şekil 1.16 : Ferrit yapıları: (a) Dairesel. (b) Dairesel çubuk. (c) Kare. (d) Dikdörtgen. (e) T çekirdek. (f) U çekirdek. (g) E çekirdek. (h) Çift-U çekirdek. (i) I çekirdek [7]. **16**
Şekil 1.17 : Dairesel bobin ve ekranlayıcının konumlandırılması [63]. **17**
Şekil 2.1 : Kablosuz şarj sistemi blok diyagramı [64]. **19**
Şekil 2.2 : KET temel prensibi [63]. **20**
Şekil 2.3 : Kablosuz şarj sistemi detaylı blok diyagramı [63]. **20**
Şekil 2.4 : Rezonans çevirici topolojisi [19]. **21**
Şekil 2.5 : Temel kompanzasyon topolojileri [64]. **22**
Şekil 2.6 : KET topolojisi [76]. **23**
Şekil 2.7 : Sargı eşdeğer devresi. **25**
Şekil 2.8 : Sekonderdeki seri kompanzasyon. **26**
Şekil 3.1 : Maxwell ve LTspice için simülasyona giren-çıkan parametrelere ait akış diyagramı. **29**
Şekil 3.2 : Bir DD tip bobinin SEY modeli. **30**
Şekil 3.3 : Maxwell'de dairesel bobinler ile tasarlanan bir sistemin SEY modeli. ... **30**
Şekil 3.4 : ANSYS Maxwell'de tasarlanan D bobinler: (a) 35 µH. (b) 231 µH. **32**
Şekil 3.5 : Tasarlanan D bobinde manyetik akı yoğunluğu. **32**
Şekil 3.6 : D bobinler ve ferritler ile oluşturulan sistem. **33**
Şekil 3.7 : ANSYS Maxwell'de oluşturulan DD bobin: 231 µH. **34**
Şekil 3.8 : Tasarlanan DD bobinde manyetik akı yoğunluğu. **34**
Şekil 3.9 : DD bobinler ve ferritler ile oluşturulan sistem. **34**
Şekil 3.10 : LCC topolojisi [74]. **36**
Şekil 3.11 : Rezonans çevirici LCC topoloji eşdeğer devresi. **36**

Şekil 3.12 : LTspice'ta modellenen şarj sistemi. **38**
Şekil 3.13 : Anahtarlama kaybı: (a) Sert anahtarlama. (b) Yumuşak anahtarlama. .. **39**
Şekil 3.14 : Sert ve yumuşak anahtarlama akım-gerilim dalga şekilleri [8]. **40**
Şekil 3.15 : 3C90 tip ferrit için güç kaybı-manyetik akı grafiği. **41**
Şekil 3.16 : Optimize edilecek kablosuz şarj sistemi. **42**
Şekil 4.1 : Tasarlanan sistemlere göre $\boldsymbol{\eta/Sb}$ değişimi. **53**
Şekil 4.2 : 3C94 tip ferrit için güç kaybı-manyetik akı grafiği. **57**
Şekil 4.3 : Tasarlanan altıncı sistem. **57**
Şekil 4.4 : Tasarlanan yedinci sistem. **58**
Şekil 4.5 : N87 tip ferrit için güç kaybı-manyetik akı grafiği. **60**
Şekil 4.6 : Tasarlanan sekizinci sistem. **60**
Şekil 4.7 : Tasarlanan dokuzuncu sistem. **64**
Şekil 4.8 : Onuncu sistem için değişken yük analizine ait çıkış gücü ve verim grafikleri. **67**
Şekil 4.9 : Tasarlanan onuncu sistem. **67**
Şekil 4.10 : Sekonder taraftaki ferrit üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı. . **68**
Şekil 4.11 : Onuncu sisteme ait mesh dağılımı. **69**
Şekil 4.12 : Onuncu sisteme ait manyetik akı çizgileri. **69**
Şekil 4.13 : Onuncu sisteme ait LTspice'tan alınan bobin akım dalga şekilleri. **70**
Şekil 4.14 : Onuncu sisteme ait LTspice'tan alınan yük akım-gerilim dalga şekilleri. **70**
Şekil 4.15 : M1 ve M3 mosfetlere ait LTspice'tan alınan ZVS dalga şekilleri. **70**
Şekil 4.16 : M2 ve M4 mosfetlere ait LTspice'tan alınan ZVS dalga şekilleri. **71**

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Son yıllarda elektrikli araçlara olan ilgi oldukça artmış olup büyük otomotiv firmaları başta olmak üzere birçok firma tarafından hibrit ve elektrikli araç piyasaya sürülmüştür. Bunun başlıca sebeplerinden biri içten yanmalı motora sahip araçların ciddi ekolojik etkileri olmasıdır. Fosil yakıt kullanımı karbon emisyonunu arttırmasından dolayı küresel ısınma etkisini de artırmaktadır. Karbon emisyonunun artması sebebiyle uluslararası örgütler, hükümetler çeşitli önlemler almaya başlamıştır. Alınan bu önlemler kapsamında orta vadeli olarak içten yanmalı motora sahip araçların şehir merkezlerine girişi yasaklanacaktır. Uzun vadede ise ekolojik anlamda zararlı etkileri olmayan araçların kullanımının teşvik edilip, içten yanmalı araç kullanımının tamemen yasaklanması planlanmaktadır.

Elektrikli araçlar içten yanmalı motora sahip araçlara kıyasla daha yüksek verime sahiptir. Ayrıca çevre kirliliğine sebebiyet vermezler. Bu yüzden de dünyanın önde gelen otomobil üreticileri uygulanacak kısıtlamaları da göz önüne alarak elektrikli otomobil piyasasına girmiştir. Yapılan yatırımların her geçen yıl arttığı elektrikli araçlar piyasasında gelişmeler çok hızlı şekilde gerçekleşmektedir.

Elektrikli araçların tüm bu olumlu taraflarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Elektrikli araçlar içten yanmalı motora sahip araçlara nazaran daha düşük menzile sahiptir ve sık sık şarj edilmesi gerekir. İnsanların hala içten yanmalı araçları tercih etmesindeki en büyük sebep menzil ve yolda kalma endişesidir. Bu sorunun önüne geçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmektedir.

Geliştirilen hızlı şarj teknolojisi batarya şarjının süresini kısaltmıştır. Fakat batarya şarjının iletkenler yoluyla gerçekleştirilmesi güvenlik açısından risk oluşturmaktadır. Ayrıca kabloların getirmiş olduğu karmaşıklık ve hızlı şarjın şebeke üzerine etkileri bu yöntemin eksi yönleri olarak ön plana çıkmaktadır. Bunun da önüne geçmek amacıyla son yıllarda kablosuz şarj teknolojisi üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Kablosuz şarj teknolojisinin temel mantığı iletken teması olmadan gücün primer taraftan sekonder tarafa aktarılmasıdır. Gücün aktarımı sırasında hizalama hatasının minimum, kuplajın maksimum ve verimin yüksek olması istenen önemli özelliklerdir. Özellikle son 10 yıl içerinde yapılan çalışmalar ve yayınlar incelendiğinde bütün bu özellikleri sağlayacak şekilde hem bobin hem de güç elektroniği sistemi tarafında birçok tasarım geliştirildiği görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında, yüksek verim ve kuplaj sağlanacak şekilde bir kablosuz şarj sisteminin tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında dairesel, D ve DD bobin topolojileri oluşturulan sistemlerin farklı hizalama hatası durumlarında bağlantı katsayısının değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucu diğer topolojilere oranla daha yüksek hizalama hatası toleransına sahip olan

DD topolojisinde karar kılınmıştır. Bobin topolojisinin seçiminin ardından sistemde kullanılacak kompanzasyon topolojisi, incelenen diğer temel topolojilere oranla daha yüksek verimle güç taşınmasına imkan veren LCC topolojisi olarak seçilmiştir. Tasarlanan sistemin farklı hizalama hatalarında verim analizi yapılmış ve bağlantı katsayısındaki değişim incelenmiştir. Tasarlanan sistem ile 200 mm hava aralığında tam hizalı durumda yaklaşık 3.3 kW'lık güç primer taraftan sekonder tarafa %94.95 verimle aktarılmıştır. Ayrıca tam hizalı durumda elde edilen bağlantı katsayısı ise k_{12} = 0.2693'tür. Tasarım sürecinin ardından sistemin optimizasyonuna geçilmiştir. Bu optimizasyon kapsamında primer, sekonder ve kompanzasyon bobinlerinin sarım sayıları ve sarım aralıkları, primer ve sekonder bobinler arası mesafe (hava aralığı) belirlenmiştir. Ayrıca primer ve sekonder bobinlerin yüzey alanlarının birbirlerine göre durumları incelenmiş, bu durumların bağlantı katsayısına ve verime olan etkisi belirlendikten sonra bobin sisteminin optimizasyonu tamamlanmıştır. Tamamlanan bobin sistemi optimizasyonunun ardından kaçak akıların azaltılarak verimi artıracak yönde ferrit sisteminin optimizasyonuna geçilmiştir. Ferrit sistemi optimizasyonu kapsamında, ferritlerin malzemesi, boyutları, sayısı ve birbirlerine göre konumlarının sisteme etkisi incelenmiştir. Optimizasyon süresince analitik analizlerle beraber elektromanyetik analizler ANSYS Maxwell sonlu elemanlar analiz programı ortamında gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler ile oluşturulan LTspice ortamındaki güç elektroniği devre modelini de kapsayan tüm sistem modeli üzerinden benzetişim gerçekleştirilmiştir. Giriş gücü, çıkış gücü ve verim üzerinden yapılan parametrik optimizasyon ve kıyaslamalar sonucu Maxwell'de oluşturulan sistemlerde değiştirilen parametrelerin sisteme etkisi gözlemlenmiştir. İlk sisteme oranla tasarlanan yeni sistemin hacmi %35 azaltılmıştır. Optimizasyon sonucunda tasarlanan sistem ile 150 mm hava aralığında 3.3 kW'lık güç, primer taraftan sekonder tarafa %91.47 verimle aktarılmıştır. Tam hizalı durumda elde edilen bağlantı katsayısı ise k_{12} = 0.245'tir. Bağlantı katsayısının ve verimin hizalama hatalarına göre değişimi ayrıntılı olarak ele alınarak analiz edilmiştir. En olumsuz senaryoda bile %87 verim ve k_{12} = 0.194 değerleri elde edilmiştir. Optimizasyon sonucu tasarlanan kablosuz şarj sisteminin hizalama hatalarına karşı yüksek toleransa sahip olduğu görülmüştür.

Sistemin optimizasyonun ardından donanımsal tasarımına geçilmiştir. Bu kapsamda rezonans çeviricinin çizimine Altium Designer programında başlanmıştır. Kablosuz şarj sisteminde rezonans çevirici ile birlikte kullanılacak olan N87 ferritler ve bobinler için gerekli malzemelerin temin edilmesindeki sorunlardan dolayı deneysel çalışmalar devam etmektedir.

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A WIRELESS CHARGING SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES

SUMMARY

The interest in electric vehicles (EVs) has increased in recent years. One of the main reasons for this is that vehicles with an internal combustion engine have serious ecological effects. Since fossil fuel use increases carbon emissions, it also increases the global warming effect. Due to the increase in carbon emissions, international organizations and governments have started to take various measures. Within the scope of these measures, vehicles with an internal combustion engine (ICE) will be banned from the city centers. In the long term, it is planned to encourage the use of vehicles without ecologically harmful effects and to ban the use of internal combustion vehicles completely.

Electric vehicles have higher efficiency compared to vehicles with internal combustion engines. Also, they do not cause environmental pollution. For this reason, the leading car manufacturers of the world have entered the electric car market considering the restrictions to be applied. In the electric vehicles market, where investments are increasing every year, developments are taking place very quickly.

Besides all these positive aspects of electric vehicles, there are also some disadvantages. Electric vehicles have a lower range than vehicles with an internal combustion engine and need frequent recharging. The biggest reason people still prefer internal combustion vehicles is range and road anxiety. Various methods are being developed to prevent this problem.

The idea of wireless power transfer, which is also used for charging electric vehicles, was first proposed by Nikola Tesla in 1899. This project, which aims to facilitate the transportation of electricity to the houses, has not been realized due to technical and financial reasons, but it has been a great inspiration for the future projects. Since the second half of the 20th century, especially in the last 20 years, the studies for the transfer of energy wirelessly are increasing. Wireless power transfer is of great importance in the development of topics such as electric vehicles, mobile phones, biomedical and smart grids.

The developed fast charging technology has shortened the duration of the battery charge. However, performing battery charging through conductors poses a risk to safety. In addition, the complexity of the cables and the effects of fast charging on the grid come to the fore as negative aspects of this method. In order to prevent this, studies on wireless charging technology have been started in recent years.

The basic logic of wireless charging technology is to transfer power from the primary side to the secondary side without conductive contact. During the transfer of power, minimum alignment error, maximum coupling and high efficiency are important features. Especially when the studies and publications made in the last 10 years are

examined, it is seen that many designs have been developed on the side of both the coil and power electronics systems to provide all these features.

Within the scope of the thesis, a design and optimization of a wireless charging system has been carried out in order to ensure high efficiency and coupling. During the design phase, the variation of the coupling coefficient in the case of different alignment errors of the systems with circular, D and DD coil topologies were examined. As a result of the examinations, the DD topology, which has higher alignment error tolerance than other topologies, has been decided.

Following the selection of the coil topology, the compensation topology to be used in the system has been chosen as the LCC topology, which allows to carry power with higher efficiency compared to other basic topologies examined. The efficiency analysis of the designed system in different alignment errors was made and the change in the coupling coefficient was examined. With the designed system, approximately 3.3 kW of power was transferred from the primary side to the secondary side in 94.95% efficiency at full alignment in the 200 mm air gap. In addition, the coupling coefficient obtained in full alignment is $k_{12} = 0.2693$.

After the design process, the system was optimized. Within the scope of the coil system optimization, the winding numbers and winding intervals of the primary, secondary and compensation coils were first determined. One of the biggest problems of wireless charging systems, the volume problem is solved by reducing the size of the coils in the system and making them more compact.

In the first step, reducing the coil sizes has reduced the coupling coefficient between primary and secondary coils in the system. The decrease in the coupling coefficient affects the efficiency. Due to the decrease in the coefficient of coupling between primary and secondary coils, the distance (air gap) between primary and secondary coils has been reduced in a way that does not contradict the way the system is used. With this arrangement, the coupling coefficient has been increased. The coil sizes determined at this stage are equal to each other.

Then, the situations where the surface areas of the primary and secondary coils are different are examined, and after determining the effect of these situations on the coupling coefficient and efficiency, the coil system has been optimized and the dimensions of the coils should be the same.

After the completed coil system optimization, the optimization of the ferrite system was started in order to increase the efficiency by reducing the leakage fluxes. Within the scope of the ferrite system optimization, the effect of the material, size, number and location of the ferrites on the system were examined.

Within the scope of the ferrite system optimization, firstly, the material and dimensions of the ferrites were studied. When using 3C90 type ferrites previously, a 3C94 type ferrite with the same length but narrower cross-sectional area was tried. Another ferrite with a shorter and lower cross-section area was tried when it was observed that the total ferrite volume used decreased but it did not have any adverse effect on the system. As a result of the analyzes made with N87 type ferrite, it was decided that the ferrite material would be N87 type.

After selecting the ferrite material, efforts were made to reduce the number of ferrite bars used in the system. In this context, the number of ferrites in series has been reduced and this number has been reduced to two while previously using three rows of ferrite parallel to each other. As a result of these studies, it was observed that

although the number of ferrites was reduced, there was no negative effect on the system.

Then, the effect of the distance between two ferrite rows parallel to each other on the coupling coefficient was investigated. As a result of this examination, the distance between ferrite rows that maximizing the coupling coefficient was found and the optimization of the ferrite system was also completed. Changes in efficiency and coupling coefficient according to the alignment errors of the optimized wireless charging system were analyzed.

During the optimization, along with analytical analysis, electromagnetic analysis was carried out in ANSYS Maxwell finite element analysis program environment and simulation was performed over the entire system model, including the power electronics circuit model in LTspice environment created with the data obtained. As a result of parametric optimization and comparisons over input power, output power and efficiency, the effects of the parameters changed on the systems created in Maxwell were observed. The volume of the new system, which was designed in comparison with the first system, was reduced by 35%. With the system designed as a result of the optimization, 3.3 kW of power in the 150 mm air gap was transferred from the primary side to the secondary side in 91.47% efficiency. The coupling coefficient obtained in full alignment is $k_{12} = 0.245$. The variation of the coupling coefficient and efficiency according to the alignment errors are analyzed by analyzing them in detail. Even in the worst scenario, 87% efficiency and $k_{12} = 0.194$ values were obtained. This shows that the designed system has a high tolerance for misalignment.

After the optimization of the system, the hardware design was started. In this context, the drawing of the resonant converter is started in the Altium Designer program. Experimental studies are ongoing due to the problems in supplying the necessary materials ,such as N87 ferrites and coils, that will be used with the resonance converter in the wireless charging system.

1. GİRİŞ

Fosil yakıt kullanımı, yaşadığımız gezegen için büyük tehdit oluşturan küresel ısınmanın en büyük sebebi olan karbon emisyonunu artırmaktadır. Karbon emisyonunu azaltmak amacıyla komisyonlar ve hükümetler tarafından uygulanan kısıtlar, otomotiv sektöründe fosil yakıt kullanımı yerine farklı çözümler bulma ihtiyacını oluşturmuştur. Ekolojik nedenlerin yanı sıra, son yıllarda petrol kaynaklarındaki azalmaya bağlı olarak fosil yakıtların fiyatlarında artış meydana gelmiştir. Bunlara bağlı olarak, otomotiv sektörünün hem ekonomik hem de ekolojik nedenlerle geleneksel içten yanmalı araçların yerine elektrikli ve hibrit araç teknolojisine yatırım yapma zorunluluğu doğmuştur.

1.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi

Son dönemde ortaya çıkan gerekliliklerden bağımsız olarak elektrikli araçların tarihçesi bundan yaklaşık 200 yıl öncesine dayanmaktadır. 1834 yılında Thomas Davenport batarya beslemeli bir elektrik motoru geliştirmiştir [1]. Bu elektrik motorunu kısa mesafelerde kullanılan küçük bir model araca yerleştirmiştir. 1837 yılında ise yaptığı bu çalışmanın patentini almıştır ve bu patent Amerika'da bir elektrik motoru üzerine alınan ilk patent olmuştur [2]. 1837 yılında batarya beslemeli bir elektrikli lokomotif modeli geliştirmiştir. Bu model insan veya yük olmadan saatte 4 mil hızla gidebiliyordu. 1859 yılında Fransız fizikçi Gaston Plante kurşun-asit bataryayı geliştirmiştir. Bu batarya tipi şarj edilebilir bataryaların ilki olup günümüzde daha çok geleneksel taşıt araçlarında (ICE araçlar) marş motorunun ilk hareketi sağlamak amacıyla ve elektrikli bisiklet, golf arabası, scooter gibi elektrikli taşıt aracı kategorisine girmeyen kısa menzilli hafif araçlarda kullanılmaktadır. 1881 yılında Prof. William Ayrton ve John Perry onar adet kurşun-asit batarya ile beslenen 3 adet tekerlekli araç geliştirmiştir. Bu araçlar araziye göre 16-20 km menzilli olup saatte 14 km azami hıza sahipti. 1897'de Electric Carriage & Vagon Company tarafından geliştirilen elektrik motorlu arabalar, New York şehrinde taksi olarak kullanılmaya başlandı ve bu uygulama elektrikli araçların ilk ticari uygulaması olarak tarihe geçti

[3]. 1901 yılında Ferdinand Porsche tarafından geliştirilen araç ilk hibrit araç olarak tarihe geçmiştir. Bu araçta içten yanmalı motora ek olarak her bir tekerlekte elektrik motorları kullanılmıştır. Tekerlek içine yerleştirilen bu motorlar literatürde "Hub Motor" olarak geçmektedir ve geleneksel elektrik motorundan farklı olarak tekerleğin yapısı gereği statoru içeride, rotoru ise dışarıda bulunmaktadır. Bu motorların her biri 2.6 kW gücünde olup anlık olarak 5.2 kW güç verebilmektedirler. Kurşun-asit bataryalar ile beslenen bu sistem sayesinde, geliştirilen bu araç saatte 60 km hıza çıkabilmiştir. 1903 yılında Krieger hibrit aracı geliştirilmiştir. Bu araçta seri-hibrit konfigürasyonu kullanılmıştır. 1916 yılında Woods'un geliştirdiği hibrit otomobilde dört silindirli içten yanmalı motor doğrudan elektrik motoruna bağlanıp ardından ön tekerleklere itici şaft ile bağlanmıştır. Bu yapı ile paralel-hibrit konfigürasyon geliştirilmiştir. 1968'de General Electric nikel-demir bataryalar kullanarak geliştirdiği 64 km menzile ve saatte 89 km azami hıza sahip GE Delta isimli aracı tanıtmıştır. Ford ise nikel kadmiyum kullanılan E-Car isimi aracın prototipini geliştirmiştir. 1974'te Sebring-Vanguard Company tarafından geliştirilen ve dört adet kurşun-asit batarya ile beslenen iki adet DC motora sahip olan Comuta saatte 40 km hıza çıkabilme ve menzili 64 km idi. 1975'te Fiat tarafından geliştirlen X1/23B isimli prototip araçta ise kurşun-asit bataryalar ile beslenen bir DC motor bulunmaktadır. Dünya'da popülaritesi artan elektrikli araç üretimine 1970'lerde Japonya da katılmıştır. Mazda, Mitsubishi, Daihatsu ve Toyota'nın ortaklaşa yürüttüğü elektrikli araç projesi için Japonya hükümeti 1970'lerin ilk yarısında 20 milyon dolar destek sağlamıştır.

1980'li yıllarda hükümetler ekolojik avantajlarından ötürü elektrikli araç programları için fon oluşturmaya başlamıştır. ABD Enerji Bakanlığı'nın sponsorluğuyla, Ford ve General Electric ortaklığında 1988'de ETX-1 isimli araç tanıtılmıştır. Araçta sodyum-sülfür bataryalar ile beslenen AC motor kullanılmıştır. Daha sonra geliştirilen ETX-2 isimli prototip 160 km menzile ve saatte 96 km azami hıza sahipti. 1990'larda çok sayıda üretici elektrikli araç geliştirmeye başlamıştır. Bu dönemde geliştirilen araçlara General Motors EV1, Toyota RAV4, Ford Think City, Peugeot 106 ve Nissan Hipermini örnek gösterilebilir. Araçların çoğunda PMSM veya AC motor kullanılmıştır. 1997'de Toyota Prius, 1999'da Honda Insight ve sonrasında Civic HEV tanıtılmıştır. Toyota Prius, modern hibrit araçların ilki olarak geçmektedir. 2010 yılında General Motors Chevy Volt'u piyasaya sundu. Hibrit yapıdaki bu araçta 111 kW'lık PMSM kullanılmıştı ve aracın azami hızı 161 km idi. Bununla beraber

günümüze kadar 125 kW motor gücüne, ve toplam 240 km menzile sahip hibrit yapıdaki BMW i3 ve PMSM kullanılan 160 km menzile sahip Mitsubishi i-MiEV araçları da piyasaya sürülmüştür.

2006'da tanıtılan ve 2008-2012 yılları arasında üretilen Tesla Roadster'da lityum-iyon batarya ile beslenen 3 fazlı ve 4 kutuplu 185 kW gücünde bir AC motor kullanılmıştır. Aracın menzili 393 km olup, azami hızı saatte 201 km idi. Sonradan çıkardıkları Model S'te önde ve arka aksta olmak üzere iki adet asenkron motor ve 85 kWh'lik batarya ile 480 km menzil elde etmişlerdir. Bununla birlikte aracın maksimum hızı 250 km/saat'tir. 2015'te satışa çıkan Model X'in 90D modelinde, önde 193 kW, arkada 375 kW maksimum net güce sahip iki adet asenkron motor ve yine 85 kWh'lik batarya ile maksimum 210 km/saat hız ile 467 km menzil imkanı sağlamışlardır. Araçtaki iki adet motorun toplam maksimum bir saatlik çıkış gücü 75 kW'tır. 2017'de satışa sunulan Model 3'te performans opsiyonu ile birlikte saatte 261 km azami hız ve uzun menzil opsiyonu ile 560 km menzil imkanı sağlamışlardır. 2020'de satışa sunulan son araçları Model Y ile birlikte saatte maksimum 249 km hız ve 507 km menzil imkanı sağlamışlardır.

Özellikle 2015 yılından sonra küresel ısınmadan kaynaklanan karbon salınımının azaltılması yolunda önemli adımlar atılmıştır. İnsanlarda oluşan ekolojik bilinç doğrultusunda içten yanmalı motora sahip araçlar yerine elektrikli/hibrit araçların kullanımı artmaya başlamıştır. Bu sebeple yukarıda sayılanların dışında bir çok başka otomobil üreticisi elektrikli/hibrit araç modelleri geliştirmeye başlamıştır. Audi E-Tron, Chevrolet Bolt EV, Honda Clarity Electric, Hyundai Ioniq Electric ve Kona Electric, Jaguar I-Pace, Mercedes-Benz B-Class Electric Drive ve EQC, Renault ZOE, BMW i3S, Volkswagen e-Golf vb. birçok araç bunlara örnek olarak gösterilebilir.

1.2 Batarya Şarj Sistemleri

Elektrikli araçların şarj sistemlerini kablolu ve kablosuz şarj sistemleri olmak üzere iki ana başlığa ayırmak mümkündür. Bu bölümde bu iki şarj yöntemi ele alınarak temel özellikleri incelenecektir.

1.2.1 Kablolu şarj sistemi

Kablolu şarj sistemleri için genel olarak 3 seviye vardır. Bunlar Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3 olarak isimlendirilir. Seviye 1 elektrikli aracın ev veya ofisteki priz üzerinden

şarj edilmesi durumudur. Halka açık yerlerde, şehirlerarası yollardaki mola istasyonlarında yer alan şarj istasyonları Seviye 2 olarak tanımlanır. Seviye 3 şarj aynı zamanda hızlı şarj olarak da isimlendirilir. Ticari şarj dolum istasyonları bu seviyede şarj etme imkanı sunar. Bazı şehirlerarası mola istasyonlarında ve alışveriş merkezleri otoparklarında bulunabilir. ABD'de ve Avrupa'da kullanılan şarj seviyeleri ve şarj soket bilgileri Çizelge 1.1'de, soket görselleri ise Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de görülebilir. Seviye 1, 2 ve 3 için kullanılan şarj topolojileri Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te görülmektedir.

Çizelge 1.1 : Elektrikli araçlar için AC-DC şarj seviyeleri ve soketleri.

	Soket	Şarj Seviyesi	Gerilim ve Akım Seviyesi	Maksimum Güç
ABD	Tip-1 SAE J1772	AC-1	1Φ 120V, ≤16A	1.9 kW
		AC-2	1Φ 240V, ≤80A	19.2 kW
Avrupa	Tip-2 Mennekes	AC-1	1Φ 230V, ≤32A	7.4 kW
		AC-2	3Φ 400V, ≤32A	22 kW
SAE	Tip-4 SAE J1772 CCS	DC-1	200-450V, ≤80A	36 kW
		DC-2	200-450V, ≤200A	90 kW
		DC-3	200-600V, ≤400A	240 kW
Chademo	Tip-4 Chademo	DC-3	200-500V, ≤125A	62.5 kW
	Tesla US	DC-3	Model S için 400V, ≤ 300A	120 kW



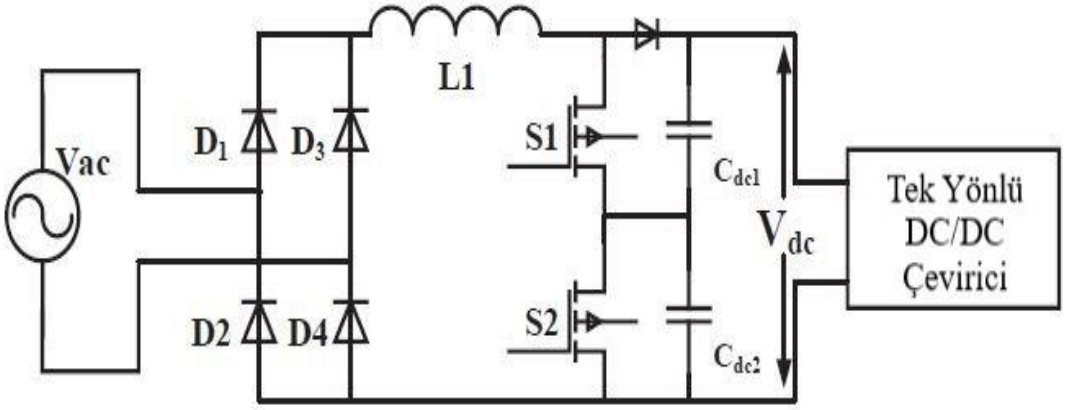
(a) (b) (c)

Şekil 1.1 : AC soketler: (a) Tip-1 SAE J1772. (b) Tip-2 Mennekes. (c) Tesla [4].

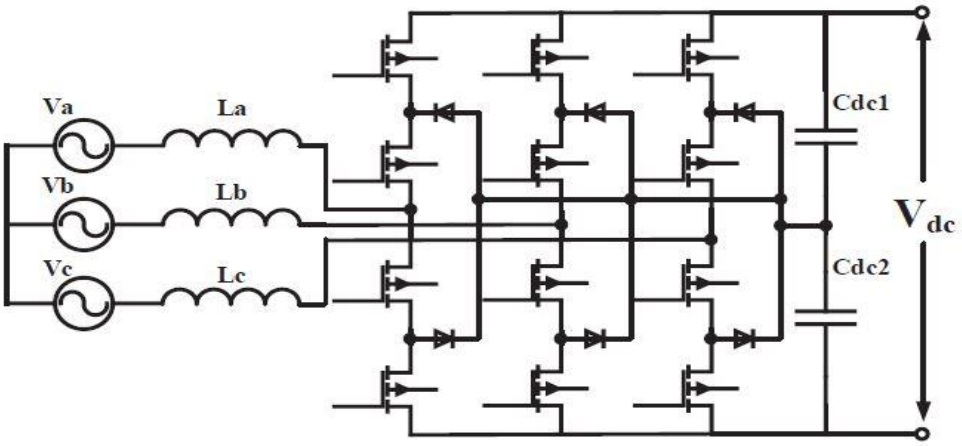


(a) (b) (c)

Şekil 1.2 : DC soketler: (a) CCS ABD tipi. (b) Avrupa tipi. (c) Chademo [4].



Şekil 1.3 : Seviye 1 ve 2 için kullanılan tek yönlü şarj topolojisi [5].



Şekil 1.4 : Seviye 3 için kullanılan çift yönlü şarj topolojisi [5].

Kablolu şarj istasyonları son yıllarda ülkemizde de yaygınlaşmaya başlamıştır. ZES, e-Şarj, Voltrun, Sharz gibi şarj istasyonlarının ülke genelinde yayılmaya başlamasıyla elektrikli araçlar için menzil problemi giderek azalmaktadır. Hem AC hem de DC şarj çözümleri sunan bu istasyonlarda kullanıcılar çekilen güç üzerinden ücretlendirilmektedir. Ülkemizde en yaygın istasyonlardan olan ZES ve e-Şarj'a ait şarj tarifeleri Çizelge 1.2 ve Çizelge 1.3'te görülebilir.

Çizelge 1.2 : e-Şarj AC-DC şarj tarifeleri.

Şarj Seviyesi	Güç Seviyesi	Birim Fiyat
AC-1	≤7.4 kVA	0.18 TL/dk
AC-2	7.4-11 kVA	0.28 TL/dk
AC-3	11-22 kVA	0.38 TL/dk
DC-1	≤24 kW	0.58 TL/dk
DC-2	24-50 kW	1.08 TL/dk

Çizelge 1.3 : ZES AC-DC şarj tarifeleri.

Şarj Seviyesi	Ortalama Güç	Birim Fiyat
AC-1	≤7.4 kW	0.15 TL/dk
AC-2	7.4 kW ve üstü	0.35 TL/dk
DC-1	≤50 kW	1 TL/dk
DC-2	50 kW ve üstü	1.5 TL/dk

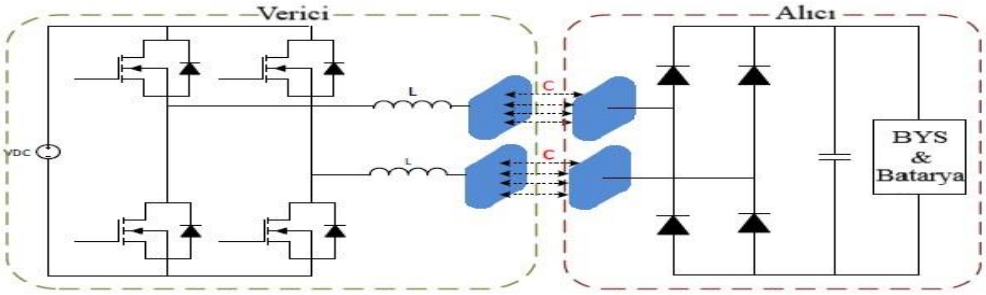
Kablolu şarj sistemleri temel yapı olarak Araç-içi (On-Board) ve Araç-dışı (Off-Board) olmak üzere ikiye ayrılır. Araç-içi sistemlerde, araç-dışı sistemlere nazaran daha düşük güç transferi sağlanır. Bu sebeple şarj sırasında batarya şarj akımı ve sıcaklığı endişe konusu değildir. Araç üzerindeki yapıdan dolayı araca ekstra yük ekler. Şarj hızı da araç-dışı sistemlere kıyasla daha düşüktür. Araç-dışı sistemler ise, araç-içi sistemlere göre daha karmaşık sistemlerdir ve daha yüksek güç transferine imkan verir. Bulundurduğu batarya yönetim sistemi, güç elektroniği ve haberleşme sistemi daha karmaşık bir yapıdadır. Yüksek güç transferi esnasında bataryadaki sıcaklık artışını da kontrol etme imkanı sağlar [6].

1.2.2 Kablosuz şarj sistemi

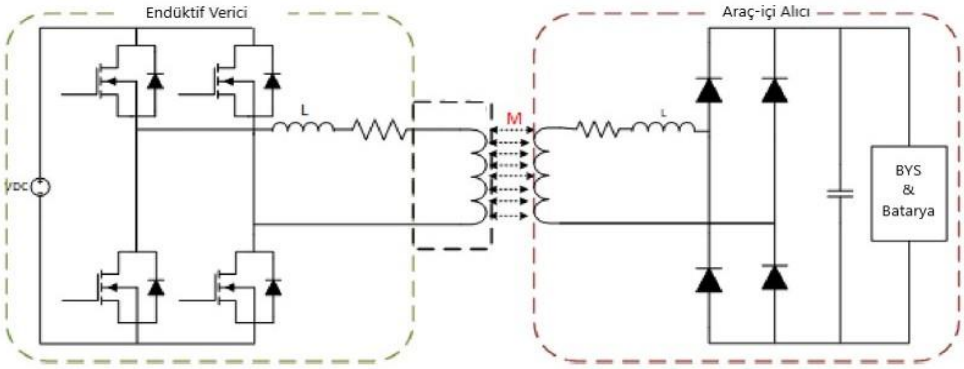
Elektrikli araçların şarj edilmesinde de kullanılan kablosuz enerji transferi (KET, inductive power transfer - IPT) fikri ilk kez 1899 yılında Nikola Tesla tarafından öne sürülmüştür. Evlere elektrik ulaşımını kolaylaştırmayı hedefleyen bu proje teknik ve mali sebeplerden ötürü hayata geçemese de ardından gelecek olan projelere büyük ilham kaynağı olmuştur. 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, özellikle son 20 yıldır, gücün kablosuz olarak aktarılmasına yönelik çalışmalar giderek artmaktadır. Elektrikli araçlar, cep telefonları, biyomedikal ve akıllı şebekeler gibi konuların gelişiminde KET büyük önem arz etmektedir.

Elektrikli araçlarda kullanılan dört KET metodu vardır. Bunlar; kapasitif KET, endüktif KET, manyetik dişli KET ve rezonant endüktif KET'tir. Kapasitif KET'te kuplaj kapasitörleri mekanik ve geometrik anlamda gelişmiştir. Bu sayede de bu yöntem düşük maliyetli ve basit bir yapıdadır. Bu sebeple taşınabilir elektronik

cihazların şarj cihazları için oldukça kullanışlıdır. Şekil 1.5'te kapasitif KET'in temel blok diyagramı görülmektedir. Endüktif KET geleneksel olarak kullanılan yapıdır. Yukarıda bahsedildiği gibi Nikola Tesla tarafından geliştirilmiştir. Alıcıdan vericiye mW'tan kW'a kadar gücün kablosuz olarak aktarılması için kullanılmaktadır. Şekil 1.6'da endüktif KET'in temel blok diyagramı görülebilir.

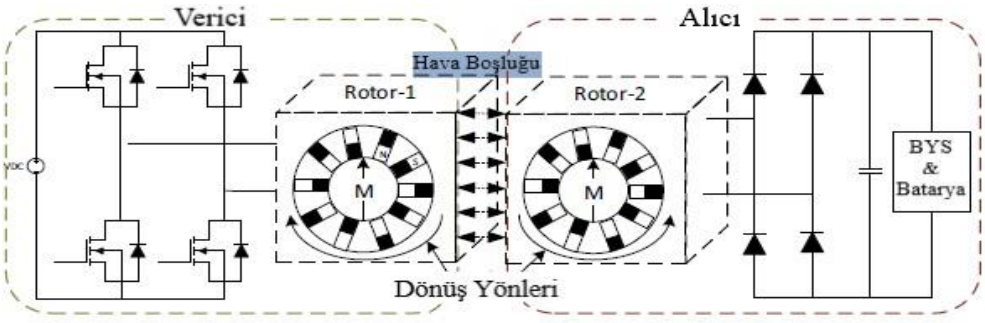


Şekil 1.5 : Kapasitif KET temel blok diyagramı [7].



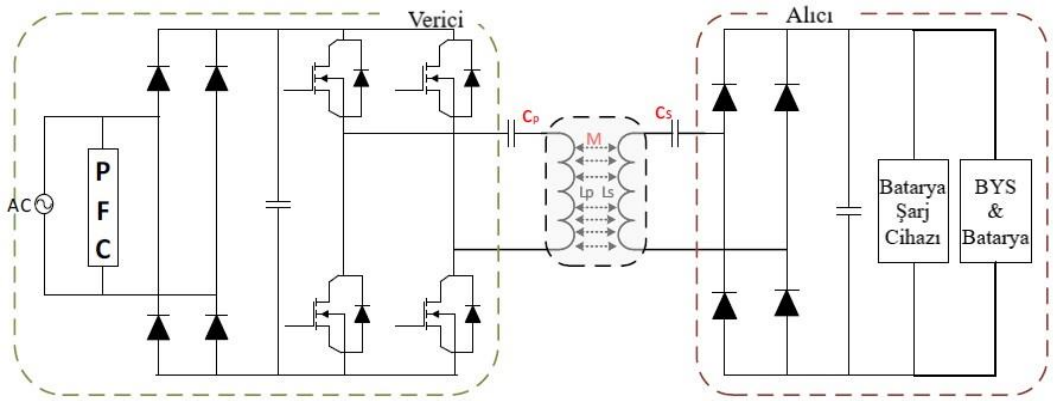
Şekil 1.6 : Endüktif KET temel blok diyagramı [7].

Manyetik dişli KET'te ise Şekil 1.7'de görüldüğü gibi iki senkron sabit mıknatıs karşılıklı konumlandırılmıştır. Akım kaynağı olarak primer sargıya uygulanan güç primer mıknatısta mekanik tork endükler. Bunun etkisiyle dönen primer mıknatıs ise sekonder mıknatısta bir tork endükler. Endüklenen bu tork sayesinde sekonder mıknatısa aktarılan güç, güç dönüştürücü ve BYS üzerinden bataryaya iletilir.



Şekil 1.7 : Manyetik dişli KET temel blok diyagramı [7].

Şekil 1.8'de rezonant endüktif KET'in blok diyagramı verilmiştir. Bu yapı geleneksel KET sistemlerinin en bilinen ve gelişmiş versiyonlarından biridir. Geleneksel KET ile karşılaştırıldığında, seri ve/veya paralel konfigürasyonlardaki ilave kompanzasyon ağları, sadece rezonant durum oluşturmak için değil, aynı zamanda ek kayıpları azaltmak için hem birincil hem de ikincil sargılara eklenir. Birincil ve ikincil bobinlerin rezonans frekansları eşleştirildiğinde verimli güç transferi mümkün hale gelir. Rezonant endüktif KET'in çalışma frekansı onlarca kilohertz ile birkaç yüz kilohertz arasında değişir.



Şekil 1.8 : Rezonant endüktif KET temel blok diyagramı [7].

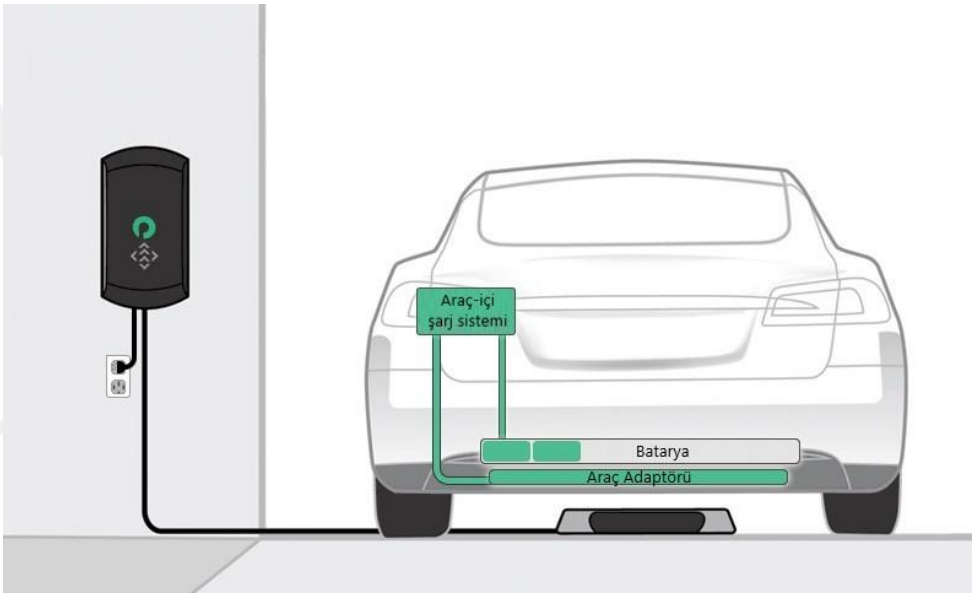
Elektrikli araçların kablosuz şarjı için statik (durağan), yarı dinamik ve dinamik (hareketli) şarj olmak üzere üç çeşit vardır. Statik şarj aracın park halindeyken şarj edilmesini konu alır. Statik şarj sistemleri otoparklara, evlere, ticari binalara ve AVM'lere kurulabilir. Şekil 1.9'da Toyota Prius'a, Şekil 1.10'da BMW'ye ve Şekil 1.11'de Tesla'ya ait bir durağan şarj sistemleri görülmektedir.



Şekil 1.9 : Toyota Prius durağan şarj sistemi [8].



Şekil 1.10 : BMW durağan şarj sistemi [9].

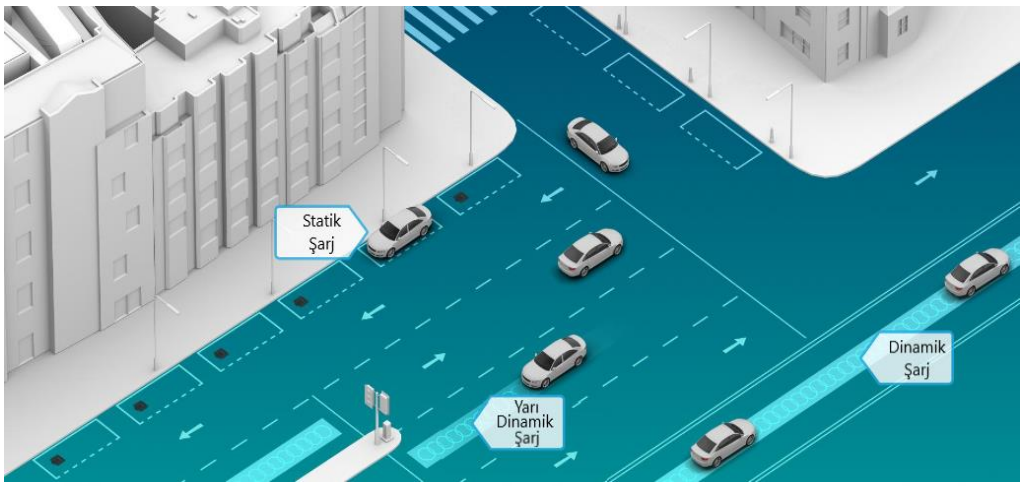


Şekil 1.11 : Tesla durağan şarj sistemi [10].

Yarı dinamik şarj sistemleri yolda seyir halindeki bir aracın geçici olarak duraklamalarında, örneğin ışıklarda durduğunda, şarj edilmesini sağlar. Bu sayede yolculuk sırasında elektrikli araçların menzili bir nebze de olsa artırılmış olur.

Dinamik şarj ise yolda seyir esnasında hareket halinde iken aracın şarj edilmesini konu alır. Günümüzde elektrikli araçların dinamik olarak şarj edilebilmesi için, yollarda bu araçlara tahsis edilmiş ayrı şeritler içeren şehir planlama projeleri yapılmaya başlanmıştır. Elektrikli araçlara özel yapılan bu şeritlerde yol boyunca asfalta gömülen iletkenler vasıtasıyla araç yolda giderken şarj olur. Kablosuz şarj sistemleri, elektrikli araçların menzilinin artmasına ve batarya kullanım ihtiyacını azaltarak batarya boyutunun düşmesine imkan sağladığı için ekonomik anlamda da katkı sağlar. Bu

sayede de elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması için önemli bir çalışma alanıdır. Elektrikli araçların kablosuz şarj edilme yöntemleri Şekil 1.12'de görülmektedir.



Şekil 1.12 : EV'ler için kablosuz şarj yöntemleri [11].

1.3 Tezin Amacı

Tez kapsamında, 3.3 kW'lık bir KET sistemi tasarlanmış ve tasarlanan bu kablosuz şarj sistemi optimize edimiştir. Bu optimizasyon kapsamında, tasarlanan ilk sistemin bağlantı katsayısı ve verimi göz önünde bulundurularak bobin boyutları optimize edilerek azaltılmıştır. Ferritlerde kullanılan malzeme sisteme daha iyi uyum sağlayacak şekilde değiştirilmiştir. Kullanılan ferrit blokların sayısı ve yerleşimi üzerinde çalışmalar yapılarak maliyet azaltılmıştır. KET sistemi tasarımı analitik olarak gerçekleştirilirken benzetişimlerde LTspice yazılımı, bobin-ferrit optimizasyonu aşamasında ise nümerik olarak SEY tabanlı ANSYS Maxwell paket programından faydalanılmıştır.

KET sisteminin veriminin yüksek olması için kuplaj etkisinin olabildiğince artırılması gerekmektedir. Bu nedenle elektrikli araçların kablosuz olarak şarj edilmesine yönelik literatürde varolan yayınlar, patentler ve standartlar ayrıntılı olarak ele alınıp incelenmiştir. Özellikle literatürde bulunan bobin ve ferrit yapıları ayrıntılı olarak ele alınarak hedefler doğrultusunda en uygun yapılar belirlenmiştir. Bobin topolojisinin tasarımı ve optimizasyonu sırasında, analitik denklemler ve ANSYS Maxwell'de oluşturulan bobin sistemlerinden yola çıkarak kablosuz şarj sisteminin LTspice'ta da benzetişimi yapılarak tasarlanan modellerde değişen her bir parametrenin şarj sistemine etkisi incelenmiştir. Verim, bağlantı katsayıları ve hizalama göz önünde bulundurularak tasarım anlamında optimum düzeye ulaşılması hedeflenmiştir.

1.4 Literatür Araştırması

Kablosuz şarj sistemleri bir önceki bölümde bahsedildiği gibi statik, yarı-dinamik ve dinamik olarak üçe ayrılmaktadır. Statik şarj aracın park halindeyken şarj edilmesini konu alır. Verici yani primer bobin güç dönüştürücüleri ile birlikte park yerinin zeminine monte edilir. Alıcı yani sekonder bobin ise aracın altında bulunmaktadır. Oluşabilecek herhangi bir güvenlik sorununu önlemek için BYS'ler, birincil taraftan geri bildirim almak için bir kablosuz iletişim ağı ile donatılmıştır. Şarj süresi kaynak güç seviyesine, şarj pedi boyutlarına ve iki sargı arasındaki hava boşluğu mesafesine bağlıdır. Taşıt araçları için bobinler arasındaki ortalama mesafe yaklaşık 150-300 mm'dir [7]. Statik şarj için üniversiteler tarafından araştırma ve ticari düzeyde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Üniversite çalışmaları Çizelge 1.4'te görülmektedir.

Çizelge 1.4 : Statik şarj - üniversite çalışmaları.

Kurum	Taşıt Tipi	Hava Boşluğu [mm]	Frekans [kHz]	Aktarılan Güç [kW]	Verim [%]
Wuhan Üniversitesi [12]	Lab Deneyi	300	100	6-16	81
Kore Endüstiyel Teknoloji Enstitüsü [13]	Lab Deneyi	150	85	4	93
KAIST Üniversitesi [14]	Lab Deneyi	200	90	3.3	95.96
Michigan Eyalet Üniversitesi [15]	Lab Deneyi	200	60	1	82
ORNL [16], [17], [18]	Prototip	100-160 125-175	19.5 22	3.3, 6.6, 10 20	89-90 90
Michigan-Dearborn Üniversitesi [19], [20]	Lab Deneyi	200	-	8	95.7
Aukland Üniversitesi [21], [22]	Araç	100-300	10-40	2-5	>85
Georgia Üniversitesi [23], [24], [25]	Prototip	160	20	3	>80
EDL ve Utah Eyalet Üniversitesi [26]	Lab Deneyi	152-167	20	5	>90
KAIST Üniversitesi [19], [27]	Araç ve SUV	10 120-200	20 -	3 15	72-80 74-83

Üniversite çalışmaları haricinde bazı özel şirketler de statik şarj üzerinde çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu çalışmalar Çizelge 1.5'te görülmektedir.

Çizelge 1.5 : Statik şarj – özel şirket çalışmaları.

Özel Şirket	Taşıt Tipi	Hava Boşluğu [mm]	Frekans [kHz]	Aktarılan Güç [kW]	Verim [%]
Evatran [16]	Yolcu Aracı	102	20	3.3, 3.6, 7.2	90
Witricity[28]	Yolcu Aracı ve SUV	100-250	85	3.6, 7.7, 11	>90
Hevo Power [29]	Yolcu Aracı	-	-	10	90
Bombardier Primove [30]	SUV	10-30	-	3.6, 7.2, 22	>85
Momentum Dynamic[29]	Otobüs	300	-	30	-
Conductix-Wampfler [29]	Otobüs	-	20	<20	-
Siemens-BMW [30]	Yolcu Aracı	80-150	-	3.6	>90

Yarı-dinamik şarj, yapısı gereği dinamik şarj ile birlikte anılabilir. Dinamik şarj, elektrikli araçların en büyük problemlerinden olan düşük menzil sorununu ortadan kaldırabilecek bir çözümdür. Bu yapıda primer bobinler yol asfaltına belirli aralıklarla yerleştirilir. Sekonder bobinler ise statik şarj sistemlerindeki gibi aracın altında konumlanmıştır. Dinamik şarj ile bataryaların sürekli şarj edilmesi, elektrikli araçların genel batarya gereksinimini %20 azaltmaktadır [31]. Bu sebeple toplu taşıma sektöründeki otobüs ve metro gibi elektrikli araçların şarj edilmesinde kullanılmaktadır. Dinamik şarj üzerine yapılan çalışmalar Çizelge 1.6 görülmektedir.

Çizelge 1.6 : Dinamik şarj – arge çalışmaları.

Özel Şirket	Hava Boşluğu [mm]	Frekans [kHz]	Aktarılan Güç [kW]	Verim [%]
ORNL [17]	125-175	22-23	20	90
Auckland Üniversitesi [21], [22], [32]	500	12.9	20-30	85
Japon Demiryolu Teknik Araştırma Enstitüsü [33]	7.5	50	10	-
KAIST Üniversitesi	10	20	3	72-80
[34], [35], [36], [37]	170	-	6	71
	120-200	-	15	74-83
	200	-	25-100	85
EV System Lab & Nissan Araştırma Merkezi [38]	100	90	1	>90
North Carolina Eyalet Üniversitesi [39], [40]	170	100	0.3	77-90

Hem dinamik hem de statik şarj sistemlerinde primer ile sekonder bobinler arasındaki bağlantı katsayısı oldukça önemlidir. Bağlantı katsayısı iki bobinin ne derece eşlendiğini gösterir ve temassız olarak iletilen gücün seviyesini etkiler. Literatürde, geliştirilen sistemlerdeki bağlantı katsayısını arttırmak için birçok farklı bobin topolojisi kullanılmıştır.

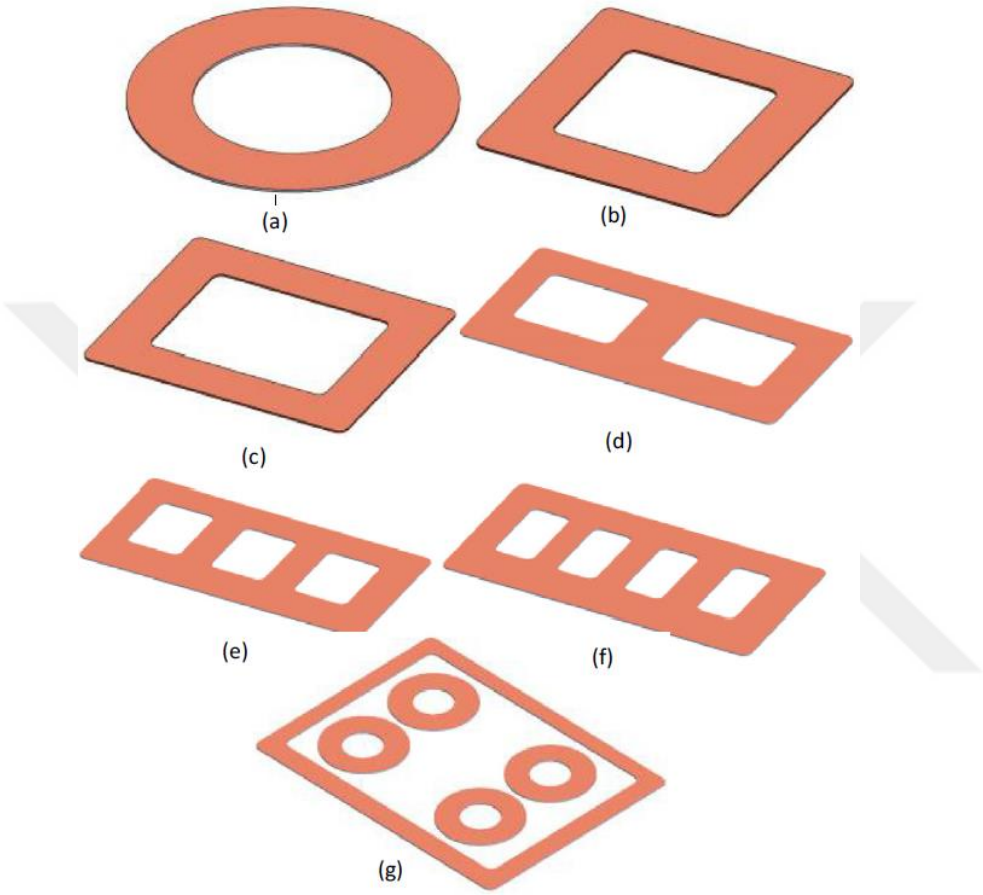
Bobin yapıları temel olarak depolarize ve polarize pedler olarak ikiye ayrılır. Depolarize pedler manyetik akının sadece dikey bileşeninin üretildiği tek bobin

şeklinden meydana gelir. Polarize pedler ise manyetik akının dikey ve yatay bileşenlerini üretmek amacıyla birden fazla bobinden oluşur.

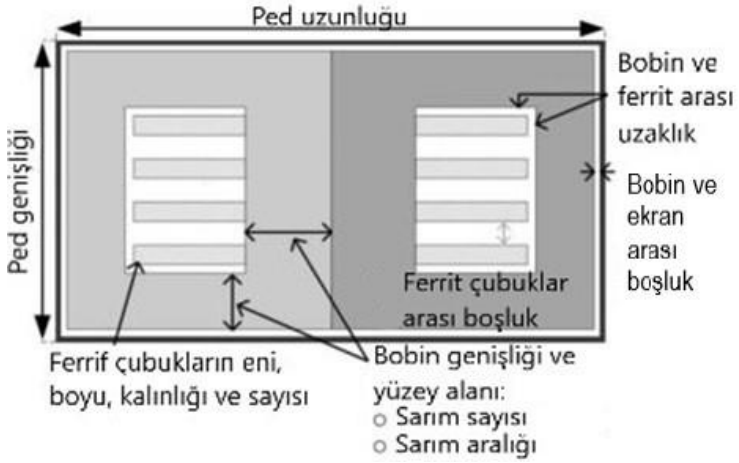
Depolarize pedlere örnek olarak dairesel, kare ve dikdörtgen bobinler sayılabilir. Dairesel bobinler geniş kullanıma sahip bobin topolojileridir. Yuvarlak yapısından ötürü keskin kenarlara sahip değildir ve bu sayede girdap akımı minumum seviyededir. Bobinin iç çapı ayarlanarak manyetik akı dağılımı kontrol edilebilmektedir. Aynı çaptaki bobinler arasındaki mesafe bobin dış çapının dörtte biri olduğunda ise, bağlantı katsayısının k_{12}=0.2 olduğu görülmüştür [41]. Farklı çaplardaki dairesel bobinler ile oluşturulan bir sistemde bobin merkezlerini eşlemek yerine bobin kenarlarını eşlenmesi sistem verimini artırmaktadır [42]. Bobinlerin hizalama hatası çapın %40'ına ulaştığında verim minimuma düşmektedir [43]. Kare ve dikdörtgen şekilli bobinler tam hizalı durumlar için daha uygun yapılardır. Dikdörtgen bobinler dairesel ve kare bobinlere oranla daha yüksek hizalama hatası toleransına sahip olsa da polarize pedlere kıyasla toleransı düşük kalmaktadır. Ayrıca kare ve dikdörtgen bobinlerin keskin kenarlı yapılarından ötürü meydana gelen girdap akımları endüktansı artırır. Endüktansın artması verimi düşüreceğinden dolayı yüksek güç uygulamaları için elverişsizlerdir.

Polarize pedlere örnek olarak selenoid, DD (double-D), DDQ (double-D quadrature), BP (bipolar) ve QDQ (quad-D quadrature) bobinler sayılabilir. Selenoid bobinlerde, sargı yassı bir ferrit tabakasına sarılmıştır. Bu yapı ile oluşan polarize akılar depolarize yapıların akılarından daha yüksektir [21]. DD bobinler birbirine seri iki adet kare veya dikdörtgen bobinden meydana gelir. Yapı ortasındaki akım yönleri birbirini destekleyici yöndedir ve kenarlarda minimum sızıntı akı ile tek yönlü olarak ferrit tabakanın tersi yönde akı oluşur. Yatay hizalama hatalarına karşı depolarize pedlere oranla daha yüksek toleransa sahiptir, bu sebeple de hem statik hem de dinamik sistemlerde primer tarafta kullanıma uygundur [44], [45]. DDQ bobin DD bobinin gelişmiş bir versiyonudur. DD bobine eklenen Q bobinler ile yatay yöndeki hizalama hata toleransı daha yüksektir. Manyetik akı vektörünün hem sinüs hemde kosinüs bileşenlerini yakalama kabiliyeti sebebiyle sekonder tarafta kullanıma uygundur [44], [46], [47]. BP pedler benzer boyuttaki birçok bobinden meydana gelir. Açısal olarak hizalama hatalarına karşı toleransı düşüktür. Primer ve sekonder bobinler arasındaki 30° açısal hizalama hatasında bağlantı katsayısı k_{12} = 0.13'e düşer [45]. QDQ pedler genelde dört dairesel ve bir dikdörtgen bobinden oluşur [48]. QDQ pedler oldukça

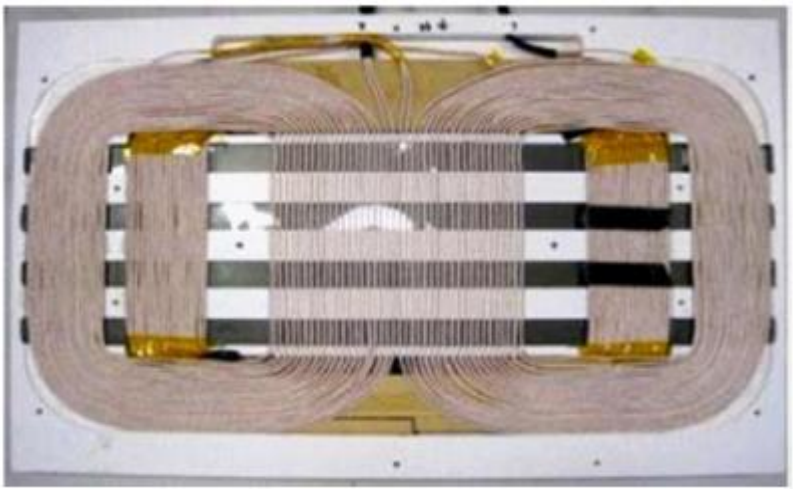
yüksek hizalama hatası toleransına sahiptir. 150mm hava aralığında 0.33 bağlantı katsayısı elde edilebilir. Ayrıca %50 hizalama hatasında bile yeterli güç aktarımına devam edebilir [49]. Depolarize ve polarize bobin yapıları Şekil 1.13'te görülebilir. Ayrıca DD ve DDQ topolojilerin deneysel prototipleri Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'te görülmektedir.



Şekil 1.13 : Bobin yapıları: (a) Dairesel. (b) Kare. (c) Dikdörtgen. (d) DD. (e) BP. (f) DDQ. (g) QDQ [7].



Şekil 1.14 : DD bobin topolojisi [44].

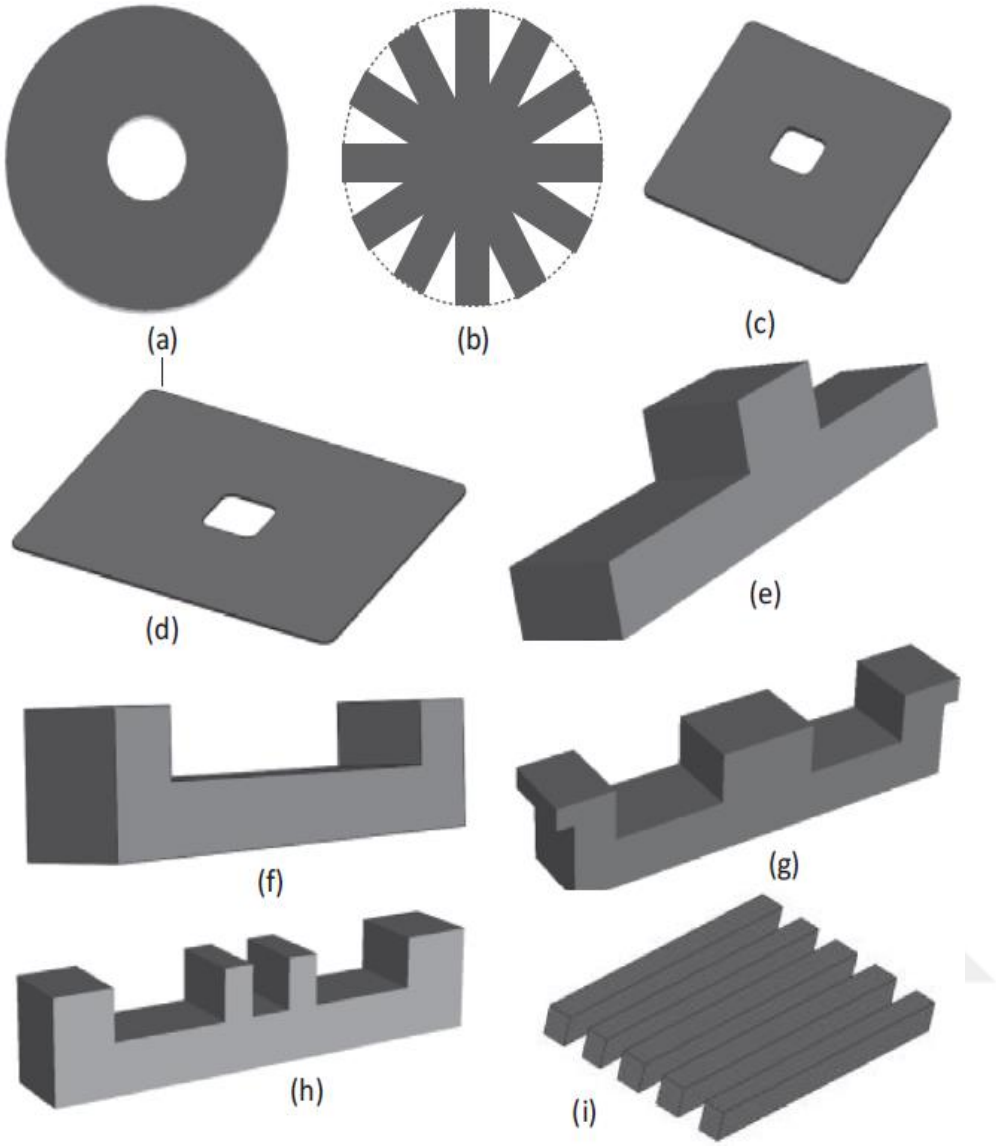


Şekil 1.15 : DDQ bobin topolojisi [50].

Kablosuz şarj sistemlerindeki bir başka önemli bileşen ferrit yapılardır. Ferrit yapılar oluşan manyetik akıyı primerden sekonder tarafa yönlendirmeye yardımcı olur ve bu sayede bağlantı katsayısını arttırır, aynı zamanda da bobinlerin karşılıklı endüktansını ve öz endüktansını arttırır [51].

Ferrit seçiminde boyut, şekil, manyetik geçirgenlik, çalışma frekansı ve maliyet gibi faktörler değerlendirilir. Ferrit çeşitleri olarak dairesel, dairesel çubuk, kare, dikdörtgen, T çekirdek, U çekirdek, E çekirdek, çift-U çekirdek ve I çekirdek sayılabilir. Literatürde genellikle sızıntı akıları azaltmak amacıyla temel yapılar olan dairesel, kare ve dikdörtgen ferritler kullanılmıştır [52]. Ağırlığı ve maliyeti düşürmek amacıyla dairesel çubuk tipteki ferrritler de denenmiştir. E ve U tip çekirdekler daha yüksek bağlantı katsayısı sunsa da, kablosuz şarj sistemlerindeki yetersiz alan dolayısıyla bu uygulama için çok uygun değildirler. Bu sebeple I çekirdek tipleri hem sızıntı akıyı azaltmak ve hem maliyeti düşürmek amacıyla kullanılmıştır [41], [44], [53]. Mn-Zn gibi yüksek manyetik geçirgenliğe sahip malzemeler hem fiyat hem de ulaşılabilirlik açısından bu uygulamada kullanıma oldukça uygundur. İncelenen ferrit çekirdek yapıları Şekil 1.16'da görülmektedir.

Literatürde ferritlerle birlikte kullanılan ve sızıntı akıyı azaltan bir diğer yapı da alüminyum ekranlayıcılardır. Kullanılan alüminyum ekranlayıcının kalınlığı 5 mm'ye kadar çıkabilir. Bu yapı ekranlama etkinliğini arttırır ve girdap akımları vasıtasıyla bağlantı katsayısını geliştirir [54]. Dairesel bir bobin ve ekranlayıcının konumlandırılması Şekil 1.17'de görülmektedir.

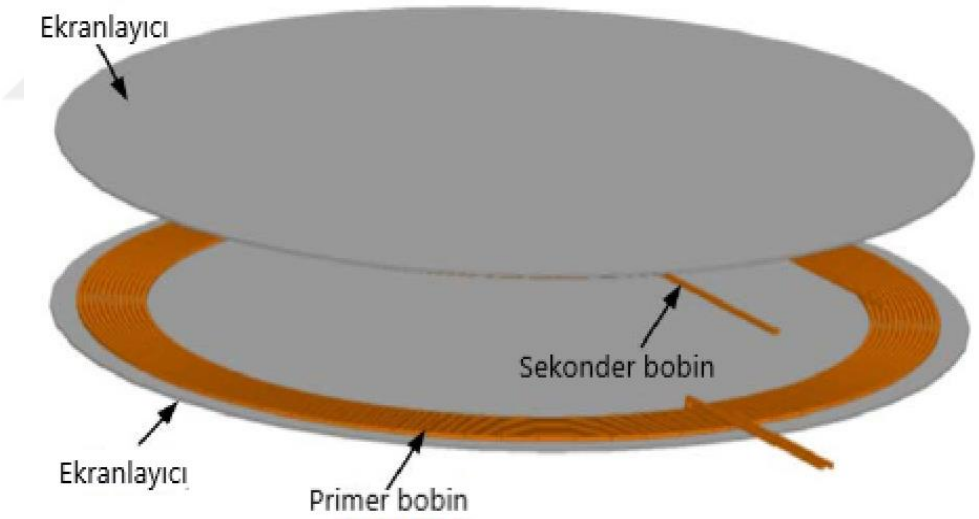


Şekil 1.16 : Ferrit yapıları: (a) Dairesel. (b) Dairesel çubuk. (c) Kare. (d) Dikdörtgen. (e) T çekirdek. (f) U çekirdek. (g) E çekirdek. (h) Çift-U çekirdek. (i) I çekirdek [7].

Kablosuz şarj sistemleri kablolu sistemlere nazaran önemli avantajlar sunsa da, bu avantajların yanında sağlık ve güvenlik açısından çeşitli riskler barındırır. Yüksek gerilim ve akım ile çalışmadan kaynaklı olarak, olası bir arızada (fiziksel veya ortam şartlarından kaynaklı) elektrik çarpması riski oluşur. KET yapısı gereği 150-300 mm hava aralığına sahiptir ve bu aralıktan yayılacak yüksek frekanslı kaçak akılar kalp pili kullanan bir insanın sağlığını tehdit edecek boyutlarda olabilir. Bu riskleri önlemek, KET'i daha güvenli hale getirmek ve endüstriyelleşmeyi sağlamak için SAE, IEC, IEEE gibi kurum ve kuruluşlar, üniversiteler ve hükümetlerle iş birliği yapmaktadır. Bu doğrultuda dünyada duyurulmuş, devam eden elektrikli araçlardaki KET ile ilgili standartlar Çizelge 1.7'de görülmektedir.

Çizelge 1.7 : Elektrikli araçlardaki KET ile ilgili uluslararası standartlar.

Organizasyon	İlgili Standart	Açıklama	Yıl
SAE (Society for Automobile Engineers)	J2954 [55]	Elektrikli Araçlar için Kablosuz Güç Aktarımı ve Hizalama Metodolojisi	2019
	J1772 [56]	Elektrikli Araç ve Hibrit Elektikli Araç Tipi İletken Şarj Kuplörü	2017
	J2847/6 [57]	Kablosuz Şarjlı Araçlar ile Kablosuz EV Şarj Sistemleri Arasındaki İletişim	2015
	J1773 [58]	Elektrikli Araç Endüktif Kuplajlı Şarj	2014
IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)	P2100.1 [59]	Kablosuz Güç ve Şarj Sistemleri	2017
	C95.1 [60]	İnsanların Elektrik, Manyetik ve Elektromanyetik Alanlara Maruz Kalmasına İlişkin Güvenlik Seviyeleri, 0 Hz ila 300 GHz	2019
ISO (International Organization for Standardization)	19363 [61]	Elektrikle Çalışan Karayolu Taşıtları - Manyetik Alan Kablosuz Güç Aktarımı - Güvenlik ve Birlikte Çalışabilirlik Gereksinimleri	2020
IEC (International Electro-mechanical Commission)	61980-1 Cor.1 Ed.1.0 [62]	Elektrikli Araç Kablosuz Güç Aktarma (WPT) Sistemleri - Bölüm 1: Genel Gereklilikler	2017
JEVS (Japan Electric Vehicle Association)	G109	EV'ler için Endüktif Şarj Sistemi - Genel Gereksinimler	2001
	G108	EV'ler için Endüktif Şarj Sistemi – Yazılım Arayüzü	2001
	G107	EV'ler için Endüktif Şarj Sistemi – Manuel Bağlantı	2000



Şekil 1.17 : Dairesel bobin ve ekranlayıcının konumlandırılması [63].

1.5 Hipotez

Tasarlanan kablosuz şarj sisteminin optimizasyonu için analitik olarak ve ANSYS Maxwell'de dört adımda çalışmalar yapılacaktır.

1) Primer, sekonder ve kompanzasyon bobinlerinin sarım sayıları ve sarım aralıkları

2) Primer ve sekonder bobinler arası mesafe (hava aralığı)

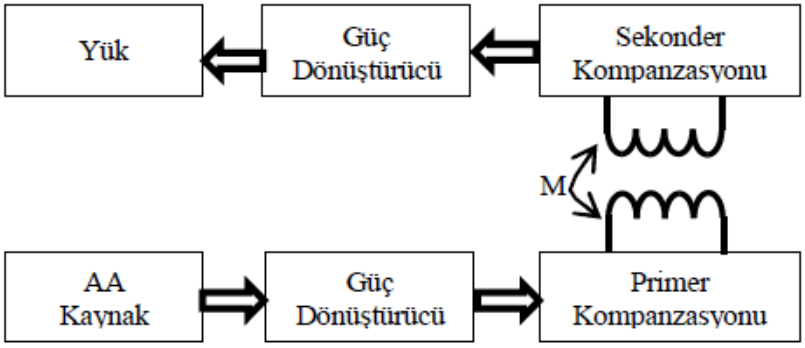
3) Primer ve sekonder bobinlerin yüzey alanlarının birbirlerine göre durumları

4) Ferritlerin malzemesi, boyutları, sayısı ve yerleşimi

Belirtilen adımların her birinde elde edilen veriler ile LTspice'ta sistemin bağlantı katsayısı (k) ve veriminin hizalama hatasına göre değişimi incelenecektir. Verim ile bobin yüzey alanı arasındaki η/S_b oranı maksimize edilecektir. Sistem optimizasyonu sonucunda, elektrikli bir aracın kablosuz olarak şarj edilmesine yönelik 3.3 kW'lık bir gücün minimum 0.2 bağlantı katsayısı değeri ve %90 verimle primer taraftan sekonder tarafa iletilmesi hedeflenmektedir.

2. KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMLERİNİN TEMEL PRENSİPLERİ

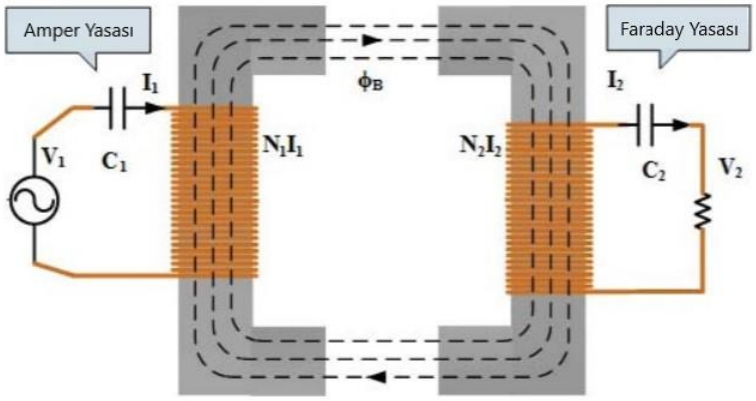
Kablosuz şarj sistemleri güç kaynağı ve yük (batarya) arasındaki üç ana birimden oluşur. Bunlar güç dönüştürücüleri, kompanzasyon devreleri ve bobinlerdir. Kablosuz şarj sistemine ait temel bir blok diyagram Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1 : Kablosuz şarj sistemi blok diyagramı [64].

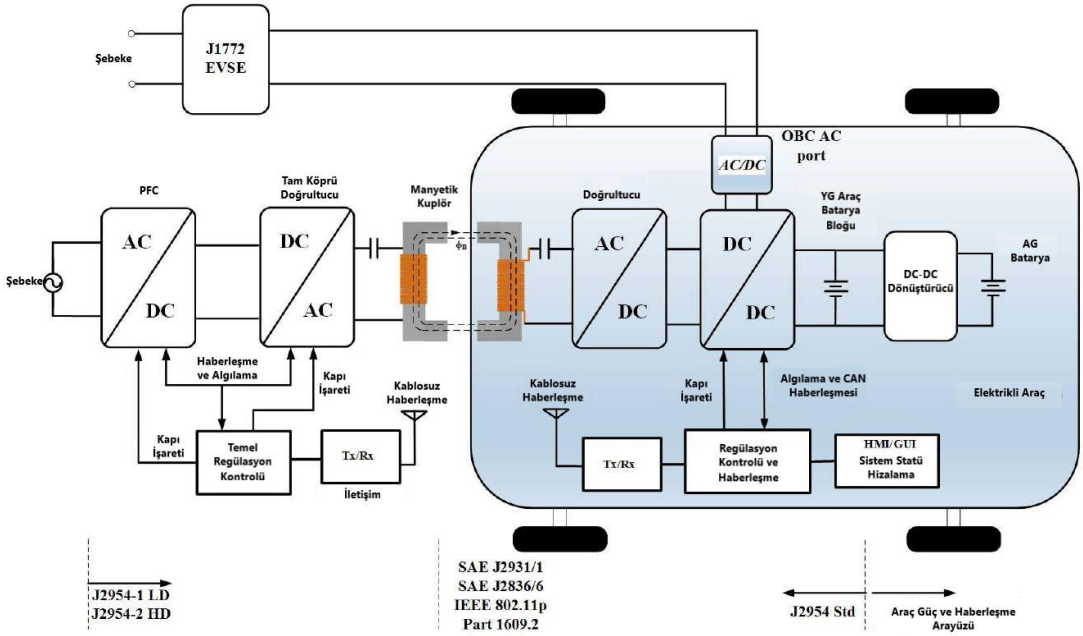
Kablosuz şarj sisteminin temelinde, gücün bir bobinden diğer bobine bobinler arasında temas olmadan taşınması vardır. Faraday yasasına göre, manyetik alan içinde bulunan iletkenin yarattığı düzlemden, düzleme dik olarak geçen akı miktarının zamanla değişmesi ile bu iletkende bir gerilim endüklenir. Gerilimin endüklenebilmesi için ya manyetik akının zamana göre değişmesi ya da sabit manyetik alan içindeki iletkenin hareket ettirilmesi gerekir [65]. Kablosuz şarj sisteminin primer bobine uygulanan yüksek frekanslı alternatif gerilim "Ohm yasası" uyarınca bobinde bir akım akmasına neden olur. Bu akım da "Amper yasası" uyarınca, iletkenin etrafında zamana göre değişen alternatif bir manyetik alan oluşmasına neden olur. Zamana göre değişen bu manyetik alan da "Faraday yasası" uyarınca sekonder bobinde gerilim endükler. Endüklenen gerilim büyüklüğü sistemin frekansına, bobinler arası uzaklığa ve bobinler arasındaki ortak endüktans değerine bağlıdır. Kablosuz şarj sisteminin temel prensibini anlatan yapı Şekil 2.2'de görülmektedir.

En temel açıdan, asenkron motorun çalışma prensibi de endüksiyon yasası ile açıklanır. Bu sebeple asenkron motorlara endüksiyon motorları da denmektedir.



Şekil 2.2 : KET temel prensibi [63].

EV için kablosuz şarj sistemine ait detaylı blok diyagram Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 : Kablosuz şarj sistemi detaylı blok diyagramı [63].

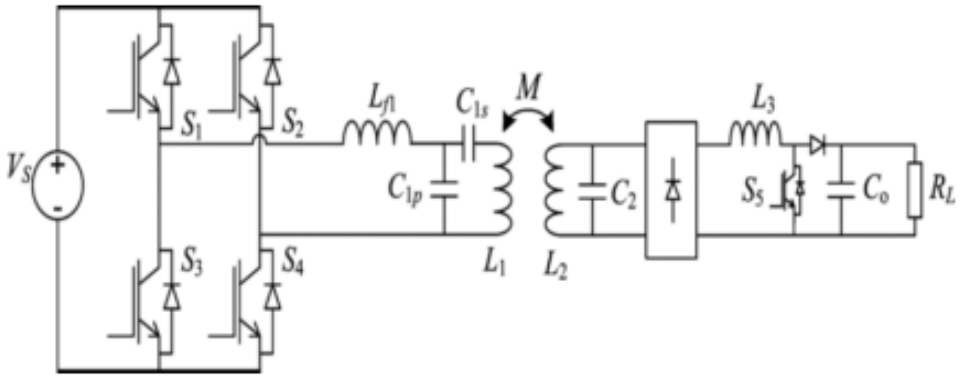
2.1 Kablosuz Şarj Sistemlerinde Rezonans Çeviriciler

Kablosuz şarj sistemlerinde güç dönüştürücü olarak genellikle rezonans çeviriciler kullanılır. Bunun başlıca sebepleri şöyle sıralanabilir:

1) Rezonans frekansında çalışma durumunda devredeki kapasitörün kapasitif reaktansı ile bobinin endüktif reaktansları birbirini sıfırlar [66]. Bobin saf ohmik yük duruma geleceğinden toplam empedans azalır ve dolayısıyla kayıplar da azalmış olur. Kompanzasyon bobini ve kapasitesi aracılığıyla sistemin rezonansa sokulması ile çıkış gücü maksimize edilmiş olur.

2) Rezonans çeviricilerde anahtarlama elemanları akımın veya gerilimin sıfır olduğu anlarda iletime ve kesime sokulur. Böylece anahtarlama elemanları yüksek gerilim stresine maruz kalmaktan kurtarılmış olur. Verimin düşmesinde önemli bir paya sahip anahtarlama kayıplarının önüne geçilmiş olur [67]. Bu yöntem literatürde yumuşak anahtarlama olarak da geçer.

Elektrikli araçların kablosuz olarak şarj edilmesi için kullanılan sistemlerde primer bobine uygulacak olan alternatif gerilim önce doğrultulur. Doğrultulan gerilim rezonans frekansında çalışan çeviricide kare dalga gerilime dönüştürülür. Rezonans bileşenleri üzerinden geçen bu gerilimin akımı sinüzoidal formda olur. Bunun sebebi rezonans bileşenlerinin oluşturduğu manyetik ve elektriksel alanın dolup boşalmasıdır [68]. Daha sonrasında bu gerilim kompanze edilerek primer bobine uygulanır. Faraday yasası uyarınca araç üzerinde bulunan sekonder bobinde endüklenen alternatif gerilim, yeniden doğrultulur ve kompanze edilir. Son olarak bu gerilim bir güç dönüştürücüsü kullanılarak bataryayı şarj etmekte kullanılır. Şekil 2.4'te örnek bir rezonans çevirici topolojisi görülmektedir.



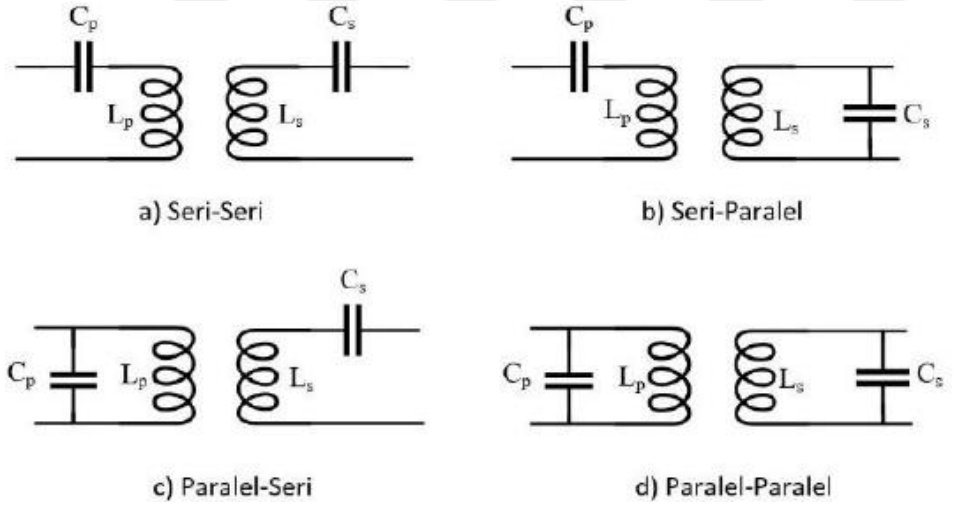
Şekil 2.4 : Rezonans çevirici topolojisi [19].

2.2 Kompanzasyon Devreleri

Kablosuz şarj sistemleri endüktif bir yapıdadır ve çalışma frekansı da yüksek olduğundan, kaynak tarafındaki güç katsayısı çok düşük olur. Bu durumun neden olduğu verim kaybını engellemek için sargılara seri veya paralel bağlı kondansatörler yerleştirilir. Bu işleme kompanzasyon denir. Primer sargı giriş güç katsayısını iyileştirmek için, sekonder sargı ise aktarılan gücü yükseltmek için kompanze edilir. Kompanzasyon devreleri rezonans çeviricilerde de yer almaktadır. Elektrikli araç uygulamalarında kompanzasyon devrelerinde kapasitelere ek olarak endüktanslar da

yer alır. Rezonans çeviriciler birçok farklı topolojide olabilir. Topolojiler arasındaki temel farklılık kompanzasyon devrelerini oluşturan endüktans (L) ve kapasitelerin (C) birbirlerine göre konumlarıdır. Sistemlerdeki temel topolojiler seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-seri (PS) ve paralel-paralel (PP) şeklinde olabilir.

Temel topolojiler incelenirse, SS ve SP topolojileri yüksek güç tranferi için daha uygundur ve SS topolojisinde SP'den daha az bakır iletkene ihtiyaç duyulur [69]. Wang, Covic ve Stielau yaptıkları çalışmada SS topolojisinin sistemin bağlantı katsayısı ve yükten bağımsız olarak bir frekansta çalışmayı sağlamasından ötürü en uygun kompanzasyon topolojisi olarak belirtmişlerdir. Buna rağmen çalışmalarında, paralel kompanzasyona sahip vericinin yüksek akım sağlayabilmesi ve paralel kompanzasyona sahip alıcının batarya şarjı için çok uygun olan akım kaynağı karakteristiğine sahip olmasından ötürü PP topolojisini tercih etmişlerdir [70]. SS topolojisi dar frekans aralığında yüksek verimle gücün taşınmasına imkan verir. SP topolojisi ile SS topolojisine kıyasla daha düşük verimle daha geniş bir frekans aralığında güç taşınabilir. Şekil 2.5'te verilen temel kompanzasyon topoloji özelliklerinin karşılaştırması Çizelge 2.1'de görülmektedir.

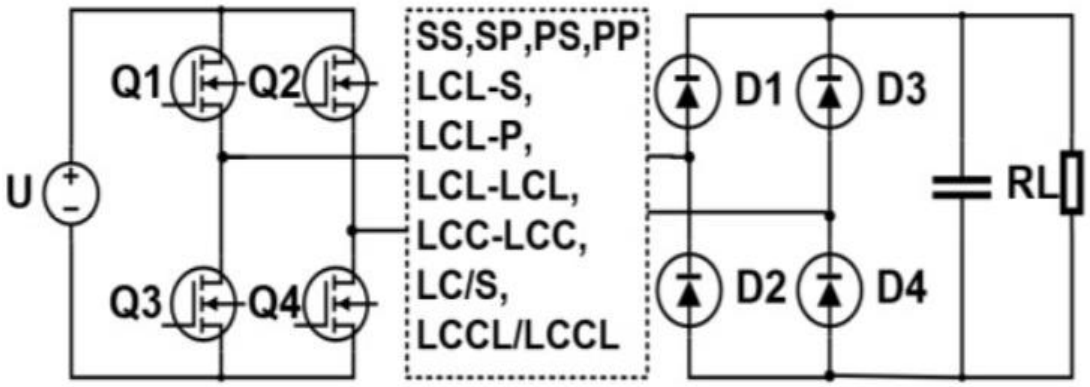


Şekil 2.5 : Temel kompanzasyon topolojileri [64].

Çizelge 2.1 : Temel kompanzasyon topolojileri karşılaştırması [7].

Özellik	SS	SP	PS	PP
Güç Transfer Kabiliyeti	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
Mesafeye Bağlı GF Hassasiyeti	Orta	Orta	Orta	Orta
Hatalı Hizalama Toleransı	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek
Resonans Durumundaki Empedans	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
EV Uygulamalarına Uygunluk	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta

Bu temel topolojilerin yanında daha gelişmiş topolojiler de mevcuttur. LCL-P topolojisi, primerdeki dizilimine ek olarak sekonder bobine paralel bir kapasite içerir. Bu topolojinin primer kısmındaki dizilim gerekli VA miktarını düşürürken, sekonder paralel kapasite doğrultucunun lineer olmayan etkilerinden dolayı aktif ve reaktif bileşenler yansıtır. LCL-S topolojisi ise LCL-P'den farklı olarak sekonderinde seri kapasite içerir. LCL-P gerilimi yükseltirken LCL-S akımı yükseltir [71], [72]. LCC topolojisi hem primerde hem de sekonderde ilave bobin içerir. Bu da topolojinin hacminin büyümesine sebep olmaktadır. Hacmi azaltmak için kompanzasyon bobinleri ana bobin sistemine entegre edilebilir ve böylece sistem yüksek verimle daha kompakt hale gelir [73]. LCC topolojisinin en büyük dezavantajlarından olan hacim sorunu çözümü için Li ve arkadaşları, oluşturdukları 6 kW'lık prototipte kompanzasyon devresindeki ilave bobinleri ana bobin sistemine ekleyerek sistemi daha kompakt bir hale getirmiş ve %95.3 verim elde etmeyi başarmışlardır [74]. Hem primer hem de sekonder tarafta kullanılan bu topoloji aynı zamanda rezonans frekansının primer ve sekonder bobinler arasındaki bağlantı katsayısından ve yük koşullarından bağımsız hale gelmesini sağlar. Böylece sistem sabit bir anahtarlama frekansında çalışabilir [75]. KET için kompanzasyon devrelerinin de dahil olduğu tüm topoloji Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6 : KET topolojisi [76].

2.3 Verici (Primer) ve Alıcı (Sekonder) Bobinler

Kablosuz şarj sistemlerinin en önemli parçalarından biri bobinlerdir. Sistemin veriminin olabildiğince yüksek olması amaçlanır. Bobin seçimi, verim açısından önemli bir rol üstlenmektedir. Bobin topolojileri arasında seçim yapılırken dikkat

edilen ilk faktör bağlantı katsayısıdır. Bağlantı katsayısı 0 ile 1 değerleri arasında değişir ve "k" ile sembolize edilir. Denklemi aşağıdaki şekildedir.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \tag{2.1}$$

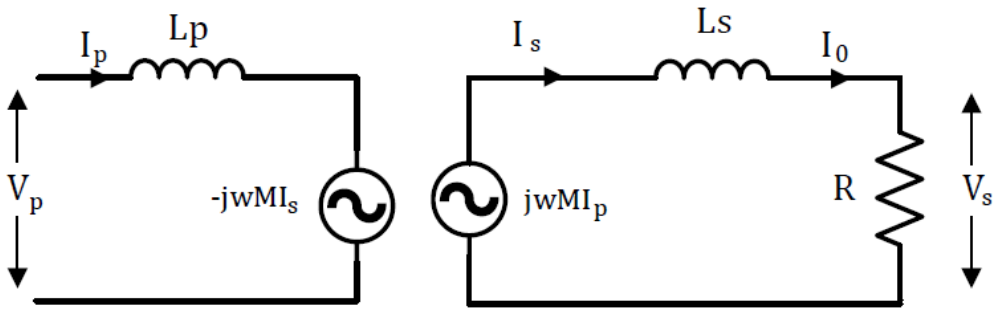
M primer ve sekonder sagıların arasındaki ortak endüktans değeridir. M, sargılar arası mesafeye ve sargıların birbirlerine göre konumuna bağlı olarak değişir. L_p ve L_s sırasıyla primer ve sekonder sargıların endüktans değerleridir. Alıcı ve verici bobinler arasındaki bağlantı katsayısının yüksek olması istenmektedir. Bağlantı katsayısı bobinler arasındaki hava aralığına ve bobinlerin hizalama durumuna göre değişir. Hava aralığı arttıkça bağlantı katsayısı azalır. Aynı şekilde bobinlerin merkezleri arasında hizalama hatası meydana geldiğinde de bağlantı katsayısı azalır. Bu sebeple bobin topolojisinin seçiminde etkili olan bir diğer faktör, bobinin hizalama hatalarına karşı gösterdiği toleranstır. Aracın park edilmesi sırasında araç üzerinde bulunan sekonder bobin ile zeminde bulunan primer bobin arasında hizalama hatası meydana gelme ihtimali yüksektir. Bu durumda verimin düşmemesi için en uygun topoloji seçilmelidir. Literatürde yer alan bobin topolojilerinin karşılaştırması Çizelge 2.2'de görülmektedir.

Çizelge 2.2 : Bobin topolojileri karşılaştırması [63].

Bobin Topolojisi	Hatalı Hizalama Toleransı	Bağlantı Katsayısı	EM Alan Maruziyeti	Ekranlamanın "k" Üstündeki Etkisi	Manyetik Akı
Dairesel	Düşük	Düşük	Yüksek	Düşük	Tek Yön
Akı Çubuğu	Orta	Orta	Düşük	Yüksek	Çift Yön
DD	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Çift Yön
DDQ	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Çift Yön
BP	Orta	Yüksek	Düşük	Yüksek	Çift Yön
TP	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Tek Yön

2.4 Kablosuz Şarj Sisteminin Matematiksel Modeli

Kablosuz şarj sistemini oluşturan yapılar anlaşıldıktan sonra yapının eşdeğer devresini oluşturmak daha kolay bir hal alır. Oluşturulan eşdeğer devre üzerinden durağan bir sistemin matematiksel modeli elde edilir ve kompanzasyonun neden önemli ve gerekli olduğu görülür. Sargı eşdeğer devresi Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7 : Sargı eşdeğer devresi.

KET için iki ana parametre vardır. Bunlardan ilki primer akımı sonucu sekonderde endüklenen açık devre gerilimidir. V_{oc} ile gösterilir. İkincisi ise V_{oc}'nin yarattığı kısa devre akımıdır ve I_{sc} ile gösterilir.

$$V_{oc} = j\omega M I_p \tag{2.2}$$

$$I_{sc} = \frac{j\omega M I_p}{j\omega L_s} \tag{2.3}$$

Kompanzasyonun yapılmadığı bu yapıdaki aktif güç aşağıdaki bağıntı ile bulunur:

$$P = \frac{R V_{oc}^2}{R^2 + (\omega L_s)^2} \tag{2.4}$$

Bu yapıda maksimum aktif güç yük direnci ile sekonder sargı empedansının eşit olduğu durumda elde edilir.

$$R = \omega L_s \tag{2.5}$$

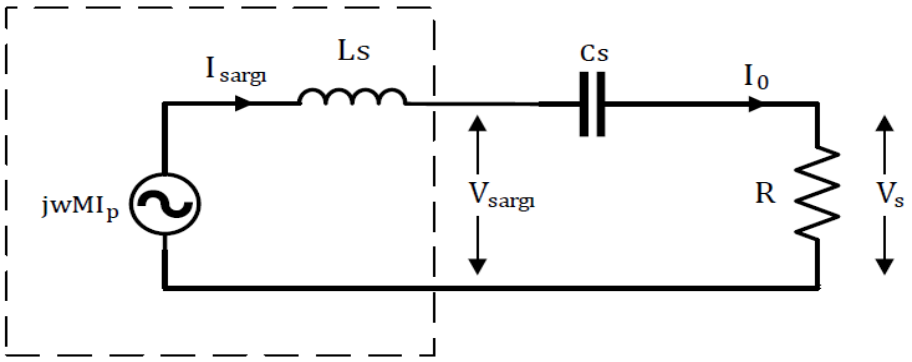
Denklem 2.5'teki eşitlik, denklem 2.4'te yerine koyulursa maksimum güç bağıntısı elde edilir:

$$P_{\max} = \frac{V_{oc}^2}{2\omega L_s} \tag{2.6}$$

Denklem 2.2 ve denklem 2.3'teki eşitlikler denklem 2.6'da yerine koyulursa maksimum güç bağıntısı aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir:

$$P_{\max} = \frac{\omega M^2 I_p^2}{2L_s} \tag{2.7}$$

Sargıların kompanze edilmediği durumda aktarılabilecek güç maksimum güç aktarımı teoremi gereği sınırlıdır. Aktarılacak gücü arttırmak için sekonder taraftaki sargının kompanzasyonu yapılmalıdır. Kompanzasyonun aktarılan güce etkisini göstermek amacıyla temel bir kompanzasyon uygulaması ele alınacaktır. Sekonder tarafta seri kompanzasyona sahip devre Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8 : Sekonderdeki seri kompanzasyon.

Oluşturulan eşdeğer devre üzerinden de görülebildiği gibi sekonder sargıdaki görünür güç maksimum güç aktarımı durumunda aşağıdaki bağıntı ile gösterilir:

$$S = V_{sargı} \times I_{sargı} \tag{2.8}$$

Kompanzasyon sonucu reaktif elemanların etkileri ortadan kalkacaktır.

$$I_{sargı} = \frac{j\omega M I_p}{R} \tag{2.9}$$

$$V_{sargı} = \left(R + \frac{1}{j\omega c_s} \right) \frac{j\omega M I_p}{R} \tag{2.10}$$

Denklem 2.2, 2.3, 2.9 ve 2.10'daki eşitlikler yazılarak denklem 2.8 yeniden düzenlenir:

$$S = |V_{oc}||I_{sc}| \frac{\omega L_s}{R_L} \left(1 - j \frac{\omega L_s}{R_L} \right) \tag{2.11}$$

Burada R_L endüktansın iç direncidir. Reaktif bir elemanda depolanan enerjinin, elemanın aktif gücüne oranı kalite katsayısı olarak tanımlanır. Kalite katsayısı Q ile sembolize edilir. İç direnci R_L olan bir endüktansın kalite katsayısı aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_L} \tag{2.12}$$

Denklem 2.12'deki eşitlik denklem 2.11'de yerine koyulursa sargının görünür güç değeri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$S = |V_{oc}||I_{sc}|Q(1-Q) \tag{2.13}$$

Görünür güçten aktif güce geçilirse yüke aktarılan maksimum güç elde edilir:

$$P_{\max} = |V_{oc}||I_{sc}|Q \tag{2.14}$$

Görüldüğü gibi yüke aktarılan güç ile kalite faktörü doğru orantılıdır. Denklem 2.2 ve 2.3'teki eşitlikler denklem 2.14'te yerine koyulursa sekonderi kompanze edilmiş devrenin maksimum güç ifadesi aşağıdaki şekilde yazılır:

$$P_{\max} = \frac{\omega M^2 Q I_p^2}{L_s} \tag{2.15}$$

Durağan bir kablosuz şarj sisteminde ortak endüktans ve sekonder endüktansı sabit olduğundan yüke aktarılan gücü maksimize etmek için ωI_p değerini maksimize etmek gerekir. Bu sebeple primer akımın anma akımına getirilmesi gerekmektedir. Ayrıca yüke aktarılan gücün artırılması için:

$$\omega = 2\pi f \tag{2.16}$$

eşitliği doğrultusunda frekansın da artırılması gerekmektedir. Günümüzde yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle söz konusu güç elektroniği devreleri için çalışma frekansı 100 kHz'e kadar çıkabilmektedir. Fakat bu frekans bölgesinde çalışırken deri etkisi ve yakınlık etkisi göz önüne alınmalıdır. İletken olarak Litz teli kullanımı bu etkileri ortadan kaldırmaya yardımcı olan bir çözümdür.

2.5 Kablosuz Enerji Transferinde Kayıplar

Yüksek frekansta çalışırken tasarlanan sistemin daha gerçekçi sonuçlar vermesi adına iletkenin yapısından ötürü oluşabilecek kayıpların dikkate alınması gerekmektedir.

Yüksek frekansta iletkene bağlı olarak oluşan kayıplar deri etkisi ve yakınlık etkisi olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir.

2.5.1 Deri etkisi

Bir iletkenin içinden akan alternatif akım, iletkenin içinde ve etrafında zamana göre değişen alternatif bir manyetik alan oluşturur. Değişen manyetik alan etkisiyle oluşan girdap akımları iletken merkezinde iletkenden akan akımın tersi yönde bir etki uygular. Bu sebeple akım yoğunluğu iletken yüzeyinde iletken merkezine nazaran daha yüksek bir hal alır. Bu durum da iletken kesidinin tamamının gücün aktarılması için kullanılmamasına sebep olur. Buna deri etkisi denir. Deri etkisiyle birlikte telin AC direnci akımın frekansıyla doğru orantılı artar. Özetle iletkenin akım taşıyan kesidinin küçülmesi ile empedans artar ve sonuç olarak kayıplar artar. Geleneksel bir telden akan 5 kHz'lik bir akım iletkenin dış 1 milimetresinde yoğunlaşır, 5 MHz'lik bir akım ise sadece yaklaşık 0.03 mm'den akar [77]. Akımın aktığı bölüm cilt derinliği denir.

2.5.2 Yakınlık etkisi

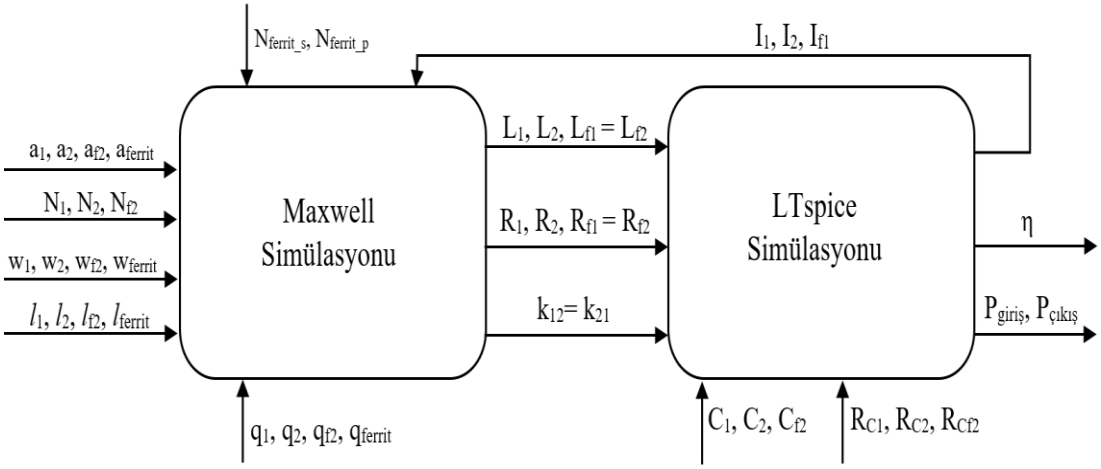
Deri etkisi sonucu iletkenlerin kesitlerinde uniform olmayan akım yoğunlukları oluşur ve eşit olmayan manyetik alan dağılımı meydana gelir. Eşit olmayan manyetik alanlar da yan yana olan iletkenler arasında oluşan etkileşim sonucu her iletkenden farklı akım akmasına sebebiyet verir. Akımlardaki bu dengesizlik güç faktörünü düşürür ve kayıpları artırır. Birbirine yakın iletkenlerde meydana gelen bu durum yakınlık etkisi ile açıklanır. Yakınlık etkisi yüksek frekanslarda iletkenlerin AC direncini arttırır ve verimin düşmesine neden olur.

2.5.3 Litz teli

Litz teli adını örgülü veya örgülü tel anlamına gelir. Litz telinde, telden akan akımın frekansında cilt derinliğinden daha küçük çapa sahip ayrı ayrı yalıtılmış teller kullanır. Bu sayede elektriksel anlamında özdeş birçok yol oluşturulmuş olur. Cilt etkisi kayıpları ortadan kaldırılır, çünkü akım her bir telin tüm kesiti boyunca akar. Bu teller bükümlü olarak yerleştirildiği için de her bir tel ana kablonun merkezinde ve dış kısmında eşit şekilde dolaşır. Bu buküm yöntemi girdap akımlarını ve yakınlık kayıplarını azaltır.

3. OPTİMİZE EDİLECEK ŞARJ SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

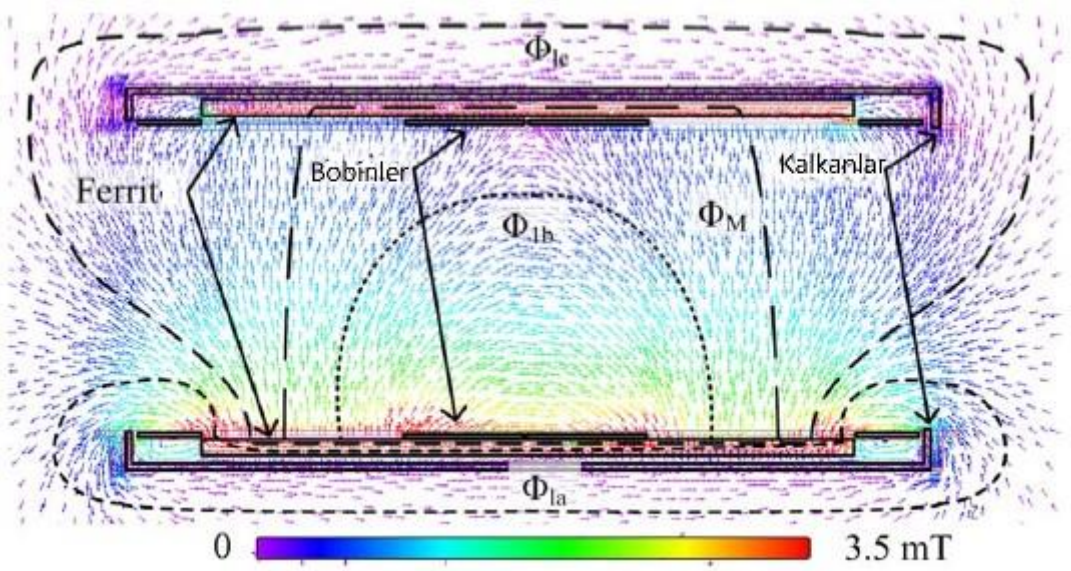
Bu bölümde optimize edilecek kablosuz şarj sistemi ile alakalı bilgiler verilecektir. Kablosuz şarj sistemindeki primer, sekonder ve kompanzasyon bobinleri ile ferritlerin yer aldığı bobin sisteminin elektromanyetik analizleri ANSYS Maxwell'de yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan elektromanyetik analizler sonucu elde edilen çıktılar LTspice programında kullanılarak, tasarlanan her bir sistem için verim analizi yapılmıştır. Maxwell ve LTspice için simülasyona giren ve çıkan parametrelere ait akış diyagramı Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1 : Maxwell ve LTspice için simülasyona giren-çıkan parametrelere ait akış diyagramı.

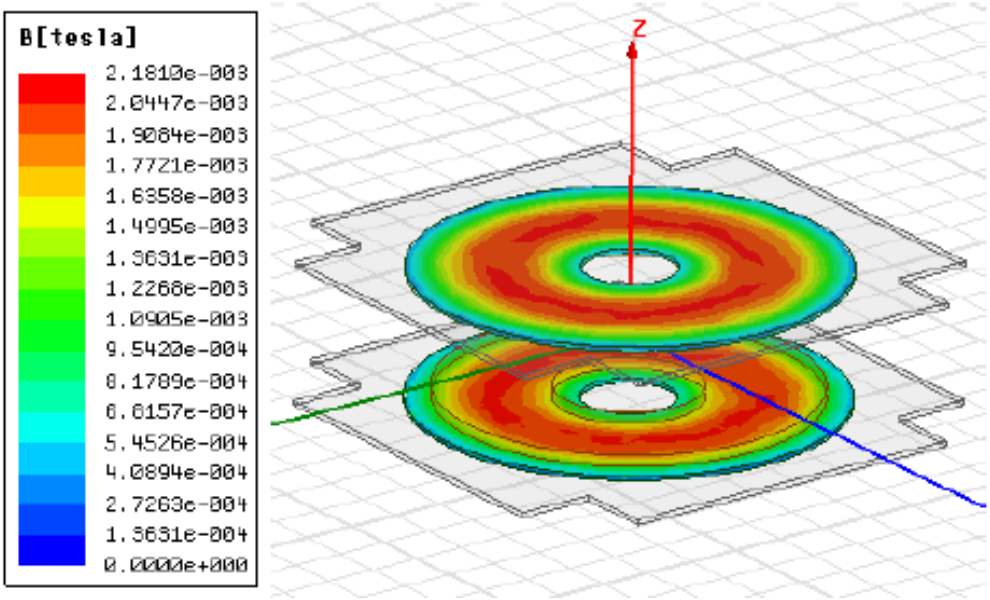
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

SEY, karmaşık mühendislik problemlerinin basite indirgenerek çözülmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde şarj sisteminde kullanılacak olan bobinlerin çeşitleri, fiziksel boyutları ve kullanılan malzemelerin özellikleri seçilerek, farklı koşullarda testler yapılıp, değişen koşullar altında kuplaj etkisi ve manyetik akı dağılımları elde edilecektir. DD tip bobinlere ait SEY modeli ve manyetik akı dağılımları Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2 : Bir DD tip bobinin SEY modeli.

SEY'de temel mantık, çözüm bölgesini çok sayıda küçük boyutta sonlu elemanlar denilen üçgen parçalara bölerek çözmektir. Çözüm bölgesi, düğüm noktaları içeren sonlu elemanlara ayrıldıktan sonra her bir eleman için temel denklemler yazılır. Denklemler yazıldıktan sonra çözüm bölgesindeki tüm sonlu elemanlar düğüm noktalarından bağlanarak birleştirilir ve elde edilen denklem sistemi çözülür. ANSYS Maxwell'de tasarlanmış dairesel bobinler içeren sisteme ait SEY modeli Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3 : Maxwell'de dairesel bobinler ile tasarlanan bir sistemin SEY modeli.

3.2 LTspice Ortamında Benzetişim

LTspice elektronik devrelerin benzetişiminin yapıldığı hazır bir paket programdır. Spice kelimesinin açılımı entegre devre odaklı simülasyon paketidir. Adından da anlaşılacağı üzere LTspice kullanıcıya şematik çizimi, hızlı anahtarlamalı devre çözümü ve dalga şekli görüntüleme imkanı sunar. Program ile devrelerin geçici, AC, DC, gürültü ve Fourier analizleri yapılabilir. Devre elemanları üzerindeki ısı kayıpları hesaplanabilir ve verimlilik raporları oluşturulabilir. Program geniş kütüphane içeriği ile kullanıcıya kolay devre kurulumu imkanı sağlar. Ayrıca kütüphanede olmayan devre elemanlarının spice modelleri kolaylıkla bulunup veya geliştirilerek programa eklenebilmektedir.

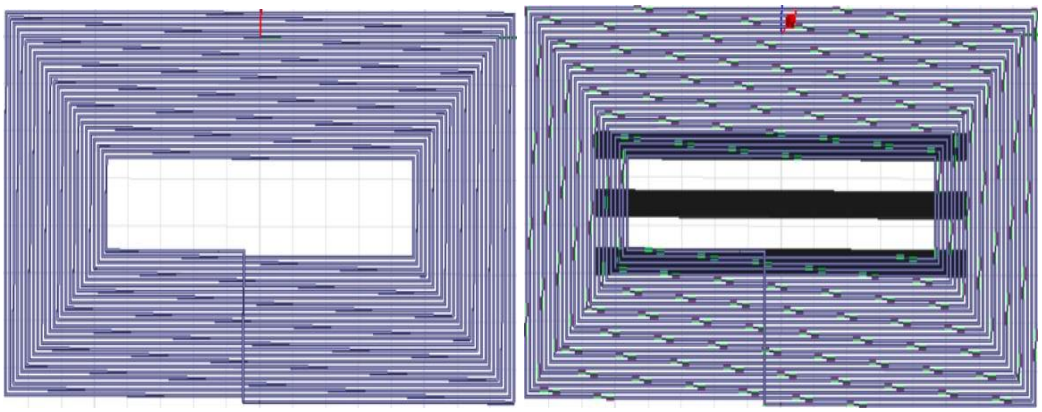
3.3 Optimize Edilecek Kablosuz Şarj Sistemi

3.3.1 Bobin topolojisi seçimi

Bu çalışmada geleneksel topoloji olan dairesel bobinlerin kuplajı sınırlaması ve aracın park edilmesi esnasında oluşma ihtimali yüksek olan hizalama hatalarına (misalignment) karşı gösterdiği toleransın düşük olması sebebiyle farklı topolojiler incelenecektir. Bunlar D ve DD topolojileridir. Bu iki topoloji aynı koşullar altında analiz edilip farklı hizalama hataları durumunda bağlantı katsayıları incelenip karşılaştırılacaktır.

3.3.1.1 D topolojisi tasarımı

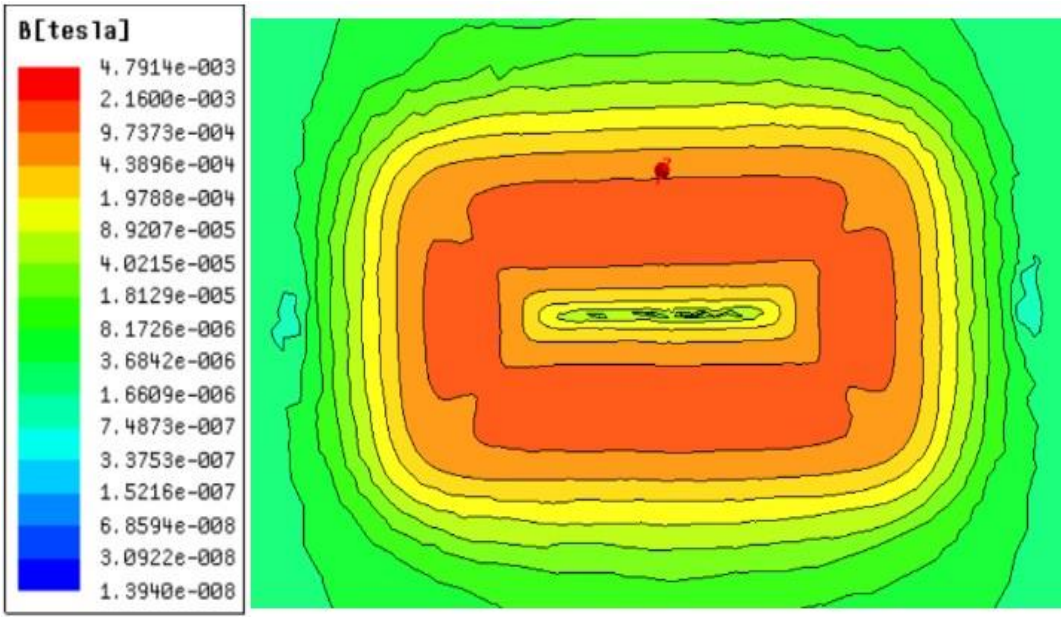
Başlangıçta ANSYS Maxwell'de 770x410 mm boyutlarında 26 sarımlı bir bobin çizilerek tasarlanmıştır. Analizler sonucunda tasarlanan bu bobinin endüktansının yaklaşık 35 µH olduğu görülmüştür. Bu boyutlardaki bir bobin için oldukça düşük olan bu endüktans değeri ile aktarılmak istenilen güç seviyelerine çıkmak mümkün değildir. Bu sebeple modele bobin ile arasında 3 mm aralık olacak şekilde ferrit çubuklar eklenmiştir. Aynı boyutlarda tasarlanan yeni modelle endüktansın değeri yaklaşık olarak 231 µH'ye çıkarılmıştır. Hedefler doğrultusunda tasarlanacak modelde ferrit kullanımına karar verilmiştir. Tasarlanan D bobinler Şekil 3.4'te görülmektedir.



(a) **(b)**

Şekil 3.4 : ANSYS Maxwell'de tasarlanan D bobinler: (a) 35 µH. (b) 231 µH.

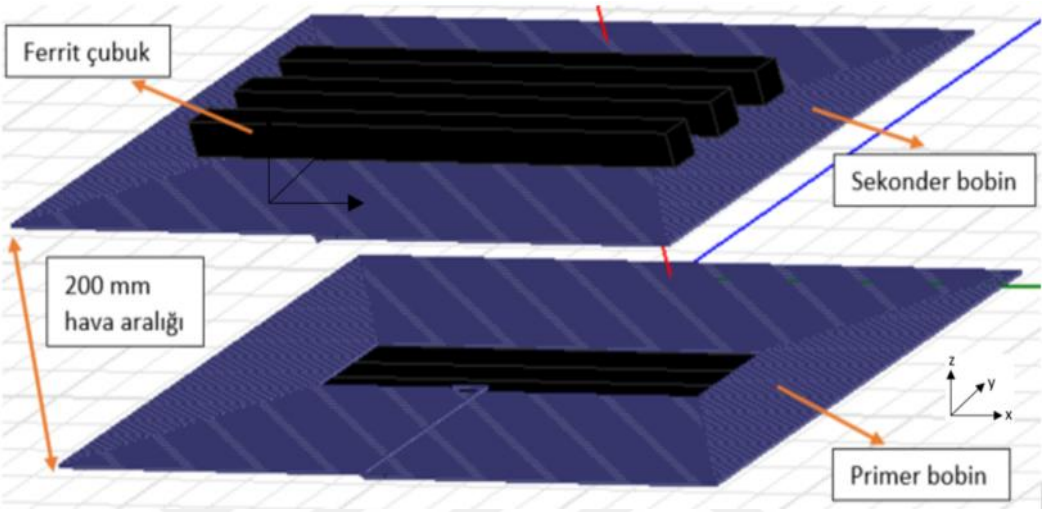
D bobin ve ferritlerle oluşturulan yapıya simetrik olacak şekilde bir yapı daha tasarlanıp iki yapı arasında 200 mm hava aralığı olacak şekilde yerleşimi sağlanmıştır. Bu yapılardan biri zeminde bulunan primer kısmı, diğeri de araç üzerinde bulunan sekonder kısmı temsil etmektedir. Model x ve y doğrultusunda maksimum hizalama hatası bobin boyutunun %30'u olacak şekilde analiz edilecektir. Bu da x ve y doğrultusunda sırasıyla 240 mm ve 120 mm'dir. Ölçüm aralığı x doğrultusunda 120 mm, y doğrultusunda ise 60 mm'dir. D bobine ait manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.5'te görülmektedir. Sistemin analizi sonucu bağlantı katsayısının değişimi ise Çizelge 3.1'de verilmektedir. Tüm sistem ise Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.5 : Tasarlanan D bobinde manyetik akı yoğunluğu.

Çizelge 3.1 : D topolojide bağlantı katsayısının hizalama hatasına göre değişimi.

Hizalama Hataları	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.106049	0.100544	0.071955
Δx=120mm	0.091808	0.087167	0.061848
Δx=240mm	0.058925	0.056593	0.038707



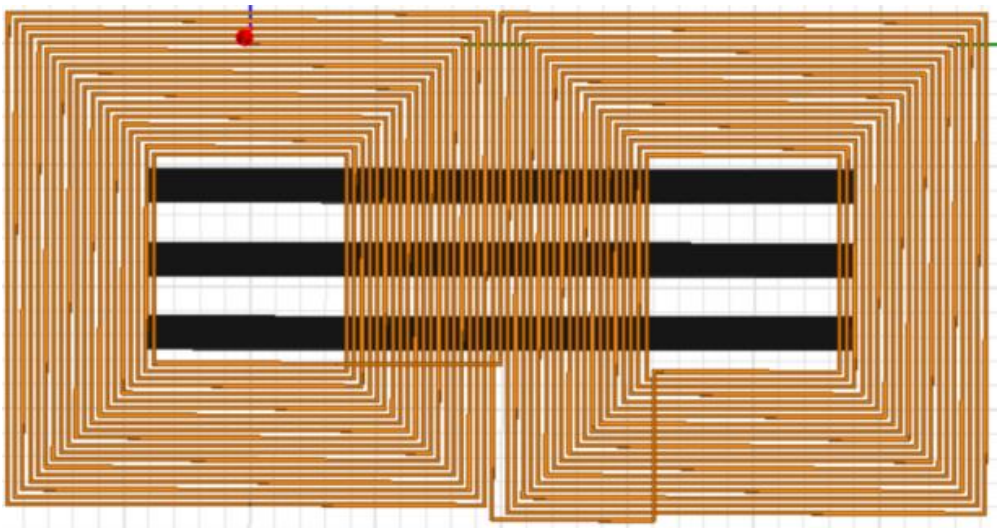
Şekil 3.6 : D bobinler ve ferritler ile oluşturulan sistem.

3.3.1.2 DD topolojisi tasarımı

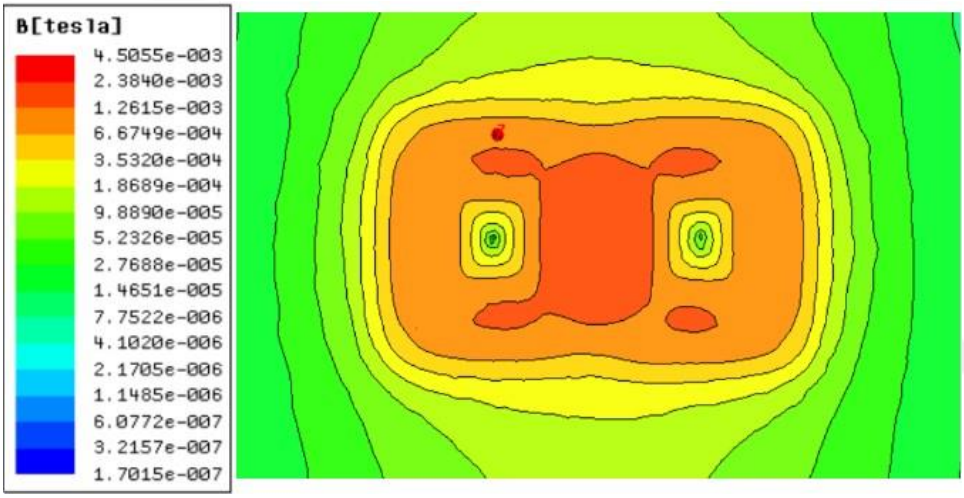
D topolojisi ile çizilen bobinle aynı boyutlara ve aynı endüktans değerine sahip bir DD bobin tasarlanmıştır. Ardından DD topolojisi ile tasarlanan sistemin, D topolojisinde incelenen hizalama hatalarına karşı bağlantı katsayısının değişimini gözlemlemek için analizler gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan D bobinler Şekil 3.7'de görülmektedir. D bobine ait manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.8'de görülmektedir. Tüm sistem ise Şekil 3.9'da görülmektedir.

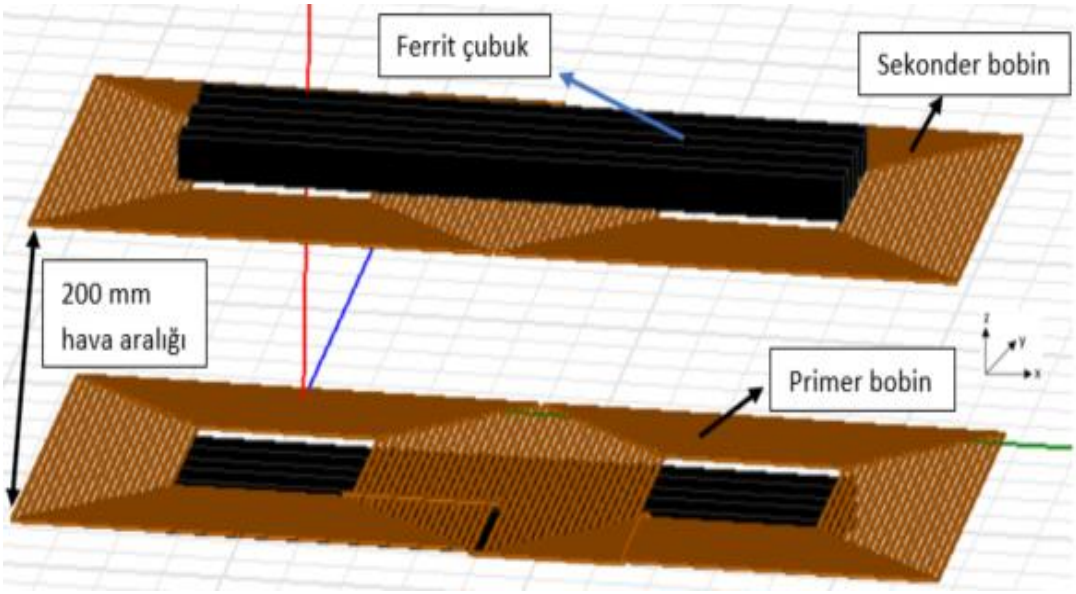
Optimize edilecek sistemin tasarımında Maxwell'de primer bobine 14A, sekonder bobine 6A ve sekonder bobine 14A uyarma akımı uygulanmıştır. Maxwell'de Eddy Current analiz tipi seçilmiş ve sınır koşulları sistem hacminden %30 fazla olacak şekilde bağıl geçirgenlik katsayısı 1 olan vakum materyali ile tanımlanmıştır. Çözüm ağında toplam 383415 adet eleman bulunmaktadır. Tasarlanan sistemde yer alan elemanlara ait mesh bilgileri ise Çizelge 3.2'de görülmektedir. Sistemin analizi sonucu bağlantı katsayısının değişimi ise Çizelge 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.7 : ANSYS Maxwell'de oluşturulan DD bobin: 231 µH.



Şekil 3.8 : Tasarlanan DD bobinde manyetik akı yoğunluğu.



Şekil 3.9 : DD bobinler ve ferritler ile oluşturulan sistem.

Çizelge 3.2 : Optimize edilecek sisteme ait mesh bilgileri.

Tasarım Elemanı	Mesh Sayısı	Minimum Mesh Kenar Uzunluğu [mm]	Maksimum Mesh Kenar Uzunluğu [mm]	RMS Mesh Kenar Uzunluğu [mm]
Primer Bobin	24040	1.87	45.66	12.12
Sekonder Bobin	13348	1.14	62.35	14.75
Kompanzasyon Bobini	11068	1.80	59.99	9.73
Primer Ferritler	9012	5.09	35.27	15.04
Sekonder Ferritler	5648	4.35	45.18	17.66
Hava	320299	1.34	168.32	24.42

Çizelge 3.3 : DD topolojide bağlantı katsayısının hizalama hatasına göre değişimi.

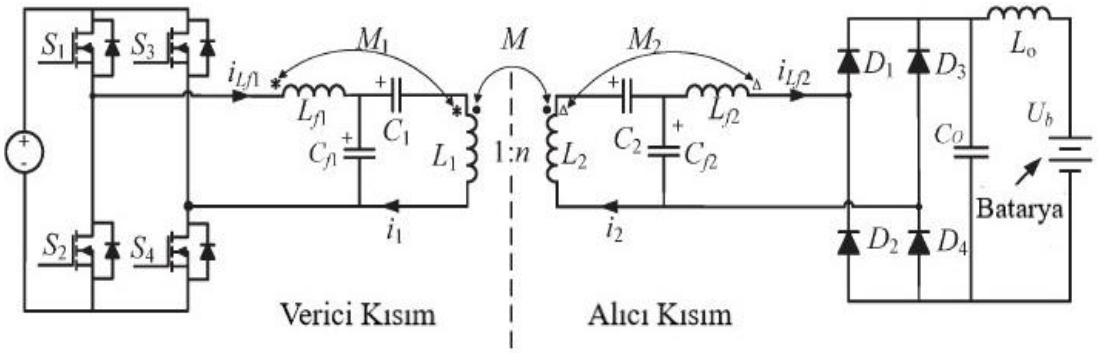
Hizalama Hataları	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.291646	0.272817	0.235961
Δx=120mm	0.222538	0.208456	0.182034
Δx=240mm	0.075689	0.070876	0.065795

İki bobin topolojisi için analiz sonuçları incelendiğinde, DD topolojisinin tüm hizalama hatası durumlarında D topolojisinden daha üstün olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle Δx=0 olduğu durumlarda, D topolojisinin en yüksek bağlantı katsayısının DD topolojisinin en düşük bağlantı katsayısı değerine ulaşamadığı görülmektedir. Bu sebeple tasarlanacak kablosuz şarj sisteminde hizalama hatası bakımından daha üstün bobin yapısına sahip DD topolojisi kullanılacaktır. Ayrıca bundan sonra aracın x doğrultusunda hareket ettiği ve bu doğrultusundaki hizalama hatalarının araç sürücüsü tarafından giderilebildiği varsayılarak sistemin sadece y doğrultusundaki hizalama hataları incelenecektir.

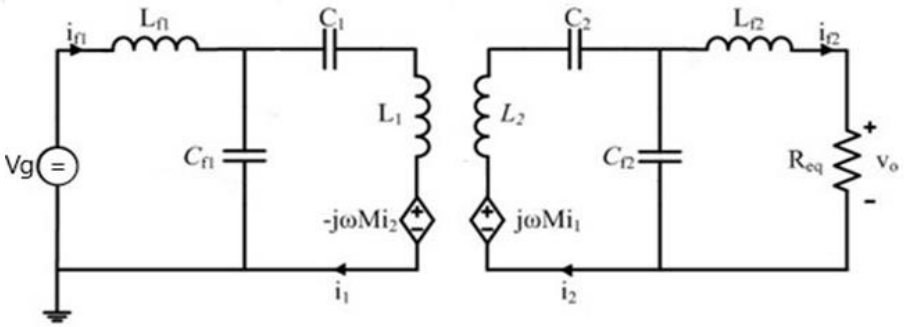
3.3.2 Kompanzasyon topolojisi seçimi

Sistemde önceki bölümde incelenen kompanzasyon topolojileri arasından yüksek verimle güç aktarımına imkan veren LCC topolojisi kullanılmıştır. Topoloji hem primerde hem de sekonderde kullanılmıştır. Bu sebeple ortaya çıkan ve LCC topolojisinin en büyük dezavantajlarından biri olan kompanzasyon devresindeki bobinlerin sistemin hacmini artırmasına, [74]'deki çalışmaya benzer olarak kompanzasyon bobinlerinin ana bobin sistemine eklenmesi fikrinden yola çıkılarak çözüm getirilmiştir. Fakat yapılan bu çalışmada, yer tasarrufu açısından sistemin araç üzerindeki kısmının kompaktlığı elzem olduğundan sadece araç üzerinde bulunan

sekonder kompanzasyon bobini ana bobin sistemine entegre edilmiş, primer kompanzasyon bobini ise kompanzasyon devresinde bırakılmıştır. LCC topolojisi Şekil 3.10 ve 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.10 : LCC topolojisi [74].



Şekil 3.11 : Rezonans çevirici LCC topoloji eşdeğer devresi.

3.3.3 LCC topolojinin analizi

Rezonans çeviricide kullanılan LCC topolojisinde rezonans koşulunu sağlayacak L_1, L_2, L_{f1}, L_{f2}, C_1, C_2, C_{f1} ve C_{f2} olmak üzere 8 adet ana devre elemanı bulunmaktadır. Primer tarafta L_{f1} C_{f1} ile, L_1 ve C_1 beraber C_{f1} ile rezonans halindedir. LCC topolojisinin simetrik yapısından ötürü primer tarafta olduğu gibi sekonder tarafta da L_{f2} C_{f2} ile, L_2 ve C_2 beraber C_{f2} ile rezonans halindedir.

$$\omega L_{f1} - \frac{1}{\omega C_{f1}} = 0 \tag{3.1}$$

$$\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_{f1}} = 0 \tag{3.2}$$

$$\omega L_{f2} - \frac{1}{\omega C_{f2}} = 0 \tag{3.3}$$

$$\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} - \frac{1}{\omega C_{f2}} = 0 \tag{3.4}$$

Maxwell SEY nümerik analizleri sonucu L_1, L_2, L_{f2} değerleri elde edilmişti. Analizde L_{f1} değeri de L_{f2}'ye eşit olarak alınacaktır. Böylece rezonans denklemlerindeki dört parametre bilinir hale gelmiştir. Denklemler düzenlenirse bilinmeyen C_1, C_2, C_{f1} ve C_{f2} değerleri aşağıdaki denklemler yardımıyla elde edlebilir.

$$C_{f1} = \frac{1}{\omega^2 L_{f2}} \tag{3.5}$$

$$C_{f2} = \frac{1}{\omega^2 L_{f2}} \tag{3.6}$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 \left(L_1 - L_{f1}\right)} \tag{3.7}$$

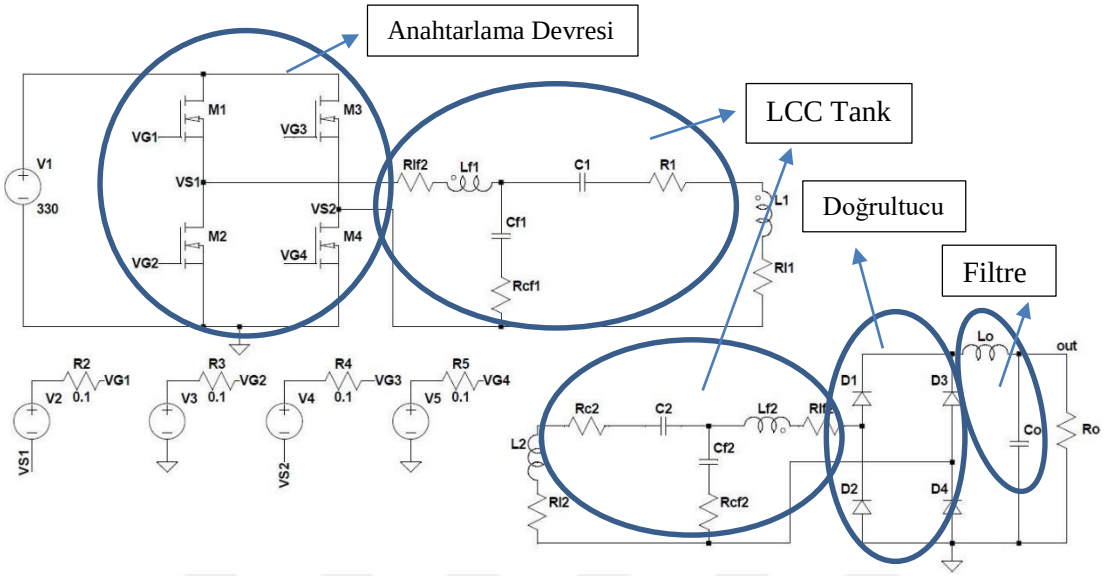
$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 \left(L_2 - L_{f2}\right)} \tag{3.8}$$

3.3.4 Devre modelinin LTspice ortamında oluşturulması

Devrelerin modellenmesi sırasında çözümü kolaylaştırmak adına ideal oldukları kabul edilen devre elemanları gerçek hayatta ideal değillerdir. Bu ideal olmayan durumlar sistemlerde kayıplara sebep olmaktadır. Elemanlar ideal olarak kabul edildiğinde normalde sistemde meydana gelen kayıplar ihmal edilir ve benzetişim gerçekteki sistem ile daha farklı sonuçlar verir. Bu sebeple benzetişim yapılırken sistemdeki elemanların ideal olmadığı bilinmeli ve ideal durumu bozan etkenler sisteme eklenmelidir. Sistemlerde idealliği bozan etkenlerin başında kapasite ve endüktans gibi elemanların sahip olduğu eşdeğer seri direnç (ESR) gelir. Bu direnç sisteme eklendiği takdirde daha gerçekçi sonuçlar elde edilecektir. Tez çalışması kapsamında sistemin daha gerçekçi sonuçlar vermesi için benzetişimi yapılırken ideal olmayan durumlar da kapsama alınacaktır.

Bir önceki bölümde ele alınan 4 aşama için elde edilen sonuçlar doğrultusunda her sistemin benzetişimi yapılacaktır. Bu sistemler giriş gücü, çıkış gücü ve verim açısından karşılaştırılacaktır. Her aşamada belirlenen farklı değişkenlerin bu

parametrelere etkisi bu kıyaslama sonucunda daha iyi gözlemlenebilecektir. LTspice'ta modellenen kablosuz şarj sistemi Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3.12 : LTspice'ta modellenen şarj sistemi.

LTspice modelinde anahtarlama elemanı olarak çok düşük iletim direncine sahip olması ($R_{DS(on)}$ = 32mΩ) ve yüksek frekans anahtarlamaya uygun olması sebebiyle Infineon BSC320N20NS3 Mosfet kullanılmıştır. LTspice'ta mosfetin spice modeli kullanılarak mosfetin sisteme tüm etkileri dahil edilmiş ve böylece gerçekçi sonuçlar alınması hedeflenmiştir. Mosfetin datasheeti EK-A'da yer almaktadır.

Diyot olarak ise düşük kaçak akım ve düşük toparlanma süresine (t_r = 35ns @25°C, t_r = 100ns @100°C) sahip olması sebebiyle IXYS DSEC60-06A kullanılmıştır. LTspice'ta diyodun spice modeli kullanılarak diyodun sisteme tüm etkileri dahil edilmiş ve böylece gerçekçi sonuçlar alınması hedeflenmiştir. Diyodun datasheeti EK-B'de yer almaktadır.

Kompanzasyon için kullanılan kapasitörler ise yüksek akım taşıma kapasitesine ve düşük ESR değerine sahip olması sebebiyle Electronic Conceps 5PT serisinden polipropilen & folyo resonant güç kaynağı kapasitörlerinden seçilmiştir. Kapasitelerin datasheetleri EK-C'de yer almaktadır.

LTspice modelinde kullanılan endüktansların eşdeğer seri dirençleri Maxwell nümerik analizleri sonucundan bilinmektedir. Kapasiteler için bu değer kayıp faktörü (DF) ile orantılıdır.

$$R_C = DF \cdot \left| \frac{1}{j\omega C} \right| \tag{3.9}$$

Electronic Concept 5PT Serisinden seçilen kapasitelerin kayıp faktörleri %0.05 olarak alınmıştır. Kapasite ve endüktanslar için eşdeğer seri dirençlerin hesaplanıp devreye eklenmesi ile ideal olmayan durum elde edilerek kapsama alınmış olacaktır.

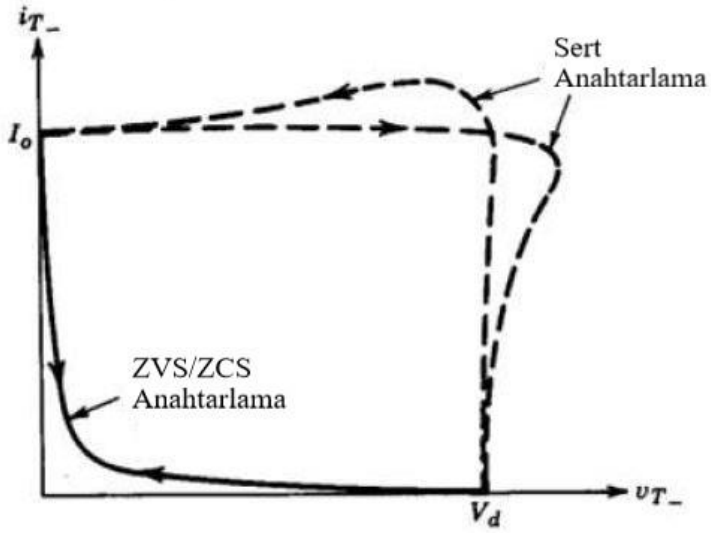
3.3.5 Yumuşak anahtarlama

SAE J2954'te elektrikli araçlardaki KET için nominal anahtarlama frekansı 85 kHz olarak belirlenmiştir [55]. Bu derece yüksek frekanslarda çalışmak sistemlerde kullanılan endüktans ve kapasitelerin boyutlarını küçültmeye imkan vermektedir fakat anahtarlama kayıplarının ise artmasına sebep olmaktadır. Anahtarlama kayıpları sistemlerin performanslarını ve verimlerini düşüren başlıca faktörlerdendir. Bu sebeple yüksek anahtarlama frekanslarında çalışırken anahtarlama kayıplarını azaltacak veya ortadan kaldıracak yöntemler kullanılmalıdır. Bu yöntemler genel olarak yumuşak anahtarlama (soft switching) olarak isimlendirilir.

Anahtarlama sırasında meydana gelen kayıp, o andaki akım ve gerilimin çarpımına eşittir. Bu sebeple anahtarlama kaybını ortadan kaldırmak için akım ya da gerilimin sıfır olduğu anda anahtarlama yapılmalıdır. Akımın sıfır olduğu anda anahtarlama yapılan yönteme sıfır akımda anahtarlama (ZCS), gerilimin sıfır olduğu anda anahtarlama yapılan yönteme ise sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) denir. Tasarlanan sistemde sıfır gerilimde anahtarlama yapılmıştır. Yumuşak ve sert anahtarlamaya ait anahtarlama kayıpları ve dalga şekilleri Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te görülebilir.



Şekil 3.13 : Anahtarlama kaybı: (a) Sert anahtarlama. (b) Yumuşak anahtarlama.



Şekil 3.14 : Sert ve yumuşak anahtarlama akım-gerilim dalga şekilleri [8].

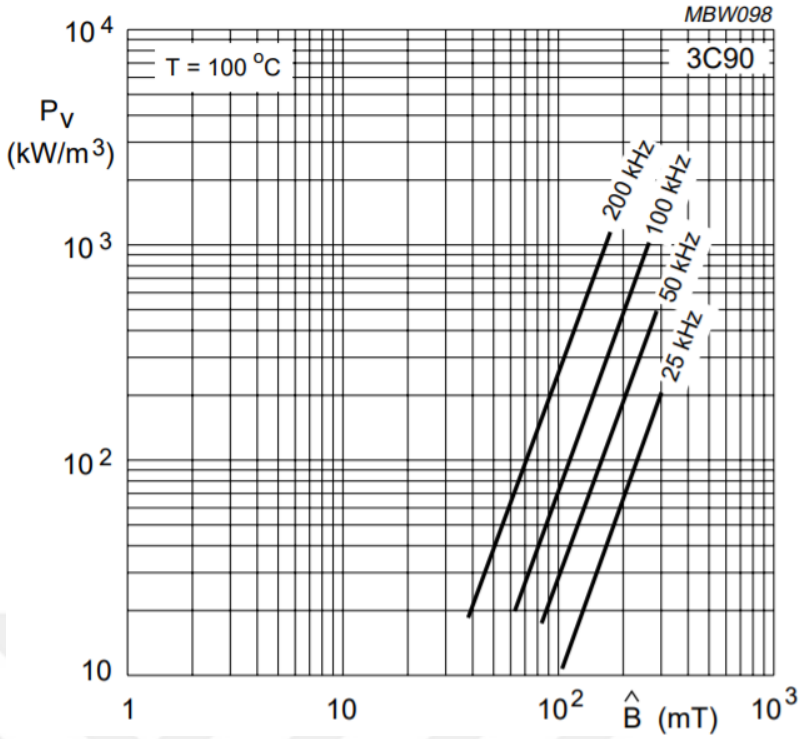
3.4 Optimize Edilecek Sistemin İncelenmesi

Optimize edilecek sistemdeki primer, sekonder ve kompanzasyon bobinlerine ait parametreler Çizelge 3.4'te görülmektedir.

Çizelge 3.4 : Optimize edilecek sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [µH]	510.94	L_2 [µH]	235.91	$L_{f1} = L_{f2}$ [µH]	105.7
R_1 [mΩ]	215.09	R_2 [mΩ]	151.6	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	95.049
N_1	20	N_2	15	N_{f2}	12
l_1 [mm]	770	l_2 [mm]	770	l_{f2} [mm]	360
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	6	a_2 [mm]	9.3	a_{f2} [mm]	3.3
q_1 [mm^2]	6.25	q_2 [mm^2]	6.25	q_{f2} [mm^2]	6.25
C_1 [nF]	6.8	C_2 [nF]	15	C_{f2} [nF]	33
R_{C1} [mΩ]	441	R_{C2} [mΩ]	207	R_{Cf2} [mΩ]	96

Optimize edilecek sistemdeki ferritlere ait parametreler ise Çizelge 3.5'te görülmektedir. Sistemde kullanılan ferritler 3C90 tipidir. I tipi olan bu ferrit bloğuna ait frekansa göre değişen güç kaybı-manyetik akı grafiği Şekil 3.15'te görülebilir. 3C90 tip ferrite ait datasheet ise EK-D'de verilmektedir.



Şekil 3.15 : 3C90 tip ferrit için güç kaybı-manyetik akı grafiği.

Bobin ve ferritlere ait parametrelere ek olarak kablosuz şarj sistemin genel parametreleri Çizelge 3.6'da görülmektedir. Çizelge 3.4, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da parametreleri verilen sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi ise Çizelge 3.7'de görülmektedir.

Çizelge 3.5 : Optimize edilecek sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	93
q_{ferrit} [mm^2]	840
a_{ferrit} [mm]	33
N_{ferrit_s}	6
N_{ferrit_p}	3

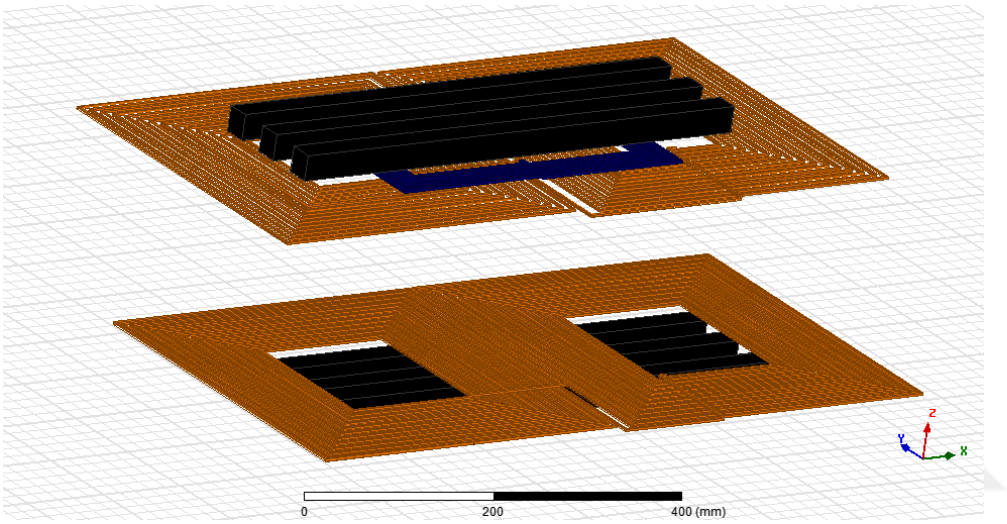
Çizelge 3.6 : Optimize edilecek kablosuz şarj sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	200
f [kHz]	85
k_{12}= k_{21}	0.2693
k_{23}= k_{32}	0.010439
k_{13}= k_{31}	0.000986
M_{12}= M_{21} [µH]	93.497
M_{23}= M_{32} [µH]	1.6484
M_{13}= M_{31} [µH]	0.22908

Çizelge 3.7 : Optimize edilecek sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.2693	0.2553	0.2191

ANSYS Maxwell'de tasarlanan sistem Şekil 3.16'da görülmektedir. Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 3.8'de görülebilir.



Şekil 3.16 : Optimize edilecek kablosuz şarj sistemi.

Çizelge 3.8 : Optimize edilecek sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390V DC
Vout [V]	306V DC
Pin [W]	3407 W
Pout [W]	3235 W
η [%]	94.95
η/S_b	3.0076×10^{-6}

4. KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMİNİN OPTİMİZASYONU

Bu bölümde bir önceki bölümde incelenmiş olan kablosuz şarj sisteminin optimizasyonu gerçekleştirilecektir. Kablosuz şarj sisteminin optimizasyonu, bobin sisteminin optimizasyonu ve ferrit sisteminin optimizasyonu olmak üzere iki ana başlık altında gerçekleştirilecektir. Bobin sistemi optimizasyonu kapsamında primer, sekonder ve kompanzasyon bobinlerinin sarım sayıları ve sarım aralıkları belirlenecek, primer ve sekonder bobinler arası mesafe (hava aralığı) belirlenecek ve primer-sekonder bobinlerin yüzey alanlarının birbirlerine göre durumları incelenecektir. Ferrit sisteminin optimizasyonu kapsamında ise ferritlerin malzemesi, boyutları, sayısı ve sıralaması belirlenecektir.

4.1 Bobinlerin Boyutları, Kesit Alanları, Sarım Sayısı, Sarım Aralığı ve Hava Boşluğunun Belirlenmesi

Bu bölümde kablosuz şarj sistemindeki bobinlerin boyutları, sarım sayıları, sarım aralıkları ve primer-sekonder bobinler arasındaki hava boşluğu optimize dilecektir. Optimizasyon kıstası için sistemin verimi ile bobinlerin yüzey alanı arasındaki η/S_b oranı dikkate alınacaktır.

Bölüm 3.4'te incelenen sistemde primer taraftan yaklaşık 14A, sekonder taraftan ise yaklaşık 6A akım akmaktadır. Bobinlerin kesit alanlarının fazla olması sebebiyle akım yoğunlukları çok düşüktür. Yaklaşık 4 A/mm^2'lik akım yoğunluğu, bobin tasarımı sırasında bakır kaybı ile bobin kullanımı açısından iyi bir denge sağlar [44]. Bu sebeple primer ve sekonder tarafta akan akımların büyüklükleri düşünülülerek bobinlerin kesit alanları revize edilmiştir.

Kablosuz şarj sistemlerinin kompakt yapıda olması oldukça önemlidir. Sekonder sistemin araçta bulunması sebebiyle alan yetersizliği mevcuttur. 770x620 mm boyuta sahip olan ilk sistem daha kompakt hale getirilecektir. Bu amaçla oluşturulan yeni sistemde bobin uzunluğu sabit tutularak bobin genişliği kademeli olarak azaltılacaktır. Sistemin boyutları düşürülürken bağlantı katsayısı ve verim incelenecek, η/S_b oranını

maksimize eden bobin boyutları seçilecektir. Tasarlanan ikinci sistemde primer ve sekonder bobinlerin genişlikleri 770 mm'den 620 mm'ye düşürülmüştür. Çizelge 4.1'de eski ve revize edilmiş kesit alanları ile bobin boyutları görülmektedir.

Çizelge 4.1 : İkinci sistemde değişen parametreler.

Parametreler	Eski Değer	Yeni Değer
q_1 [mm^2]	6.25	3.24
q_2 [mm^2]	6.25	1.44
q_{f2} [mm^2]	6.25	3.24
l_1 [mm]	770	620
l_2 [mm]	770	620

İkinci sisteme ait parametreler Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te görülmektedir.

Çizelge 4.2 : İkinci sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [μH]	407	L_2 [μH]	179.06	$L_{f1} = L_{f2}$ [μH]	106.93
R_1 [mΩ]	296.8	R_2 [mΩ]	429.25	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	116.44
N_1	20	N_2	15	N_{f2}	12
l_1 [mm]	620	l_2 [mm]	620	l_{f2} [mm]	360
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	6	a_2 [mm]	9.3	a_{f2} [mm]	3.3
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.6	C_2 [nF]	20	C_{f2} [nF]	33
R_{C1} [mΩ]	400	R_{C2} [mΩ]	170	R_{Cf2} [mΩ]	96

Çizelge 4.3 : İkinci sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	200
f [kHz]	85
$k_{12}= k_{21}$	0.19837
$k_{23}= k_{32}$	0.0102
$k_{13}= k_{31}$	0.0006
$M_{12}= M_{21}$ [μH]	53.552
$M_{23}= M_{32}$ [μH]	1.4113
$M_{13}= M_{31}$ [μH]	0.12524

Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te parametreleri verilen ikinci sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.5'te görülmektedir.

Çizelge 4.4 : İkinci sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	93
q_{ferrit} [mm^2]	840
a_{ferrit} [mm]	33
N_{ferrit_s}	6
N_{ferrit_p}	3

Çizelge 4.5 : İkinci sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.19837	0.18661	0.16233

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.6'da görülebilir.

Çizelge 4.6 : İkinci sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	308
Pin [W]	3989
Pout [W]	3270
η [%]	84
η/S_b	$3{,}324 \times 10^{-6}$

Bobin kesitlerinin azaltılması ve bobin boyutlarının düşürülmesi sonucunda primer ve sekonder endüktansları düşmüştür. Bu sebeple de primer-sekonder bobinler arası bağlantı katsayısı ve verim düşmüştür. Primer-sekonder bobinler arası bağlantı katsayısının ve verimin artırılması için endüktans değerleri, optimize edilecek sistemin endüktans değerlerine eşitlenmiştir. Bobin sarım aralıkları Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi değiştirilerek bobin primer-sekonder bobin endüktansları artırılmıştır.

Çizelge 4.7 : Üçüncü sistemde değişen parametreler.

Parametreler	Eski Değer	Yeni Değer
a_1 [mm]	6	4.8
a_2 [mm]	9.3	7.8

Tasarlanan üçüncü sisteme ait parametreler Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da görülmektedir.

Çizelge 4.8 : Üçüncü sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [µH]	513.01	L_2 [µH]	233.5	$L_{f1} = L_{f2}$ [µH]	107.33
R_1 [mΩ]	337.29	R_2 [mΩ]	419.89	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	112.46
N_1	20	N_2	15	N_{f2}	12
l_1 [mm]	620	l_2 [mm]	620	l_{f2} [mm]	360
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	4.8	a_2 [mm]	7.8	a_{f2} [mm]	3.3
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	6.8	C_2 [nF]	15	C_{f2} [nF]	33
R_{C1} [mΩ]	441	R_{C2} [mΩ]	207	R_{Cf2} [mΩ]	96

Çizelge 4.9 : Üçüncü sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	93
q_{ferrit} [mm^2]	840
a_{ferrit} [mm]	33
N_{ferrit_s}	6
N_{ferrit_p}	3

Çizelge 4.10 : Üçüncü sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	200
f [kHz]	85
$k_{12} = k_{21}$	0.20312
$k_{23} = k_{32}$	0.00153
$k_{13} = k_{31}$	0.0025
$M_{12} = M_{21}$ [µH]	70.3
$M_{23} = M_{32}$ [µH]	0.243
$M_{13} = M_{31}$ [µH]	0.586

Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da parametreleri verilen üçüncü sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.11'de görülmektedir.

Çizelge 4.11 : Üçüncü sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.20132	0.19122	0.16491

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.12'de görülebilir.

Çizelge 4.12 : Üçüncü sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	308.5
Pin [W]	3647.5
Pout [W]	3281.4
η [%]	89.96
η/S_b	$3{,}539 \times 10^{-6}$

Çizelge 4.12'de görüldüğü gibi endüktans değerlerinin artırılmasıyla verim artmıştır fakat primer-sekonder bobinler arası bağlantı katsayısında ciddi bir artış olmamıştır. Bağlantı katsayısının artması için iki bobin arasındaki hava aralığının azaltılmasına karar verilmiştir. Literatürde tasarlanan sistemlere kıyasla güncel bir değer olan 150 mm seçilmiştir. Bununla birlikte bobin genişlikleri de 550mm'ye düşürülmüştür. Daha kompakt hale getirilen sistem için elektromanyetik analizler öncesi LTspice'ta gerçekleştirilen analizler sonucu sistem verimini yükseltmek amacıyla bobin endüktansları için uygun değerler belirlenmiştir. Bobin genişliklerinin azaltılmasının endüktansı düşürücü etkisini dengelemek için bobinlerin sarım sayıları ve sarım aralıkları da Çizelge 4.13'te görüldüğü gibi değiştirilmiştir. Bobin genişliğinin azalmasından ötürü sistemde kullanılan ferrit bloklarından her sırada birer tane eksiltilmiştir. Böylece ferritler önceki sistemde olduğu gibi bobin yüzey alanı içerisinde bırakılmış ve ferrritlerin akan akıya yol göstermesi sağlanmıştır.

Çizelge 4.13 : Dördüncü sistemde değişen parametreler.

Parametreler	Eski Değer	Yeni Değer
a_1 [mm]	4.8	4.6
a_2 [mm]	7.8	6.8
a_{f2} [mm]	3.3	3.6
N_1	20	18
N_2	15	12
l_1 [mm]	620	550
l_2 [mm]	620	550
l_{f2} [mm]	360	300
N_{ferrit_s}	6	5
g[mm]	200	150

Dördüncü sisteme ait parametreler Çizelge 4.14, Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16'da görülmektedir.

Çizelge 4.14 : Dördüncü sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [µH]	427.93	L_2 [µH]	192.08	$L_{f1} = L_{f2}$ [µH]	89.367
R_1 [mΩ]	295.95	R_2 [mΩ]	349.35	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	94.49
N_1	18	N_2	12	N_{f2}	12
l_1 [mm]	550	l_2 [mm]	550	l_{f2} [mm]	300
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	4.6	a_2 [mm]	6.8	a_{f2} [mm]	3.6
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.2	C_2 [nF]	18	C_{f2} [nF]	39
R_{C1} [mΩ]	365	R_{C2} [mΩ]	171	R_{Cf2} [mΩ]	81

Çizelge 4.15 : Dördüncü sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	93
q_{ferrit} [mm^2]	840
a_{ferrit} [mm]	33
N_{ferrit_s}	5
N_{ferrit_p}	3

Çizelge 4.16 : Dördüncü sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	150
f [kHz]	85
$k_{12} = k_{21}$	0. 271233
$k_{23} = k_{32}$	0.0024
$k_{13} = k_{31}$	0.002852
$M_{12} = M_{21}$ [µH]	77.763
$M_{23} = M_{32}$ [µH]	0.315
$M_{13} = M_{31}$ [µH]	0.022

Çizelge 4.14, Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16'da parametreleri verilen dördüncü sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.17'de görülmektedir.

Çizelge 4.17 : Dördüncü sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.271233	0.254716	0.215264

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.18'de görülebilir.

Çizelge 4.18 : Dördüncü sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	306.6
Pin [W]	3460.5
Pout [W]	3241.3
η [%]	93.66
η/S_b	4.1534×10^{-6}

Tasarlanan dördüncü sistemde hedeflendiği gibi hem verim hem de primer-sekonder bobinler arası bağlantı katsayısında bir artış olmuştur. Tasarlanan beşinci sistemde bobin genişlikleri 450 mm'ye düşürülmüş ve bobin endüktanslarının belirlenen değerde sabit tutulması adına sarım sayıları ve sarım aralıkları Çizelge 4.19'da görüldüğü gibi değiştirilmiştir. Ayrıca bobin genişliğinin azalmasından ötürü sistemde kullanılan ferrit bloklarından her sırada birer tane daha eksiltilmiştir. Tasarlanan beşinci sisteme ait parametreler Çizelge 4.20, Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.22'de görülmektedir.

Çizelge 4.19 : Beşinci sistemde değişen parametreler.

Parametreler	Eski Değer	Yeni Değer
a_1 [mm]	4.6	3.8
a_2 [mm]	6.8	6.1
a_{f2} [mm]	3.6	2.5
N_1	18	19
N_2	12	14
l_1 [mm]	550	450
l_2 [mm]	550	450
l_{f2} [mm]	300	240
N_{ferrit_s}	5	4

Çizelge 4.20 : Beşinci sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	93
q_{ferrit} [mm^2]	840
a_{ferrit} [mm]	33
N_{ferrit_s}	4
N_{ferrit_p}	3

Çizelge 4.21 : Beşinci sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [μH]	433.42	L_2 [μH]	196.55	$L_{f1} = L_{f2}$ [μH]	88.482
R_1 [mΩ]	349.61	R_2 [mΩ]	400.04	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	118.34
N_1	19	N_2	14	N_{f2}	12
l_1 [mm]	450	l_2 [mm]	450	l_{f2} [mm]	240
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	3.8	a_2 [mm]	6.1	a_{f2} [mm]	2.5
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.2	C_2 [nF]	18	C_{f2} [nF]	39
R_{C1} [mΩ]	365	R_{C2} [mΩ]	171	R_{Cf2} [mΩ]	81

Çizelge 4.22 : Beşinci sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	150
f [kHz]	85
$k_{12}= k_{21}$	0. 2092
$k_{23}= k_{32}$	0.00243
$k_{13}= k_{31}$	0.00121
$M_{12}= M_{21}$ [μH]	61.06
$M_{23}= M_{32}$ [μH]	0.3205
$M_{13}= M_{31}$ [μH]	0.2373

Çizelge 4.20, Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.22'de parametreleri verilen beşinci sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.23'te görülmektedir.

Çizelge 4.23 : Beşinci sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.2092	0.1962	0.1651

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.24'te görülebilir.

Tasarlanan beşinci sistemin verimi ve primer-sekonder bobinler arası bağlantı katsayısı dördüncü sisteme göre düşmüştür. Verim hedeflenen %90 seviyesinin altına düştüğünden dolayı tasarlanan altıncı sistemdeki bobin genişliklerinin artırılarak dördüncü ve beşinci tasarımlar arasında bir değer olan 500 mm'ye getirilmesine karar

verilmiştir. Bobin endüktanslarının belirlenen değerde sabit tutulması adına sarım aralıkları Çizelge 4.25'te görüldüğü gibi değiştirilmiştir. Tasarlanan beşinci sisteme ait parametreler Çizelge 4.26, Çizelge 4.27 ve Çizelge 4.28'de görülmektedir.

Çizelge 4.24 : Beşinci sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	306.5
Pin [W]	3640.9
Pout [W]	3237.8
η [%]	89
η/S_b	4.824×10^{-6}

Çizelge 4.25 : Altıncı sistemde değişen parametreler.

Parametreler	Eski Değer	Yeni Değer
a_1 [mm]	3.8	4.3
a_2 [mm]	6.1	7
l_1 [mm]	450	500
l_2 [mm]	450	500

Çizelge 4.26 : Altıncı sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [μH]	430.64	L_2 [μH]	192.39	$L_{f1} = L_{f2}$ [μH]	88.355
R_1 [mΩ]	317.81	R_2 [mΩ]	393.64	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	120.78
N_1	19	N_2	14	N_{f2}	12
l_1 [mm]	500	l_2 [mm]	500	l_{f2} [mm]	240
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	4.3	a_2 [mm]	7	a_{f2} [mm]	2.5
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.2	C_2 [nF]	18	C_{f2} [nF]	39
R_{C1} [mΩ]	365	R_{C2} [mΩ]	171	R_{Cf2} [mΩ]	81

Çizelge 4.27 : Altıncı sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	93
q_{ferrit} [mm^2]	840
a_{ferrit} [mm]	33
N_{ferrit_s}	4
N_{ferrit_p}	3

Çizelge 4.28 : Altıncı sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	150
f [kHz]	85
$k_{12}= k_{21}$	0. 2389
$k_{23}= k_{32}$	0.00045
$k_{13}= k_{31}$	0.00792
$M_{12}= M_{21}$ [µH]	68.767
$M_{23}= M_{32}$ [µH]	0.0589
$M_{13}= M_{31}$ [µH]	1.5447

Çizelge 4.26, Çizelge 4.27 ve Çizelge 4.28'de parametreleri verilen altıncı sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.29'da görülmektedir.

Çizelge 4.29 : Altıncı sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.2389	0.2239	0.1883

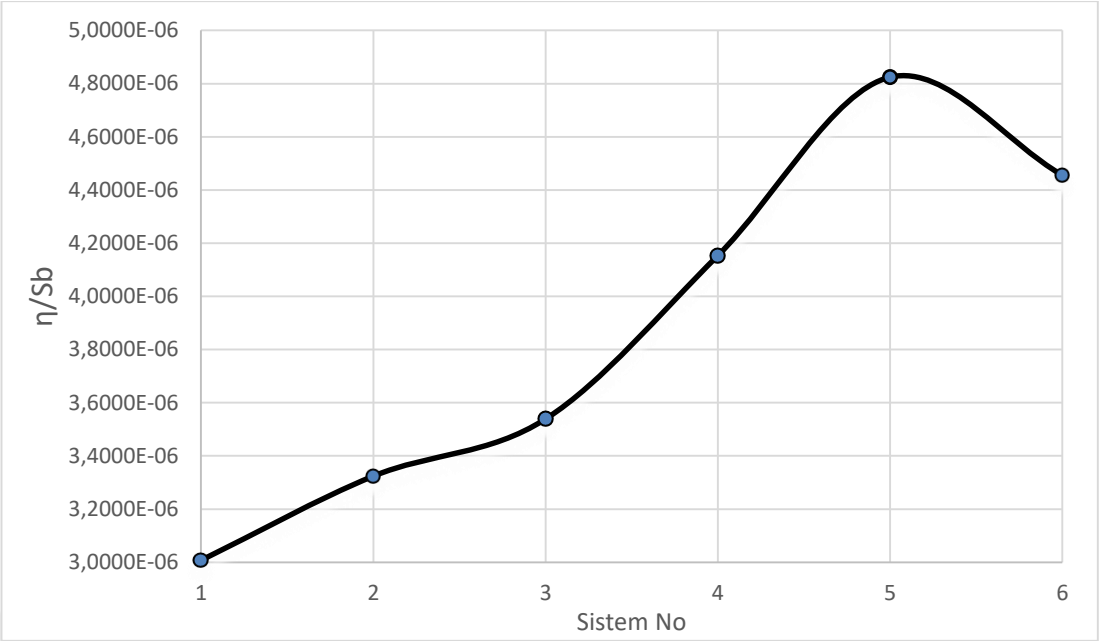
Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.30'da görülebilir.

Çizelge 4.30 : Altıncı sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	306.76
Pin [W]	3553.1
Pout [W]	3244.9
η [%]	91.33
η/S_b	4.455×10^{-6}

Tasarlanan altıncı sistemin çıktıları incelendiğinde verimin hedeflenen %90 değerinden fazla olduğu ve primer-sekonder arasındaki bağlantı katsayısının beşinci sisteme göre arttığı ve görülmektedir.

Verim ile bobin yüzey alanı arasındaki oranın tasarlanan sistemlere göre değişimi Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 : Tasarlanan sistemlere göre η/S_b değişimi.

η/S_b oranı bir önceki sisteme göre düşmüş olsa da diğer çıktılar istenen seviyede olduğundan dolayı altıncı sistem seçilmiştir. Tasarlanan sistemde primer ve sekonder bobinlerin boyutları birbirine eşittir. Bir ara adım olarak bobin boyutlarının birbirinden farklı olduğu iki durum incelenecektir. Bu iki durumdaki bobin boyutları aşağıda verilmiştir.

1) Primer Bobin: 500 x 410 mm

   Sekonder Bobin: 450 x 410 mm

2) Primer Bobin: 500 x 410 mm

   Sekonder Bobin: 550 x 410 mm

Birinci durum için oluşturulan 6_1. sisteme ait parametreler Çizelge 4.31, Çizelge 4.32 ve Çizelge 4.33'te görülmektedir.

Çizelge 4.31 : 6_1. sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	93
q_{ferrit} [mm^2]	840
a_{ferrit} [mm]	33
N_{ferrit_s}	4
N_{ferrit_p}	3

Çizelge 4.32 : 6_1. sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [μH]	431.49	L_2 [μH]	196.47	$L_{f1} = L_{f2}$ [μH]	88.428
R_1 [mΩ]	323.96	R_2 [mΩ]	398.37	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	119.69
N_1	19	N_2	14	N_{f2}	12
l_1 [mm]	500	l_2 [mm]	450	l_{f2} [mm]	240
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	4.3	a_2 [mm]	6.1	a_{f2} [mm]	2.5
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.2	C_2 [nF]	18	C_{f2} [nF]	39
R_{C1} [mΩ]	365	R_{C2} [mΩ]	171	R_{Cf2} [mΩ]	81

Çizelge 4.33 : 6_1. sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	150
f [kHz]	85
$k_{12}= k_{21}$	0. 2231
$k_{23}= k_{32}$	0.0016
$k_{13}= k_{31}$	0.0002
$M_{12}= M_{21}$ [μH]	64.957
$M_{23}= M_{32}$ [μH]	0.2117
$M_{13}= M_{31}$ [μH]	0.0371

Çizelge 4.31, Çizelge 4.32 ve Çizelge 4.33'te parametreleri verilen altıncı sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.34'te görülmektedir.

Çizelge 4.34 : 6_1. sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.2231	0.2096	0.1766

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.35'te görülebilir.

Çizelge 4.35 : 6_1. sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	306.96
Pin [W]	3.5847
Pout [W]	3.2491
η [%]	90.6

İkinci durum için oluşturulan 6_2. sisteme ait parametreler Çizelge 4.36, Çizelge 4.37 ve Çizelge 4.38'de görülmektedir.

Çizelge 4.36 : 6_2. sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [μH]	426.19	L_2 [μH]	189.74	$L_{f1} = L_{f2}$ [μH]	89.677
R_1 [mΩ]	322.66	R_2 [mΩ]	356.86	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	111.2
N_1	19	N_2	12	N_{f2}	12
l_1 [mm]	500	l_2 [mm]	550	l_{f2} [mm]	240
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	4.4	a_2 [mm]	6.8	a_{f2} [mm]	2.6
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.2	C_2 [nF]	18	C_{f2} [nF]	39
R_{C1} [mΩ]	365	R_{C2} [mΩ]	171	R_{Cf2} [mΩ]	81

Çizelge 4.37 : 6_2. sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	93
q_{ferrit} [mm^2]	840
a_{ferrit} [mm]	33
N_{ferrit_s}	4
N_{ferrit_p}	3

Çizelge 4.38 : 6_2. sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	150
f [kHz]	85
$k_{12}= k_{21}$	0. 2539
$k_{23}= k_{32}$	0.0013
$k_{13}= k_{31}$	0.0002
$M_{12}= M_{21}$ [μH]	72.21
$M_{23}= M_{32}$ [μH]	0.1636
$M_{13}= M_{31}$ [μH]	0.0346

Çizelge 4.36, Çizelge 4.37 ve Çizelge 4.38'de parametreleri verilen altıncı sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.39'da görülmektedir.

Çizelge 4.39 : 6_2. sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.2539	0.2382	0.2012

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.40'ta görülebilir.

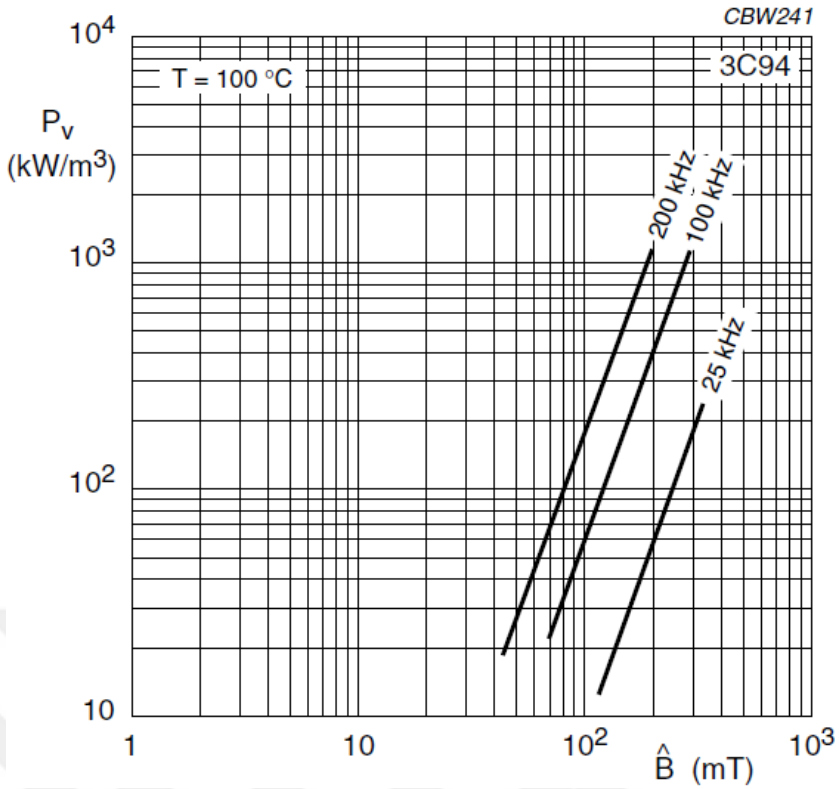
Çizelge 4.40 : 6_2. sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	307.19
Pin [W]	3.555
Pout [W]	3.2539
η [%]	91.5

İki tasarımın verim ve hizalama hatalarına karşı bağlantı katsayılarındaki değişimler incelendiğinde altıncı sisteme göre önemli bir avantaj sağlamadıkları görülmüştür. Her iki sistemin de altıncı sisteme kıyasla hizalama hatalarına karşı gösterdiği tolerans daha fazla olsa da 6_1. sistemde verim daha azdır, 6_2. sistemde ise bobin boyutu arttığından dolayı maliyet artacaktır. Her iki durum bu yönleriyle ele alındığında primer ve sekonder bobinlerin aynı boyutlarda olduğu altıncı sistem ile devam edilmesi daha uygun görülmüştür.

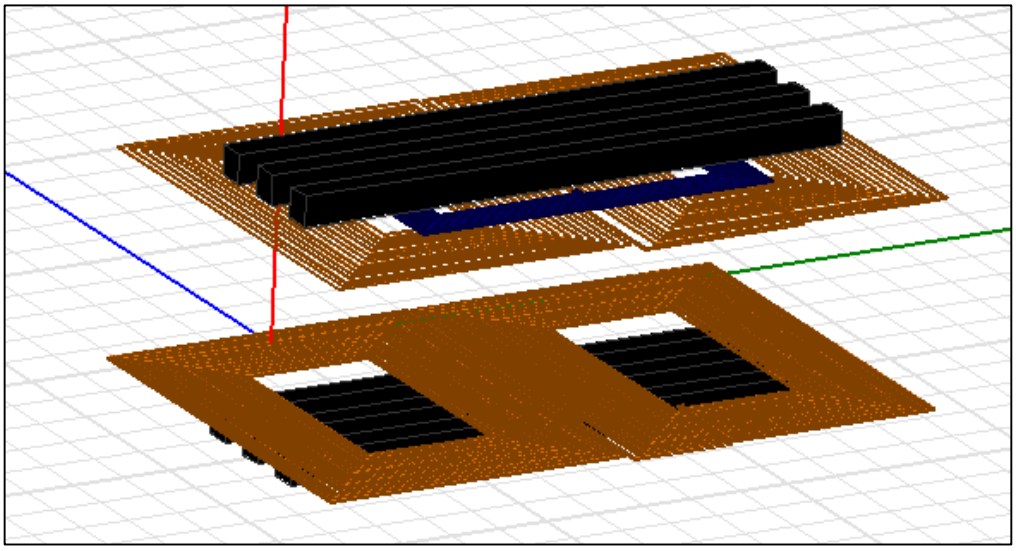
4.2 Ferrit Malzemenin Boyutlarının, Sayısının ve Yerleşiminin Belirlenmesi

Altıncı sistemde kullanılan ferrit 3C90 tiptir. Uzunluğu 93 mm, kesit alanı 840 mm^2 olan bu ferrit bloğunu daha kompakt bir yapıya getirilmesi amacıyla aynı uzunlukta fakat daha düşük kesit alanına sahip olan başka bir ferrit ile yedinci sistem tasarlanmıştır. Yedinci sistemde kullanılan ferrit 3C94 tiptir. Bu ferrit bloğunun kesit alanı 440 mm^2'dir. Ferrit bloğuna ait frekansa göre değişen güç kaybı-manyetik akı grafiği Şekil 4.2'de verilmektedir.

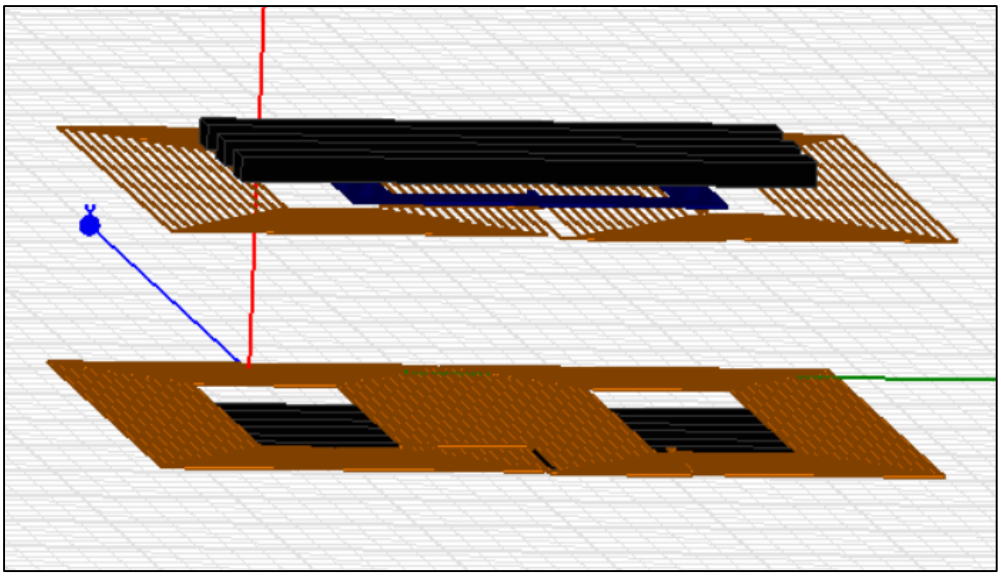


Şekil 4.2 : 3C94 tip ferrit için güç kaybı-manyetik akı grafiği.

3C94 tip ferrite ait datasheet EK-E'de yer almaktadır. Altıncı ve yedinci sistemler Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.3 : Tasarlanan altıncı sistem.



Şekil 4.4 : Tasarlanan yedinci sistem.

Tasarlanan yedinci sisteme ait parametreler Çizelge 4.41, Çizelge 4.42 ve Çizelge 4.43'te görülmektedir.

Çizelge 4.41 : Yedinci sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [µH]	423.26	L_2 [µH]	189.6	$L_{f1} = L_{f2}$ [µH]	88.635
R_1 [mΩ]	317.68	R_2 [mΩ]	386.35	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	112.96
N_1	19	N_2	14	N_{f2}	12
l_1 [mm]	500	l_2 [mm]	500	l_{f2} [mm]	240
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	4.3	a_2 [mm]	7	a_{f2} [mm]	2.5
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.2	C_2 [nF]	18	C_{f2} [nF]	39
R_{C1} [mΩ]	365	R_{C2} [mΩ]	171	R_{Cf2} [mΩ]	81

Çizelge 4.41, Çizelge 4.42 ve Çizelge 4.43'te parametreleri verilen yedinci sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.44'te görülmektedir.

Çizelge 4.42 : Yedinci sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	93
q_{ferrit} [mm^2]	440
a_{ferrit} [mm]	33
N_{ferrit_s}	4
N_{ferrit_p}	3

Çizelge 4.43 : Yedinci sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	150
f [kHz]	85
$k_{12}= k_{21}$	0. 2375
$k_{23}= k_{32}$	0.0057
$k_{13}= k_{31}$	0.0012
$M_{12}= M_{21}$ [µH]	67.291
$M_{23}= M_{32}$ [µH]	0.73066
$M_{13}= M_{31}$ [µH]	0.22877

Çizelge 4.44 : Yedinci sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

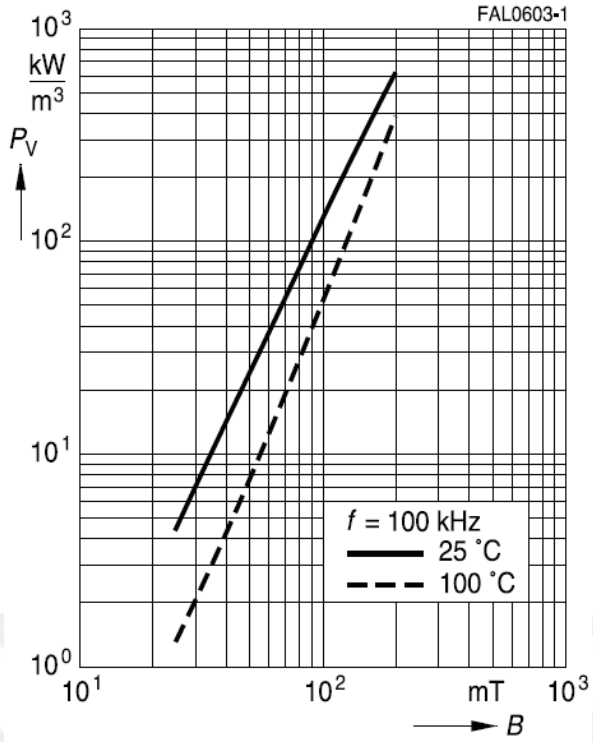
Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.2375	0.2224	0.1868

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.45'te görülebilir.

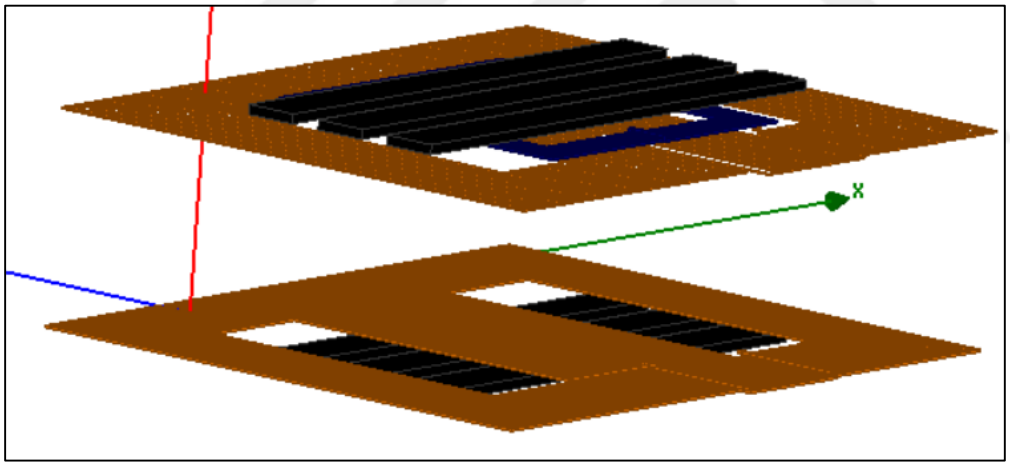
Çizelge 4.45 : Yedinci sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	307.12
Pin [W]	3525.2
Pout [W]	3252.6
η [%]	91.25

Ferrit hacminin azalmasına rağmen elde edilen sonuçlarda elde edilen kazanımların korunduğu gözlenmiştir. Bu sebeple farklı tip bir ferrit kullanarak sekizinci sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sistemdeki ferrit N87 tiptir. Ferrit bloğu 102 mm uzunluğa ve 266 mm^2 kesit alanına sahiptir. Ferrit bloğuna ait frekansa göre değişen güç kaybı-manyetik akı grafiği Şekil 4.5'te görülebilir. N87 tip ferrite ait datasheet EK-F'de yer almaktadır. Şekil 4.6'da görülen sistemde ferrit bloğun uzunluğu arttığından dolayı bobin endüktanslarını hedeflenen değerde sabit tutmak adına bobin sarım aralıkları ve ferrit kesit alanının değişmesinden ötürü ferritlerin eşit aralıklarla dizilmesi için ferrit sıraları arası mesafe de Çizelge 4.46'daki gibi değiştirilmiştir.



Şekil 4.5 : N87 tip ferrit için güç kaybı-manyetik akı grafiği.



Şekil 4.6 : Tasarlanan sekizinci sistem.

Çizelge 4.46 : Sekizinci sistemde değişen parametreler.

Parametreler	Eski Değer	Yeni Değer
a_1 [mm]	4.3	4.4
a_2 [mm]	7	6.9
a_{f2} [mm]	2.5	2.4
a_{ferrit} [mm]	33	22.5
$l_{ferrrit}$ [mm]	93	102

Tasarlanan sekizinci sisteme ait parametreler Çizelge 4.47, Çizelge 4.48 ve Çizelge 4.49'da görülmektedir.

Çizelge 4.47 : Sekizinci sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [µH]	415.51	L_2 [µH]	193.03	$L_{f1} = L_{f2}$ [µH]	90.23
R_1 [mΩ]	310.84	R_2 [mΩ]	400.25	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	129.25
N_1	19	N_2	14	N_{f2}	12
l_1 [mm]	500	l_2 [mm]	500	l_{f2} [mm]	240
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	4.4	a_2 [mm]	6.9	a_{f2} [mm]	2.4
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.2	C_2 [nF]	18	C_{f2} [nF]	39
R_{C1} [mΩ]	365	R_{C2} [mΩ]	171	R_{Cf2} [mΩ]	81

Çizelge 4.48 : Sekizinci sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	102
q_{ferrit} [mm^2]	266
a_{ferrit} [mm]	22.5
N_{ferrit_s}	4
N_{ferrit_p}	3

Çizelge 4.49 : Sekizinci sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	150
f [kHz]	85
$k_{12}= k_{21}$	0. 24
$k_{23}= k_{32}$	0.0046
$k_{13}= k_{31}$	0.0014
$M_{12}= M_{21}$ [µH]	68.084
$M_{23}= M_{32}$ [µH]	0.061
$M_{13}= M_{31}$ [µH]	0.28

Çizelge 4.47, Çizelge 4.48 ve Çizelge 4.49'da parametreleri verilen sekizinci sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.50'ta görülmektedir.

Çizelge 4.50 : Sekizinci sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.24	0.225	0.195

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.51'de görülebilir.

Çizelge 4.51 : Sekizinci sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	307
Pin [W]	3608.1
Pout [W]	3249.6
η [%]	91.3

Ferritlerin daha kompakt bir hale getirilmesine rağmen verim ve bağlantı katsayısında az da olsa bir artış gözlenmiştir. Bunun sebebi N87 ferrit materyalinin güç kayıp değerlerinin daha düşük olmasıdır.

Sekizinci sistemde birbirine paralel üç ferrit sırası bulunmaktaydı. Bu sıralardan bir tanesi eksiltilerek ve sıralar arası mesafe düzenlenerek dokuzuncu sistem tasarlanmıştır. Bu sayede maliyetin düşürülmesi hedeflenmiştir. Ferritlerin azalmasından ötürü bobin endüktanslarını hedeflenen değerde tutmak amacıyla bobin sarım adımları da değiştirilmiştir.

Dokuzuncu sistemde yapılan değişiklikler Çizelge 4.52'de görülebilir. Tasarlanan dokuzuncu sisteme ait parametreler Çizelge 4.53, Çizelge 4.54 ve Çizelge 4.55'te görülmektedir.

Çizelge 4.52 : Dokuzuncu sistemde değişen parametreler.

Parametreler	Eski Değer	Yeni Değer
a_1 [mm]	4.4	3.7
a_2 [mm]	6.9	6.1
a_{ferrit} [mm]	22.5	83
N_{ferrit_p}	3	2

Çizelge 4.53 : Dokuzuncu sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [μH]	421.87	L_2 [μH]	196.16	$L_{f1} = L_{f2}$ [μH]	90.682
R_1 [mΩ]	328.21	R_2 [mΩ]	408.53	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	136.12
N_1	19	N_2	14	N_{f2}	13
l_1 [mm]	500	l_2 [mm]	500	l_{f2} [mm]	240
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	3.7	a_2 [mm]	6.1	a_{f2} [mm]	2.4
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.2	C_2 [nF]	18	C_{f2} [nF]	39
R_{C1} [mΩ]	365	R_{C2} [mΩ]	171	R_{Cf2} [mΩ]	81

Çizelge 4.54 : Dokuzuncu sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	150
f [kHz]	85
$k_{12}= k_{21}$	0. 2437
$k_{23}= k_{32}$	0.00025
$k_{13}= k_{31}$	0.00137
$M_{12}= M_{21}$ [µH]	70.11
$M_{23}= M_{32}$ [µH]	0.033
$M_{13}= M_{31}$ [µH]	0.269

Çizelge 4.55 : Dokuzuncu sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	102
q_{ferrit} [mm^2]	266
a_{ferrit} [mm]	83
N_{ferrit_s}	4
N_{ferrit_p}	2

Çizelge 4.53, Çizelge 4.54 ve Çizelge 4.55'te parametreleri verilen dokuzuncu sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.56'da görülmektedir.

Çizelge 4.56 : Dokuzuncu sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

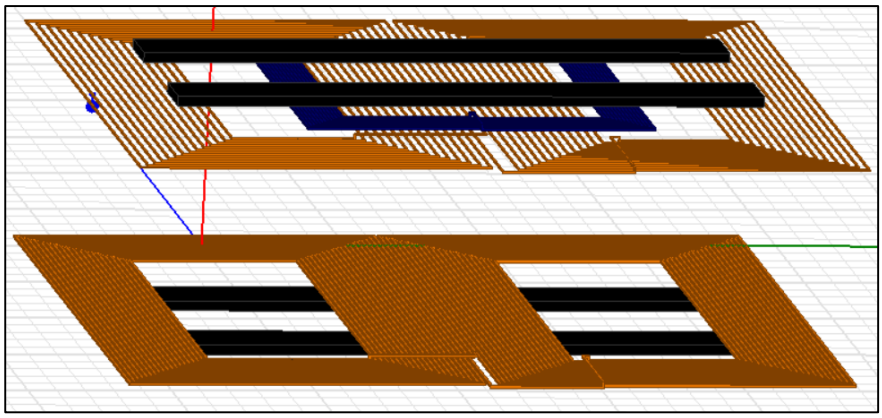
Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.2437	0.2261	0.1993

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra hizalama hatasının olmadığı durum için verim analizi yapılmıştır. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.57'de görülebilir. Sistemde batarya 29 Ω'luk direnç ile sembolize edilmiştir.

Çizelge 4.57 : Dokuzuncu sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Değerler
Vin [V]	390
Vout [V]	307
Pin [W]	3537.3
Pout [W]	3251.3
η [%]	91.9

Tasarlanan dokuzuncu sistem Şekil 4.7'de görülebilir.



Şekil 4.7 : Tasarlanan dokuzuncu sistem.

Birbirine paralel iki sıradan oluşan ferrit sistemi, hem verim hem de primer-sekonder bobinler arası bağlantı katsayısı açısından hedeflenen değerleri sağlamaktadır. Ferritler arası mesafenin 83 mm olduğu dokuzuncu sistemin ardından ferritler arası mesafeye bağlı olarak primer-sekonder bobinler arası bağlantı katsayısı değişimi incelenmiştir. İnceleme sonuçları Çizelge 4.58'de görülebilir.

Çizelge 4.58 : Ferritler arası mesafeye göre bağlantı katsayısındaki değişim.

a_{ferrit} [mm]	k_{12}
0	0.211422
42	0.233914
83	0.243700
100	0.245276
110	0.245372
114	0.245278
116	0.245342
118	0.245238
120	0.245172
126	0.244895
168	0.238770

Bağlantı katsayısının değişimi incelendiğinde iki ferrit arası mesafe 116 mm olduğunda maksimum bağlantı katsayısına ulaşılmıştır. Bu veri ile tasarlanan onuncu sisteme ait parametreler Çizelge 4.59, Çizelge 4.60 ve Çizelge 4.61'de görülmektedir.

Çizelge 4.59 : Onuncu sistemdeki ferrit parametreleri.

Parametreler	Değerler
l_{ferrit} [mm]	102
q_{ferrit} [mm^2]	266
a_{ferrit} [mm]	116
N_{ferrit_s}	4
N_{ferrit_p}	2

Çizelge 4.60 : Onuncu sistemdeki bobin parametreleri.

Primer Bobin		Sekonder Bobin		Kompanzasyon Bobini	
Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler	Parametreler	Değerler
L_1 [µH]	427.17	L_2 [µH]	196.85	$L_{f1} = L_{f2}$ [µH]	88.57
R_1 [mΩ]	335.51	R_2 [mΩ]	415.78	$R_{f1} = R_{f2}$ [mΩ]	132.57
N_1	19	N_2	14	N_{f2}	13
l_1 [mm]	500	l_2 [mm]	500	l_{f2} [mm]	240
w_1 [mm]	410	w_2 [mm]	410	w_{f2} [mm]	240
a_1 [mm]	3.7	a_2 [mm]	6.1	a_{f2} [mm]	2.4
q_1 [mm^2]	3.24	q_2 [mm^2]	1.44	q_{f2} [mm^2]	3.24
C_1 [nF]	8.2	C_2 [nF]	18	C_{f2} [nF]	39
R_{C1} [mΩ]	365	R_{C2} [mΩ]	171	R_{Cf2} [mΩ]	81

Çizelge 4.61 : Onuncu sisteminin genel parametreleri.

Parametreler	Değerler
g [mm]	150
f [kHz]	85
$k_{12}= k_{21}$	0. 245342
$k_{23}= k_{32}$	0.00064
$k_{13}= k_{31}$	0.00168
$M_{12}= M_{21}$ [µH]	71.143
$M_{23}= M_{32}$ [µH]	0.084
$M_{13}= M_{31}$ [µH]	0.3264

Çizelge 4.59, Çizelge 4.60 ve Çizelge 4.61'de parametreleri verilen onuncu sistemin primer ve sekonder bobinleri arasında meydana gelen hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi Çizelge 4.62'de görülmektedir.

Çizelge 4.62 : Onuncu sistemde hatalı hizalama durumunda bağlantı katsayısının değişimi.

Hizalama Hatası	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Δx=0mm	0.245342	0.227513	0.194117

Tasarlanan sistemin elektromanyetik analizi sonucu elde edilen veriler LTspice'ta simule edildikten sonra verimin ve bağlantı katsayısının hizalama hatasına bağlı değişimi analiz edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.63'te görülmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde hizalama hatasının olmadığı durumda yaklaşık 3.3 kW'lık gücün primer taraftan sekonder tarafa %91.47'lik bir verimle aktarıldığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar ile hedeflenen optimizasyon kriterleri sağlanmıştır. Ayrıca hizalama hatalarının meydana geldiği durumlarda da verimin

%87'nin altına düşmeyip sistemin hizalama hatalarına karşı toleransının oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.63 : Onuncu sistemin verim analizi çıktıları.

Parametreler	Δy=0mm	Δy=60mm	Δy=120mm
Vin [V]	390	390	390
Vout [V]	308	307	307.25
Pin [W]	3578.1	3596.4	3706.8
Pout [W]	3272.9	3225	3225.2
η [%]	91.47	89.67	87.01

ANSYS Maxwell'de yapılan analizlerde kullanılan ferrit malzemenin frekansa ve manyetik akıya göre değişen güç kayıp değerleri malzeme özelliklerine tanımlanmıştır. Bu sayede yapılan verim analizlerinde ferrit malzemelerin demir kayıpları da hesaba katılmıştır. Tam hizalı durum için yapılan analizdeki kayıplar ve toplam kayıp içindeki oranları Çizelge 4.64'te görülmektedir.

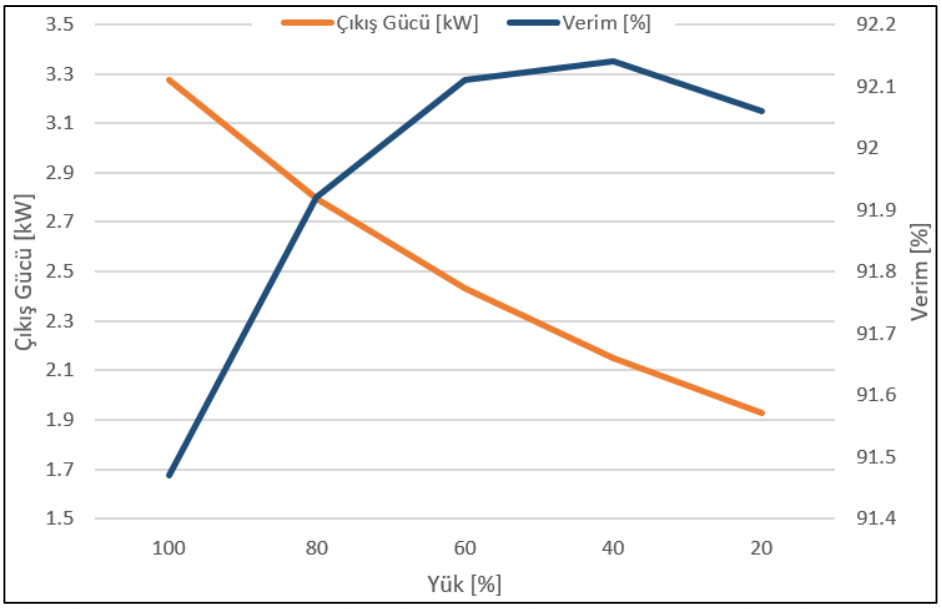
Çizelge 4.64 : ANSYS Maxwell tasarımındaki elemanlara ait kayıplar.

Eleman	Kayıp Türü	Kayıp [W]	Toplam Kayıptaki Oran
Primer Bobin	Ohmik Kayıp	51.63	%17
Sekonder Bobin	Ohmik Kayıp	7.53	%2.47
Kompanzasyon Bobini	Ohmik Kayıp	8.51	%2.79
Primer Ferrit	Demir Kaybı	102.81	%33.69
Sekonder Ferrit	Demir Kaybı	8.54	%2.8

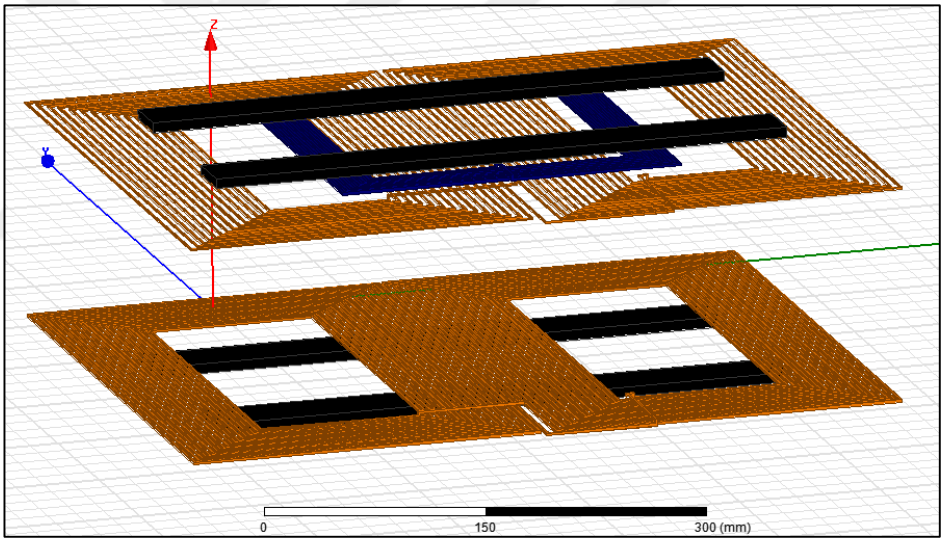
Bataryayı sembolize eden nominal yük değeri hedeflenen çıkış gücü ve verim hedefleri göz önünde bulundurularak tüm optimizasyon adımlarında 29 **Ω** olarak seçilmiştir. Onuncu sistem için değişen yük koşullarında yapılan analizlerde elde giriş gücü, çıkış gücü ve verim bilgileri Çizelge 4.65'te verilmiştir. Değişken yük analizine ait çıkış gücü ve verim grafikleri ise Şekil 4.8'de görülmektedir. Tasarlanan onuncu sistem Şekil 4.9'da görülebilir. Sistemde sekonder taraftaki ferrit üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı da Şekil 4.10'da görülmektedir.

Çizelge 4.65 : Onuncu sistem için değişken yük durumu analizi.

Yük [%]	Giriş Gücü [kW]	Çıkış Gücü [kW]	Verim [%]
100	3.5781	3.2729	91.47
80	3.0394	2.7939	91.92
60	2.6408	2.4324	92.11
40	2.335	2.1514	92.14
20	2.0936	1.9273	92.06



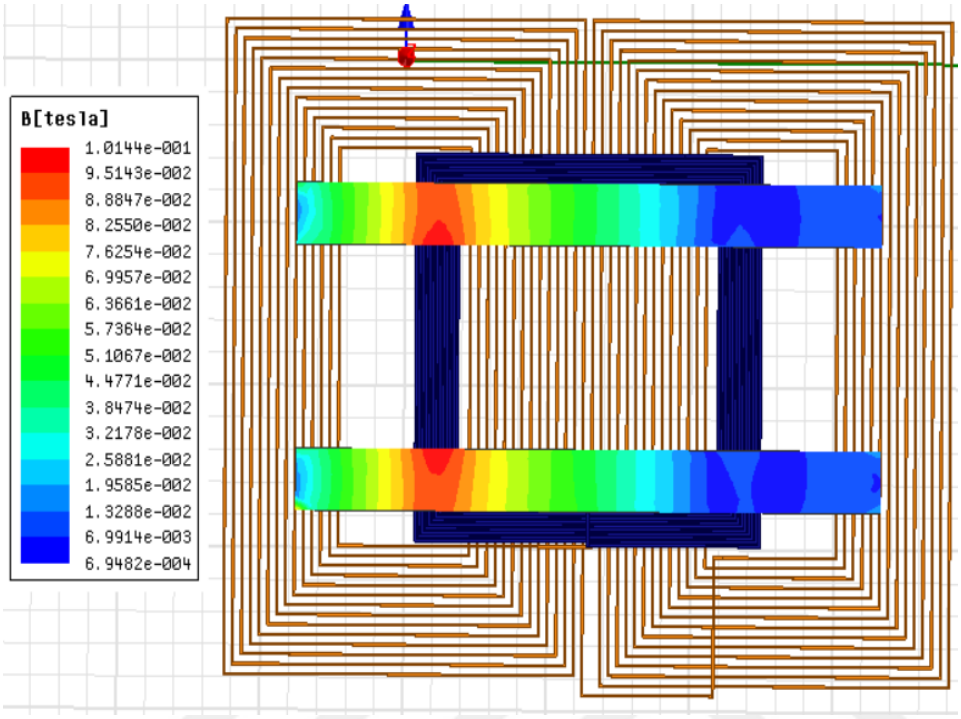
Şekil 4.8 : Onuncu sistem için değişken yük analizine ait çıkış gücü ve verim grafikleri.



Şekil 4.9 : Tasarlanan onuncu sistem.

Manyetik akı yoğunlukları incelendiğinde maksimum manyetik akı yoğunluğunun yaklaşık 100mT olduğu ve ferritte doyma meydana gelmeyeceği görülmektedir. Ferritin kompanzasyon bobini üzerine düşen iki tarafından birinde manyetik akı yoğunluğu fazlayken diğer tarafta oldukça düşüktür. Bunun sebebi kompanzasyon bobininden akan akımın yönü ile alakalı olarak, kompanzasyon bobininin bir tarafta destekleyici diğer tarafta ise zayıflatıcı manyetik alan etkisi olmasıdır.

Ferrit optimizasyonu kapsamında maliyet %83 azaltılmıştır. Ferrit optimizasyonu sırasında tasarlanan sistemlerle alakalı birim maliyet ve toplam maliyet bilgileri Çizelge 4.66'da görülmektedir.



Şekil 4.10 : Sekonder taraftaki ferrit üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

Çizelge 4.66 : Ferrit optimizasyonu maliyet analizi.

Sistem No	Ferrit Tipi	Birim Maliyet [$]	Ferrit Adedi	Toplam Maliyet [$]
6	3C90	22.51	24	540.24
7	3C94	9.054	24	217.30
8	N87	5.7332	24	137.60
9	N87	5.7332	16	91.73
10	N87	5.7332	16	91.73

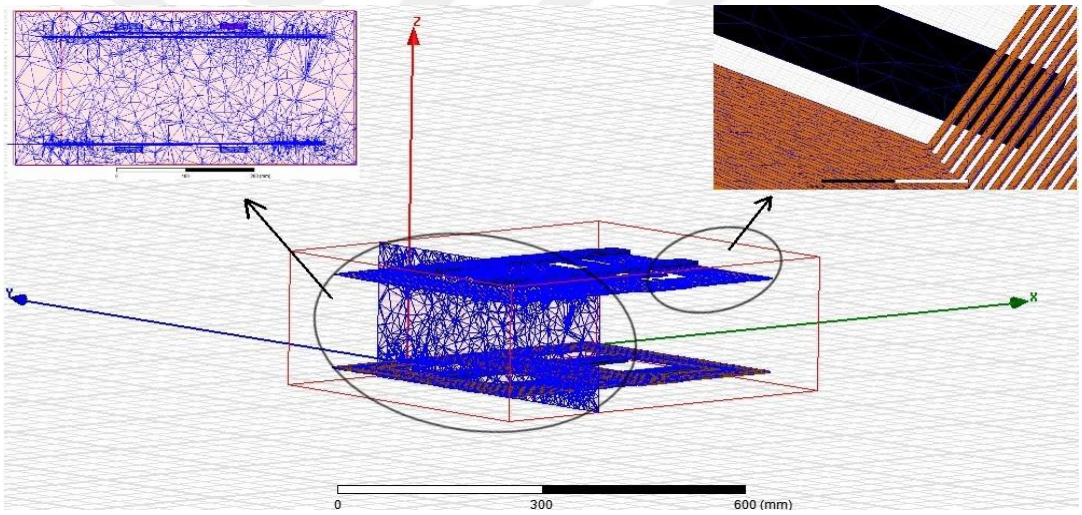
Tasarlanan onuncu sistem için Maxwell'de primer bobine 18A, sekonder bobine 6A ve sekonder bobine 12A uyarma akımı uygulanmıştır. Maxwell'de Eddy Current analiz tipi seçilmiş ve sınır koşulları sistem hacminden %10 fazla olacak şekilde bağıl geçirgenlik katsayısı 1 olan vakum materyali ile tanımlanmıştır. Çözüm ağında toplam 404372 adet eleman bulunmaktadır. Onuncu sistemde yer alan elemanlara ait mesh bilgileri Çizelge 4.67'de ve Şekil 4.11'de görülmektedir.

Onuncu sisteme ait manyetik akı çizgileri Şekil 4.12'de verilmiştir. Bobin merkezindeki akım yönlerinin birbirini destekleyici yönde olmasından dolayı

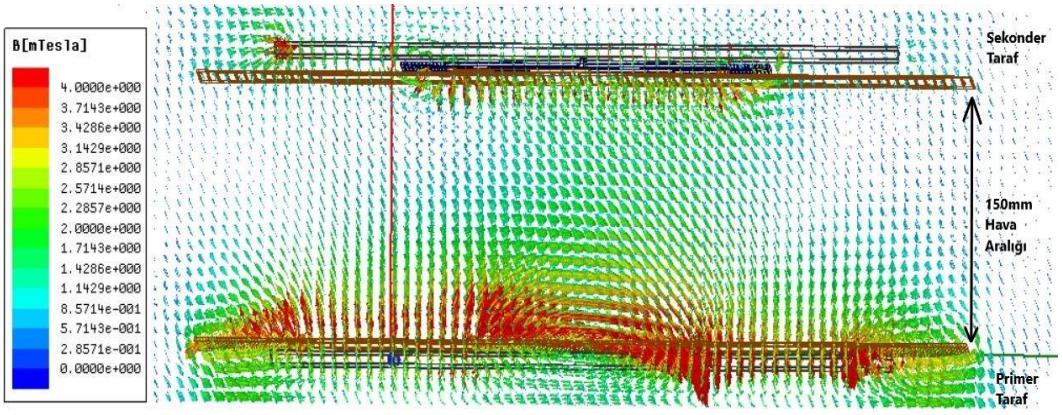
merkezde akı yoğunluğu daha fazla olduğu görülmektedir. Primer-sekonder ve kompanzasyon bobini üzerinden akan akımlar Şekil 4.13'te, yük akımı ve yük gerilimi Şekil 4.14'te, mosfetlere ait ZVS akım-gerilim grafikleri ise Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.67 : Onuncu sisteme ait mesh bilgileri.

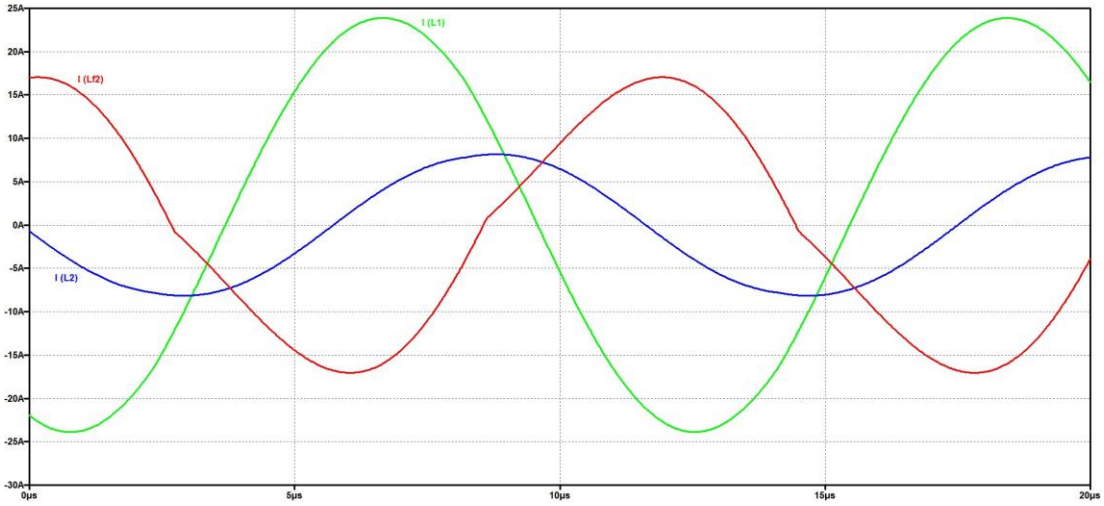
Tasarım Elemanı	Mesh Sayısı	Minimum Mesh Kenar Uzunluğu [mm]	Maksimum Mesh Kenar Uzunluğu [mm]	RMS Mesh Kenar Uzunluğu [mm]
Primer Bobin	37040	1.52	47.65	8.50
Sekonder Bobin	14590	1.25	56.77	13.90
Kompanzasyon Bobini	15721	0.79	44.59	6.22
Primer Ferritler	2868	3.17	31.76	12.17
Sekonder Ferritler	2450	4.19	37.57	12.96
Hava	331703	0.62	80.67	16.51



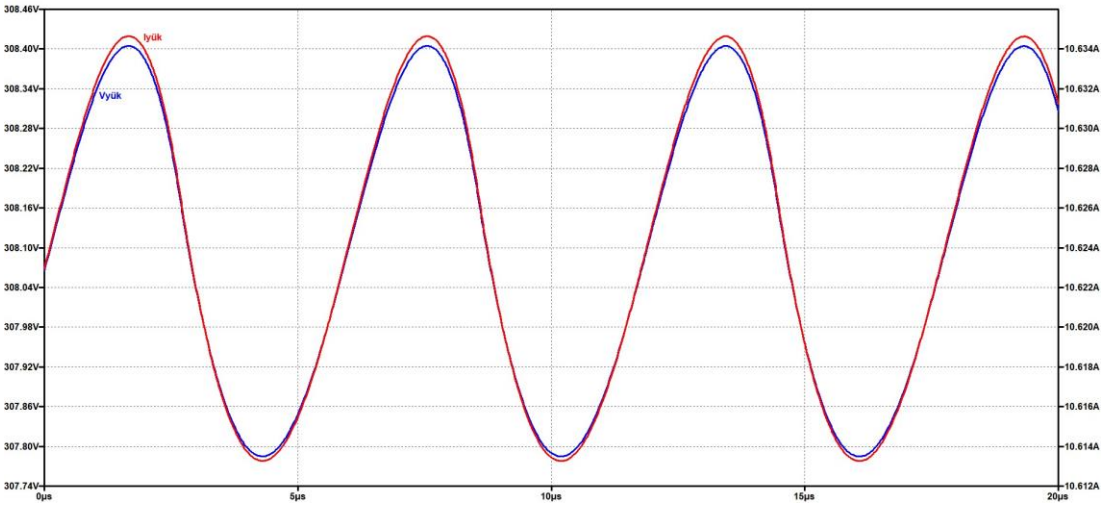
Şekil 4.11 : Onuncu sisteme ait mesh dağılımı.



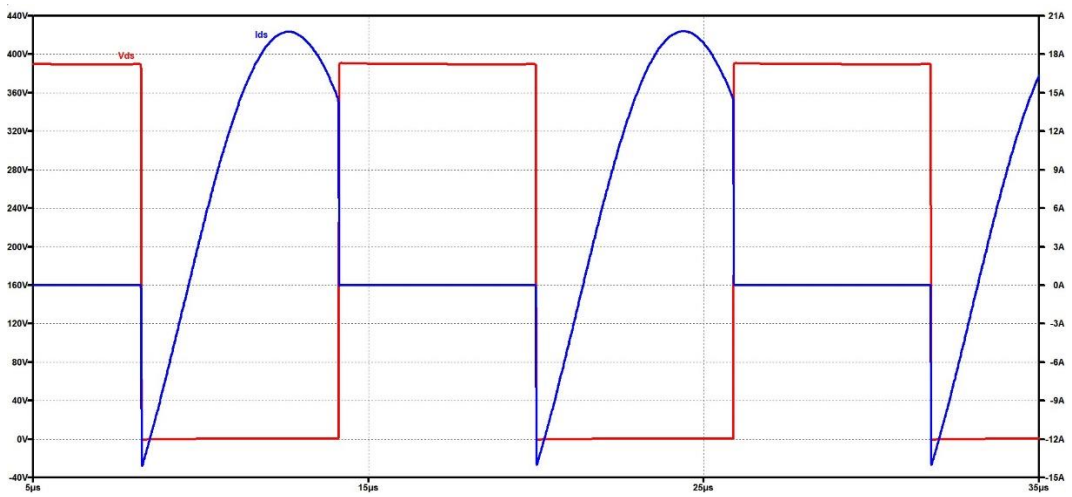
Şekil 4.12 : Onuncu sisteme ait manyetik akı çizgileri.



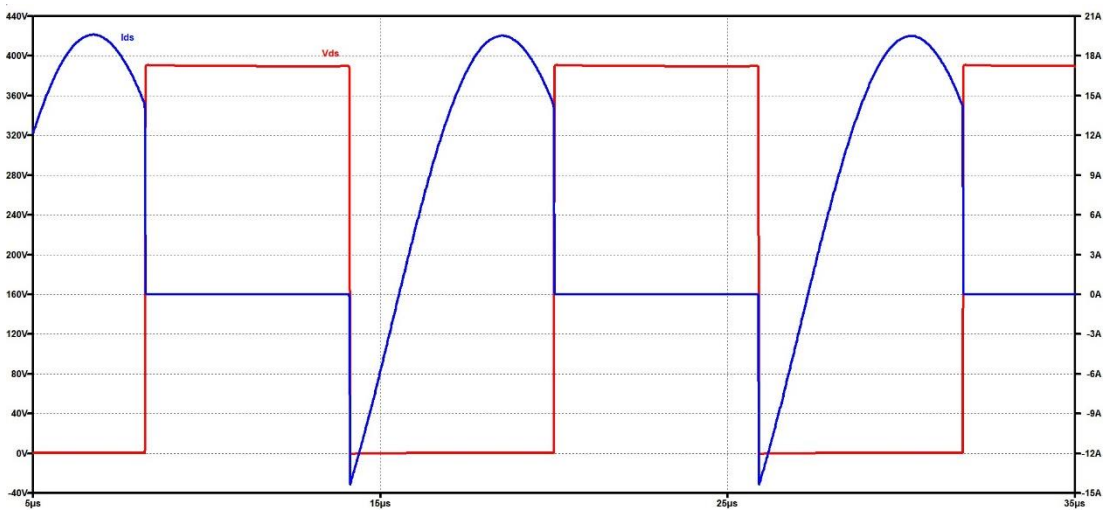
Şekil 4.13 : Onuncu sisteme ait LTspice'tan alınan bobin akım dalga şekilleri.



Şekil 4.14 : Onuncu sisteme ait LTspice'tan alınan yük akım-gerilim dalga şekilleri.



Şekil 4.15 : M1 ve M3 mosfetlere ait LTspice'tan alınan ZVS dalga şekilleri.



Şekil 4.16 : M2 ve M4 mosfetlere ait LTspice'tan alınan ZVS dalga şekilleri.

Optimize edilecek sistem ve optimizasyon süresince tasarlanan tüm sistemler için değişen parametrelerin bilgileri Çizelge 4.68'de detaylı şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.68 : Sistem optimizasyonunda değişen parametreler.

Sistem	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{f2} [mm]	l_{ferrit} [mm]	a_1 [mm]	a_2 [mm]	a_{f2} [mm]	a_{ferrit} [mm]	q_1 [mm^2]	q_2 [mm^2]	q_{f2} [mm^2]	q_{ferrit} [mm^2]	N_1	N_2	N_{ferrit_s}	N_{ferrit_p}	g [mm]
Optimize Edilecek Sistem	770	770	360	93	6	9.3	3.3	33	6.25	6.25	6.25	840	20	15	6	3	200
İkinci Sistem	620	620	360	93	6	9.3	3.3	33	3.24	1.44	3.24	840	20	15	6	3	200
Üçüncü Sistem	620	620	360	93	4.8	7.8	3.3	33	3.24	1.44	3.24	840	20	15	6	3	200
Dördüncü Sistem	550	550	300	93	4.6	6.8	3.6	33	3.24	1.44	3.24	840	18	12	5	3	150
Beşinci Sistem	450	450	240	93	3.8	6.1	2.5	33	3.24	1.44	3.24	840	19	14	4	3	150
Altıncı Sistem	500	500	240	93	4.3	7	2.5	33	3.24	1.44	3.24	840	19	14	4	3	150
6_1. Sistem	500	450	240	93	4.3	7	2.5	33	3.24	1.44	3.24	840	19	14	4	3	150
6_2. Sistem	500	550	240	93	4.3	7	2.5	33	3.24	1.44	3.24	840	19	14	4	3	150
Yedinci Sistem	500	500	240	93	4.3	7	2.5	33	3.24	1.44	3.24	440	19	14	4	3	150
Sekizinci Sistem	500	500	240	102	4.4	6.9	2.4	22.5	3.24	1.44	3.24	266	19	14	4	3	150
Dokuzuncu Sistem	500	500	240	102	3.7	6.1	2.4	83	3.24	1.44	3.24	266	19	14	4	2	150
Onuncu Sistem	500	500	240	102	3.7	6.1	2.4	116	3.24	1.44	3.24	266	19	14	4	2	150

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tasarlanan sistemin gerçeklenmesinde anahtarlama elemanı olarak çok düşük iletim direncine sahip olması ($R_{DS(on)}$ = 32mΩ) ve yüksek frekans anahtarlamaya uygun olması sebebiyle Infineon BSC320N20NS3 Mosfet kullanılmıştır.

Diyot olarak ise düşük kaçak akım ve düşük toparlanma süresine (t_r = 35ns @25°C, t_r = 100ns @100°C) sahip olması sebebiyle IXYS DSEC60-06A kullanılmıştır.

Kompanzasyon için kullanılan kapasitörler ise yüksek akım taşıma kapasitesine ve düşük ESR değerine sahip olması sebebiyle Electronic Conceps 5PT serisinden polipropilen & folyo resonant güç kaynağı kapasitörlerinden seçilmiştir.

Maxwell ortamında tasarlanan sistemde ferrit malzeme olarak TDK L102/20/38-N87 ferritler kullanılmıştır. N87 tip ferrit önceki bölümlerde incelenmiştir.

Belirtilen devre elemanları ile gerçekleştirilen sistem optimizasyonunun ardından donanımsal tasarım kapsamında rezonans çeviricinin çizimine Altium Designer programında başlanmıştır. Rezonans çevirici ile birlikte sistemde kullanılacak olan N87 ferritler ve bobinler için gerekli malzemelerin temin edilmesindeki sorunlardan dolayı deneysel çalışmalar devam etmektedir.

6. SONUÇLAR VE İLERİYE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında, elektrikli bir aracın kablosuz olarak şarj edilmesine yönelik 3.3 kW'lık bir gücün minimum 0.2 bağlantı katsayısı değeri ve %90 verimin üzerinde primer taraftan sekonder tarafa iletilmesi hedeflenmiştir.

Bu amaçla optimizasyonu gerçekleştirilen kablosuz şarj sisteminin hizalama hatasına göre bağlantı katsayısındaki değişim incelenmiş ve verim analizi yapılmıştır. KET sistemi tasarımı analitik olarak gerçekleştirilirken benzetişimlerde LTspice yazılımı, bobin-ferrit optimizasyonu aşamasında ise nümerik olarak SEY tabanlı ANSYS Maxwell paket programından faydalanılmıştır.

Optimize sistemin tam hizalı durumda 3.3 kW'lık gücü primer taraftan sekonder tarafa %91.47'lik bir verimle aktardığı görülmüştür. Bobin genişliğinin %30'una kadar gerçekleşen hizalama hatalarında ise sistem veriminin minimum %87'ye indiği görülmüştür. Sistemde kullanılan ferritler üzerindeki akı yoğunlukları incelendiğinde ferrritte doyma meydana gelmeyeceği görülmüştür.

Optimizasyon sonucunda hem kablosuz şarj sistemi daha kompakt bir hale getirilmiş hem de maliyet azaltılmıştır. Bobin optimizasyonu kapsamında bobinlerin ebatları 770x410 mm'den 500x410 mm'ye düşürülerek bobin yüzey alanı %35 oranında azaltılmıştır. Bobin kesit alanları 6.25 mm^2'den primer bobinde 3.24 mm^2'ye, sekonder bobinde ise 1.44 mm^2'ye düşürülmüştür. Primer bobinde kullanılan iletken uzunluğu 380.8 m'den 295.5 m'ye düşürülerek %22.7 oranında azalış sağlanmıştır. Bu sayede iletken ağırlığı primer bobinde 16.824 kg'dan 6.776 kg'ya düşmüştür. Sekonder bobinde kullanılan iletken uzunluğu ise 274.2 m'den 210.4 m'ye düşürülerek %23.3 oranında azalış sağlanmıştır. Bu sayede iletken ağırlığı sekonder bobinde 12.143 kg'dan 2.147 kg'ya düşmüştür. Ferrit optimizasyonu kapsamında ise kullanılan toplam ferrit hacmi 2812.32 cm^3'ten 434.112 cm^3e düşürülerek %85 oranında azalmıştır. Bu sayede ferrit sistemdeki toplam ferrit ağırlığı 13.32 kg'dan 4.8 kg'ya düşerek %64 azalmıştır. Toplam ferrit maliyeti ise 540.24 $'dan 91.73 $'a

düşürülerek %83 oranında azalış sağlanmıştır. İlk sistem ve optimize sistemin detaylı karşılaştırması Çizelge 6.1'de görülmektedir.

Çizelge 6.1 : İlk sistem ile optimize sistemin karşılaştırması

Parametre	İlk Sistem	Optimize Sistem
Bobin Boyutları [mm]	770x410	500x410
Primer Bobindeki İletken Uzunluğu [m]	380.8	295.5
Primer Bobindeki İletken Ağırlığı [kg]	16.824	6.776
Sekonder Bobindeki İletken Uzunluğu [m]	274.2	210.4
Sekonder Bobindeki İletken Ağırlığı [kg]	12.143	2.147
Toplam Ferrit Hacmi [cm^3]	2812.32	434.112
Toplam Ferrit Ağırlığı [kg]	13.32	4.8
Toplam Ferrit Maliyeti [$]	540.24	91.73
Güç Yoğunluğu [W/m^3]	$51.24x10^3$	$106.44x10^3$
Verim [%] (@Δy=0mm)	94.95	91.47
k_{12} (@Δy=0mm)	0.2693	0.245342

Sistemin optimizasyonun ardından donanımsal tasarımına geçilmiştir. Bu kapsamda rezonans çeviricinin çizimine Altium Designer programında başlanmıştır. Kablosuz şarj sisteminde rezonans çevirici ile birlikte kullanılacak olan N87 ferritler ve bobinler için gerekli malzemelerin temin edilmesindeki sorunlardan dolayı deneysel çalışmalar devam etmektedir.

İleri yönelik çalışmalarda tez kapsamında optimizasyonu ve analizi yapılan kablosuz şarj sistemi modelinin prototipi oluşturulacak ve deneysel çalışmalar tamamlanacaktır. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlarla analitik ve nümerik olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır. Ardından literatürde yer alan, hizalanma hatası toleransı DD bobine oranla daha yüksek olan DDQ bobin topolojisi detaylıca incelenecektir. Tez çalışması kapsamında tasarımı yapılan DD bobin muhafaza edilerek, sadece sisteme eklenecek dikdörtgen bobinlerin tasarımının yapılması yeterli olacaktır. Bu sebeple tez kapsamında tasarlanan DD bobinler kullanılabilecektir. Yapılacak çalışma ile DDQ bobinin yapısal avantajlarını kullanarak yenilikçi bir sistem geliştirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Nye, D. E.** (1990). *Electrifying America: Social Meanings of a New Technology*. Cambridge, MA: The MIT Press.

[2] **Davenport, T. (1837)** *U.S. Patent No. 132.* Brandon, VT: U.S. Patent and Trademark Office.

[3] **Tuncay, R. N. ve Üstün Ö.** (2012)**.** Elektrikli Araçlarda Geçmişten Geleceğe Bakış (Rapor No: 77). İstanbul: MÜSİAD Otomotiv Sektör Kurulu Raporu.

[4] **Mouli, G. R. C., Kaptein, J., Bauer, P. & Zeman, M.** (2016). Implementation of dynamic charging and V2G using Chademo and CCS/Combo DC charging standard, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC),* (pp.4–9). United States of America: Dearborn, MI, June 27-29.

[5] **Wang, S.** (2016). *Research of ınductive power transfer system for electric vehicle* (Doctoral dissertation).

[6] **Wirtz, J., Electrical Transportation Infrastructure, Eaton Corporation.** (2011). *On-Board vs. Off Board Charging* [PowerPoint slides]. Retrieved from https://amazonaws.com/automotiveworld/slides.html

[7] **Panchal, C., Stegen, S. & Lu, J.** (2018). Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Engineering Science and Technology, 21,* 922-937. doi: 10.1016/j.jestch.2018.06.015.

[8] **Yılmaz, M.** (2018). Elektrikli ve Karma Taşıtlar Ders Notu *Retrieved July 07, 2020, from* https://ninova.itu.edu.tr/

[9] **Url-9** < *https://www.autoevolution.com/news/ev-wireless-charging-goes-oem-with-bmw-530e-iperformance-120654* >, date retrieved 16.07.2020.

[10] **Url-10** < *https://www.pluglesspower.com/learn/tesla-model-s-charging-home-public-autonomously/* >, date retrieved 16.07.2020.

[11] **Url-11** < *https://docplayer.net/18981036-Qualcomm-halo-wevc-interoperability* >, date retrieved 16.07.2020.

[12] **Dai, Z., Wang, J., Long, M. & Huang H.** (2018). A Witricity-based high-power device for wireless charging of electric vehicles. *Energies,* doi: 10.3390/en10030323.

[13] **Choi, Y. G., Kwak B. & Kim, M.** (2016). 4kW Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System. *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON),* doi: 10.1109/POWERCON.2016.7753999.

[14] **Moon, S. & Moon G. W.** (2016). Wireless Power Transfer System with an Asymmetric Four-Coil Resonator for Electric Vehicle Battery

Chargers. *IEEE Transactions on Power Electronics, 31,* 6844-6854. doi: 10.1109/TPEL.2015.2506779.

[15] **Zeng, H., Yang, S. & Peng, F. Z.** (2017). Design Consideration and Comparison of Wireless Power Transfer via Harmonic Current for PHEV and EV Wireless Charging. *IEEE Transactions on Power Electronics, 32,* 5943-5952. doi: 10.1109/TPEL.2016.2616111

[16] **Hough, R.** (2017, March 18). Evatran Awarded Department Of Energy Sub-Contract To Integrate High Power Wireless Charging Technology Into Production Electric Vehicles. *PR Newswire Association.* Retrieved from http://www.nytimes.com

[17] **Walli, R.** (2016, March 31). ORNL Surges Forward with 20-Kilowatt Wireless Charging for Vehicles. *Oak Ridge National Laboratory.* Retrieved from https://www.ornl.gov/

[18] **Wireless Charging Research Activities Around the World [Society News]** (2016). *Power Electronics Magazine. 1,* 30-38. doi: *10.1109/MPEL.2014.2319511*

[19] **Li, S. & Mi, C. C.** (2015). Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 3,* 4-17. doi: 10.1109/JESTPE.2014.2319453.

[20] **Nguyen, T. Li, S. & Mi, C. C.** (2014). Feasibility study on bipolar pads for efficient wireless power chargers. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC),* 1676-1682. doi: 10.1109/APEC.2014.6803531.

[21] **Covic, G. A. & Boys, J. T.** (2013). Modern trends in inductive power transfer for transportation applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 1,* 28-41 doi: 10.1109/JESTPE.2013.2264473.

[22] **Covic, G. A. & Boys, J. T.** (2013). Modern trends in inductive power transfer for transportation applications. *Proceedings of the IEEE, 6,* 1276-1289 doi: 10.1109/JPROC.2013.2244536.

[23] **Gao, J.** (2007). Traveling magnetic field for homogeneous wireless power transmission. *IEEE Transactions on Power Delivery, 22,* 507-514 doi: 10.1109/TPWRD.2006.876645.

[24] **Gao, Y., Farley, K. B. & Tse, Z. T. H.** (2014). Investigating safety issues related to electric vehicle wireless charging technology. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC),* (pp.20–23). United States of America: Dearborn, MI, June 15-18.

[25] **Gao, Y., Ginart, A., Farley, K. B. & Tse, Z. T. H.** (2016). Misalignment effect on efficiency of wireless power transfer for electric vehicles. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC),* (pp.3526–2528). United States of America: Long Beach, CA, March 20-24.

[26] **Wu, H. H., Gilchrist, A., Sealy, K. & Bronson, D.** (2012). A 90 percent efficient 5kW inductive charger for EVs. *IEEE Energy Conversion Congress*

and Exposition (ECCE), (pp.275-282). United States of America: Raleigh, NC, September 15-20.

[27] **Qiu, C., Chau, K. T., Liu, C. & Chan, C. C.** (2014). Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging. *World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27),* (pp.1-9). Spain: Barcelona, November 17-20.

[28] **Url-28** < *https://witricity.com* >, date retrieved 13.06.2020.

[29] **Brecher A. & Arthur D.** (2014). Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications (Report No: 0060). Washington, DC: Federal Transit Administration.

[30] **Vesco, A. & Ferrero, F.** (2015). *Handbook of Research on Social, Economic, and Environmental Sustainability in the Development of Smart Cities*. Italy: IGI Global.

[31] **Musavi, F., Edington, M., & Eberle, W.** (2012). Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE),* (pp.1804-1810). United States of America: Raleigh, NC, September 15-20.

[32] **Covic, G. A., Elliot, G., Stielau, O. H., Green, R. M. & Boys, J. T.** (2000). The design of a contact-less energy transfer system for a people mover system. *International Conference on Power System Technology,* (pp.79-84). Australia: Perth, WA, December 4-7.

[33] **Coca, E.** (2016). *Wireless Power Transfer - Fundamentals and Technologies* IntechOpen.

[34] **Song, B., Shin, J., Chung, S., Shin, S., Lee, S., Kim, Y., Jung, G. & Jeon, S.** (2013). Design of a pickup with compensation winding for on-line electric vehicle (OLEV). *IEEE Wireless Power Transfer (WPT),* (pp.60-62). Italy: Perugia, May 15-16.

[35] **Shin, J., Shin, S., Ahn, S., Lee, S., Jung, W., Jeon, S. & Cho, D.** (2007). Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61,* 1179-1192 doi: 10.1109/TIE.2013.2258294.

[36] **Ahn, S., Pak, J., Song, T., Lee, H., Byun, J., Kang, D., …… Kim., J.** (2010). Low frequency electromagnetic field reduction techniques for the On-Line Electric Vehicle (OLEV). *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility,* (pp.625-630). United States of America: Fort Lauderdale, FL, July 25-30.

[37] **Huh, J., Lee, W., Cho, G. H., Lee, B. & Rim, C. T.** (2011). Characterization of novel inductive power transfer systems for on-line electric vehicles. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC),* (pp.1975-1979). United States of America: Fort Worth, TX, March 6-11.

[38] **Throngnumchai, K., Hanamura, A., Naruse, Y. & Takeda, K.** (2013). Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles. *World*

Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), (pp.848-857). Spain: Barcelona, November 17-20.

[39] **Lee, K., Pantic, Z. & Lukic, S.** (2013). Field containment in dynamic wireless charging systems through source-reciever interaction. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition,* (pp.3658-3663). United States of America: Denver, CO, September 15-19.

[40] **Lee, K., Pantic, Z. & Lukic, S.** (2014). Reflexive field containment in dynamic inductive power transfer systems. *IEEE Transactions on Power Electronics, 29,* 4592-4602 doi: 10.1109/TPEL.2013.2287262.

[41] **Budhia, M., Covic, G. A. & Boys, J. T.** (2011). Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems. *IEEE Transactions on Power Electronics, 26,* 3096-3108 doi: 10.1109/TPEL.2011.2143730.

[42] **Üstün, Ö. & Fincan, B.** (2012) Kablosuz enerji transferinde bazı kısıtlar ve çözümler. *ELECO'12 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu,* (pp.455-459). Türkiye: Bursa, Kasım 29-Aralık 1.

[43] **IEEE** (2014). *IEEE Standard for Military Workplaces--Force Health Protection Regarding Personnel Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz* (IEEE C95.1-2345). Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/document/6820718

[44] **Budhia, M., Covic, G. A. & Boys, J. T.** (2013). Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60,* 318-328 doi: 10.1109/TIE.2011.2179274.

[45] **Ahmad, A., Alam, M. S. & Chabaan, R.** (2017) A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 4,* 33-63 doi: 10.1109/TTE.2017.2771619.

[46] **Covic, G. A., Kissin, M. L. G., Kacprzak, D., Clausen, N. & Hao, H.** (2011). A bipolar primary pad topology for EV stationary charging and highway power by inductive coupling. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition,* (pp.1832-1838). United States of America: Phoenix, AZ, September 17-22.

[47] **Zaheer, A., Kacprzak, D. & Covic, G. A.** (2012). A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition,* (pp.283-290). United States of America: Raleigh, NC, September 15-20.

[48] **Ahmed, K., Aamir, M., Seyedmahmoudian, M. & Horan, B.** (2015) A new coil design for enhancement in misalignment tolerance of wireless charging system. *IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD),* (pp.215-219). Malaysia: Kuala Lumpur, December 13-14.

[49] **Kalwar, K. A., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M. & Horan, B.** (2016). Coil design for high misalignment tolerant inductive power transfer system for EV charging. *Energies,* doi: 10.3390/en9110937.

[50] **Kalwar, K. A., Aamir, M. & Seyedmahmoudian, M.** (2015). Inductively coupled power transfer (ICPT) for electric vehicle charging–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* doi: 10.1016/j.rser.2015.03.040.

[51] **Panchal, C., Stegen, S. & Lu, J.** (2015). Simulation of core shape considerations of wireless charging systems for electric vehicles. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC).* Australia: Brisbane, QLD, November 15-18.

[52] **Panchal, C., Stegen, S. & Lu, J.** (2015). Investigation of magnetic flux distribution of EV wireless charging systems. *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC),* (pp.5-8). Australia: Melbourne, VIC, May 20-23.

[53] **Budhia, M., Covic, G. A., Boys, J. T. & Huang, C. Y.** (2011). Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition,* (pp.614-621). United States of America: Phoenix, AZ, September 17-22.

[54] **Leskarac, D., Panchal, C., Lu, J. & Stegen S.** (2015). PEV Charging Technologies and V2G on Distributed Systems and Utility Interfaces. In J. Lu, J. Hossain (Eds.), in *Vehicle-to-Grid: Linking Electric Vehicles to the Smart Grid,* (pp.157–209). Retrieved from https://digital-library.theiet.org/content/books/10.1049/pbpo079e_ch6

[55] **SAE International** (2019). *Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Alignment Methodology* (SAE J2954_201904). Retrieved from https://www.sae.org/standards/content/j2954_201904/

[56] **SAE International** (2017). *SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler* (SAE J1772_201710). Retrieved from https://www.sae.org/standards/content/j1772_201710/

[57] **SAE International** (2017). *Communication between Wireless Charged Vehicles and Wireless EV Chargers* (SAE J2847/6). Retrieved from https://www.sae.org/standards/content/j2847/6/

[58] **SAE International** (2014). *Electric Vehicle Inductively Coupled Charging* (SAE J1773_201406). Retrieved from https://www.sae.org/standards/ content/j1773_201406/

[59] **IEEE** (2017). *Wireless Power and Charging Systems* (IEEE P2100.1). Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/standards/

[60] **IEEE** (2019). *Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz* (IEEE C95.1-2019). Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/C95_1-2019.html

[61] **ISO** (2020). *Electrically propelled road vehicles - Magnetic field wireless power transfer - Safety and interoperability requirements* (ISO 19363:2020). Retrieved from https://www.iso.org/standard/73547.html

[62] **IEC** (2019). *Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements* (IEC 61980-1:2015). Retrieved from https://webstore.iec.ch/publication/22951

[63] **Patil, D., McDonough, M. K., Miller, J. M., Fahimi, B. & Balsara, P. T.** (2017). Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 4,* 3-37, doi: 10.1109/TTE.2017.2780627.

[64] **Pashei, A., Aydın, E., Polat, M., Yıldırız, E. & Aydemir, M. T.** (2016). Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri. *EMO Bilim Dergi, 6 (11),* 1-12.

[65] **Mergen, F. & Zorlu S.** (2005) *Elektrik Makineleri 2: Asenkron Makineler*. İstanbul: Birsen Yayınevi

[66] **Nilsson, J. W. & Riedel S. A.** (2011) *Electric Circuits.* New Jersey: Pearson Education

[67] **Rashid M. H.** (2015) *Güç Elektroniği.* (S. Sünter ve T. Aydemir, Çev.) Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık

[68] **Fincan, B.** (2015) *Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[69] **Sallan, J., Villa, J. L., Llombart, A. & Sanz J. F.** (2009). Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56,* 2140-2149, doi: 10.1109/TIE.2009.2015359.

[70] **Wang, C. S., Covic, G. A. & Stielau, O. H.** (2004). Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51,* 148-157, doi: 10.1109/TIE.2003.822038.

[71] **Huang, C. Y., Boys, J. T. & Covic, G. A.** (2013). LCL pickup circulating current controller for inductive power transfer systems. *IEEE Transactions on Power Electronics, 28,* 2081-2093, doi: 10.1109/TPEL.2012.2199132

[72] **Keeling, N. A., Covic, G. A. & Boys, J. T.** (2008). A unity-power-factor IPT pickup for high-power applications. *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics,* (pp.744-751). United States of America: Orlando, FL, November 10-13.

[73] **Kan, T., Member, S. Nguyen, T., White J. C., Malhan, R. K. & Mi, C.** (2016). A New Integration Method for an Electric Vehicle Wireless Charging System Using LCC Compensation Topology : Analysis and Design. *IEEE Transactions on Power Electronics, 32,* 1638-1650, doi: 10.1109/TPEL.2016.2552060.

[74] **Li, W., Zhao, H., Li, S., Deng, J., Kan, T. & Mi, C.** (2015). A new ıntegration method for an electric vehicle wireless charging system using LCC compensation topology : analysis and design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62,* 4215-4225, doi: 10.1109/TIE.2014.2384003.

[75] **Li, S., Li, W., Deng, J., Kan, T., Nguyen, T. & Mi, C.** (2015). A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 64,* 2261-2273, doi: 10.1109/TVT.2014.2347006.

[76] **Mou, X., Gladwin, D. T., Zhao, R. & Sun, H.** (2015). A Survey on Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer Technology for Electric Vehicle Charging. *IET Research Journals,* 1-17.

[77] ***Litz Wire Lights Up Wireless Power***. (2020). *Retrieved July 06, 2020, from https://www.newenglandwire.com/application/litz-wire-lights-up-wireless-power/.*

EKLER

EK A: Infineon IPB320N20N3 Mosfet Datasheet

EK B: IXYS DSEC60-06A Diyot Datasheet

EK C: Electronic Conceps 5PT Series Kapasitör Datasheet

EK D: FERROXCUBE L93/28/30-3C90 Ferrit Datasheet

EK E: FERROXCUBE L93/28/30-3C94 Ferrit Datasheet

EK F: TDK L102/20/38-N87 Ferrit Datasheet

EK A



BSC320N20NS3 G

OptiMOS™3 Power-Transistor

Features

- N-channel, normal level
- Excellent gate charge x $R_{DS(on)}$ product (FOM)
- Very low on-resistance $R_{DS(on)}$
- Pb-free lead plating; RoHS compliant
- Qualified according to JEDEC[1)] for target application
- Halogen-free according to IEC61249-2-21
- Ideal for high-frequency switching and synchronous rectification

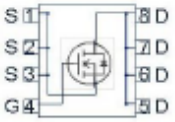
Product Summary

V_{DS}	200	V
$R_{DS(on),max}$	32	mΩ
I_D	36	A

RoHS

Halogen-Free

Type	BSC320N20NS3 G
	
Package	PG-TDSON-8
Marking	320N20NS



Maximum ratings, at T_j=25 °C, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Value	Unit
Continuous drain current	I_D	T_C=25 °C	36	A
		T_C=100 °C	24	
Pulsed drain current[2)]	$I_{D,pulse}$	T_C=25 °C	144	
Avalanche energy, single pulse	E_{AS}	I_D=36 A, R_{GS}=25 Ω	190	mJ
Reverse diode d*v*/d*t*	d*v*/d*t*		10	kV/µs
Gate source voltage	V_{GS}		±20	V
Power dissipation	P_{tot}	T_C=25 °C	125	W
Operating and storage temperature	T_j, T_{stg}		-55 ... 150	°C
IEC climatic category; DIN IEC 68-1			55/150/56	

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			min.	typ.	max.	
Thermal characteristics						
Thermal resistance, junction - case	R_{thJC}		-	-	1	K/W
Thermal resistance, junction - ambient	R_{thJA}	minimal footprint	-	-	75	
		6 cm2 cooling area[3)]	-	-	50	
Electrical characteristics, at T_j=25 °C, unless otherwise specified						
Static characteristics						
Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DSS}$	V_{GS}=0 V, I_D=1 mA	200	-	-	V
Gate threshold voltage	$V_{GS(th)}$	V_{DS}=V_{GS}, I_D=90 µA	2	3	4	
Zero gate voltage drain current	I_{DSS}	V_{DS}=160 V, V_{GS}=0 V, T_j=25 °C	-	0.1	1	µA
		V_{DS}=160 V, V_{GS}=0 V, T_j=125 °C	-	10	100	
Gate-source leakage current	I_{GSS}	V_{GS}=20 V, V_{DS}=0 V	-	1	100	nA
Drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	V_{GS}=10 V, I_D=36 A	-	27	32	mΩ
Gate resistance	R_G		-	2.5	-	Ω
Transconductance	g_{fs}	$\|V_{DS}\|>2\|I_D\|R_{DS(on)max}$, I_D=36 A	29	58	-	S

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			min.	typ.	max.	
Dynamic characteristics						
Input capacitance	C_{iss}	V_{GS}=0 V, V_{DS}=100 V, f=1 MHz	-	1770	2350	pF
Output capacitance	C_{oss}		-	135	180	
Reverse transfer capacitance	C_{rss}		-	4	-	
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	V_{DD}=100 V, V_{GS}=10 V, I_D=18 A, R_G=1.6 Ω	-	14	-	ns
Rise time	t_r		-	9	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	22	-	
Fall time	t_f		-	4	-	
Gate Charge Characteristics[4)]						
Gate to source charge	Q_{gs}	V_{DD}=100 V, I_D=18 A, V_{GS}=0 to 10 V	-	8	-	nC
Gate to drain charge	Q_{gd}		-	3	-	
Switching charge	Q_{sw}		-	5	-	
Gate charge total	Q_g		-	22	29	
Gate plateau voltage	$V_{plateau}$		-	4.4	-	V
Output charge	Q_{oss}	V_{DD}=100 V, V_{GS}=0 V	-	54	72	nC
Reverse Diode						
Diode continous forward current	I_S	T_C=25 °C	-	-	36	A
Diode pulse current	$I_{S,pulse}$		-	-	144	
Diode forward voltage	V_{SD}	V_{GS}=0 V, I_F=36 A, T_j=25 °C	-	0.9	1.2	V
Reverse recovery time	t_{rr}	V_R=100 V, I_F=18A, di_F/dt=100 A/µs	-	105	-	ns
Reverse recovery charge	Q_{rr}		-	429	-	nC

EK B

IXYS **DSEC60-06A**

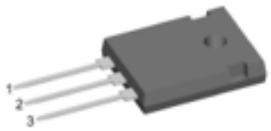
HiPerFRED

V_{RRM} = 600 V
I_{FAV} = 2x 30 A
t_{rr} = 35 ns

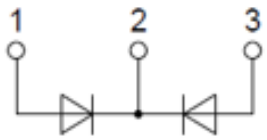
High Performance Fast Recovery Diode
Low Loss and Soft Recovery
Common Cathode

Part number

DSEC60-06A



Backside: cathode



Fast Diode				Ratings			
Symbol	Definition	Conditions		min.	typ.	max.	Unit
V_{RSM}	*max. non-repetitive reverse blocking voltage*		T_{VJ} = 25°C			600	V
V_{RRM}	*max. repetitive reverse blocking voltage*		T_{VJ} = 25°C			600	V
I_R	*reverse current, drain current*	V_R = 600 V	T_{VJ} = 25°C			250	µA
		V_R = 600 V	T_{VJ} = 150°C			1	mA
V_F	*forward voltage drop*	I_F = 30 A	T_{VJ} = 25°C			1.60	V
		I_F = 60 A				1.91	V
		I_F = 30 A	T_{VJ} = 150°C			1.25	V
		I_F = 60 A				1.52	V
I_{FAV}	*average forward current*	T_C = 135°C	T_{VJ} = 175°C			30	A
		rectangular d = 0.5					
V_{F0}	*threshold voltage* } *for power loss calculation only*		T_{VJ} = 175°C			0.91	V
r_F	*slope resistance* }					8.7	mΩ
R_{thJC}	*thermal resistance junction to case*					0.9	K/W
R_{thCH}	*thermal resistance case to heatsink*				0.25		K/W
P_{tot}	*total power dissipation*		T_C = 25°C			165	W
I_{FSM}	*max. forward surge current*	t = 10 ms; (50 Hz), sine; V_R = 0 V	T_{VJ} = 45°C			250	A
C_J	*junction capacitance*	V_R = 400 V f = 1 MHz	T_{VJ} = 25°C		26		pF
I_{RM}	*max. reverse recovery current*		T_{VJ} = 25°C		6		A
		I_F = 30 A; V_R = 300 V	T_{VJ} = 100°C		10		A
t_{rr}	*reverse recovery time*	$-di_F/dt$ = 200 A/µs	T_{VJ} = 25°C		35		ns
			T_{VJ} = 100°C		100		ns

EK C

Specification Summary

Capacitance Range
0.010µF to 0.100µF

Capacitance Tolerance
Standard capacitance tolerance is ±10%. Tolerances of ±5%, ±2% and ±1% are also available.

Operating Temperature Range
-55°C to +105°C

Enclosure/Construction
Extended Foil

Voltage Rating
400 VDC to 1500 VDC
230 VAC to 460 VAC

Quality Control
Capacitors are tested 100% for:

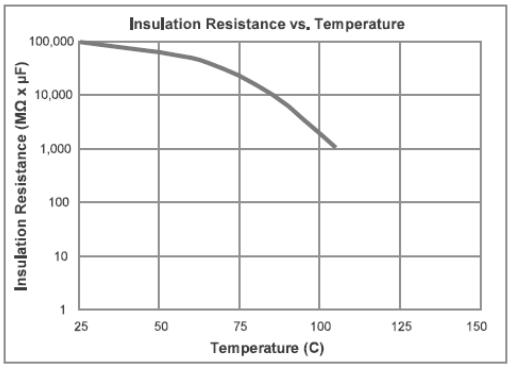
- Capacitance
- Tolerance
- Dissipation Factor
- Dielectric withstanding voltage
- Insulation Resistance

Process and inspection data are maintained on file and available upon special request.

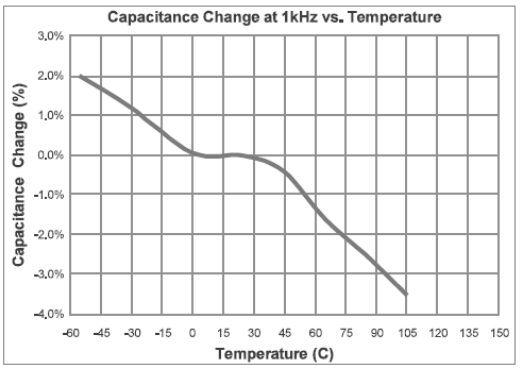
Environmental

Parameter	Method	Condition
Vibration	204	D
Shock	213	I
Humidity	106	-
Thermal Shock	107	A
Life	108	F
Reference MIL-STD-202		

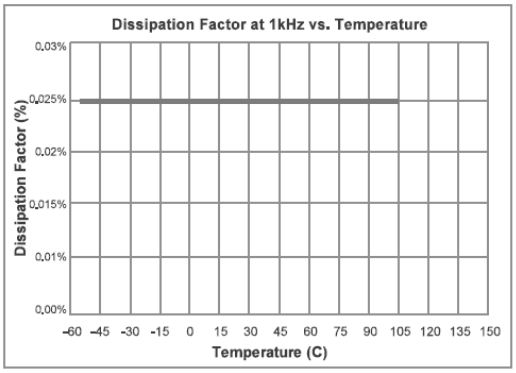
Characteristics



Dielectric Strength
Capacitors withstand a DC potential of 1.5 x rated voltage for one (1) minute without damage or breakdown. Test voltage is applied and discharged through a minimum resistance of 100 OHMS per volt minimum.



Dissipation Factor
When mearsured at the frequency specified for capacitance measurement, the dissipation factor will not exceed 0.05%.



Electronic Concepts

Rev. 4

EK D

3C90 SPECIFICATIONS

A low frequency power material for use in power and general purpose transformers at frequencies up to 0.2 MHz.

	CONDITIONS	VALUE	UNIT
μ_i	25 °C; ≤10 kHz; 0.25 mT	2300 ±20%	
μ_a	100 °C; 25 kHz; 200 mT	5500 ±25%	
B	25 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 470	mT
	100 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 380	mT
P_V	100 °C; 25 kHz; 200 mT	≤ 80	kW/m³
	100 °C; 100 kHz; 100 mT	≤ 80	
	100 °C; 100 kHz; 200 mT	≈ 450	
ρ	DC, 25 °C	≈ 5	Ωm
T_C		≥ 220	°C
density		≈ 4800	kg/m³

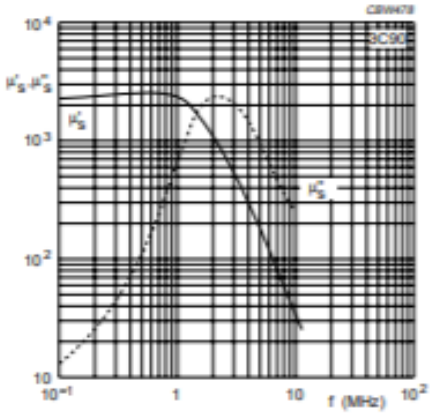


Fig.1 Complex permeability as a function of frequency.

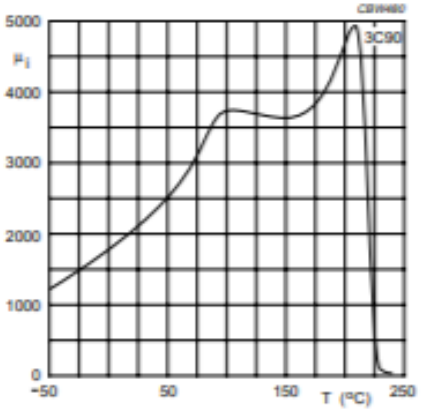


Fig.2 Initial permeability as a function of temperature.

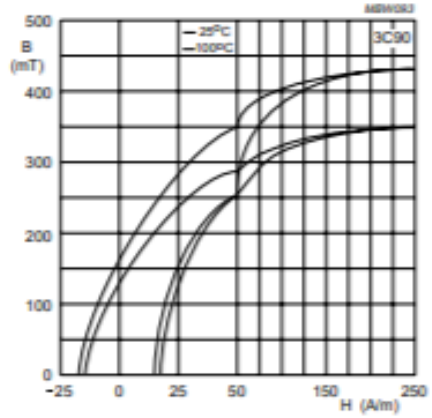


Fig.3 Typical B-H loops.

EK E

3C94 SPECIFICATIONS

A low frequency power material for use in power and general purpose transformers at frequencies up to 0.3 MHz.

SYMBOL	CONDITIONS	VALUE	UNIT
μ_i	25 °C; ≤10 kHz; 0.25 mT	2300 ±20%	
μ_a	100 °C; 25 kHz; 200 mT	5500 ±25%	
B	25 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 470	mT
	100 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 380	
P_V	100 °C; 100 kHz; 100 mT	≈ 50	kW/m³
	100 °C; 100 kHz; 200 mT	≈ 350	
ρ	DC, 25 °C	≈ 5	Ωm
T_C		≥ 220	°C
density		≈ 4800	kg/m³

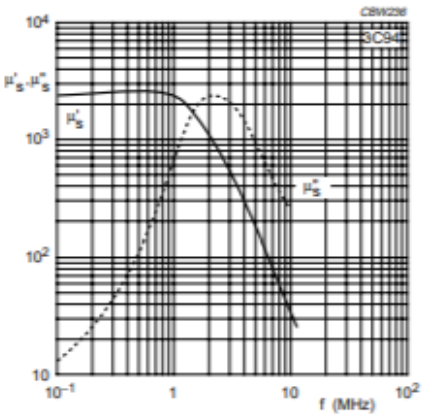


Fig.1 Complex permeability as a function of frequency.

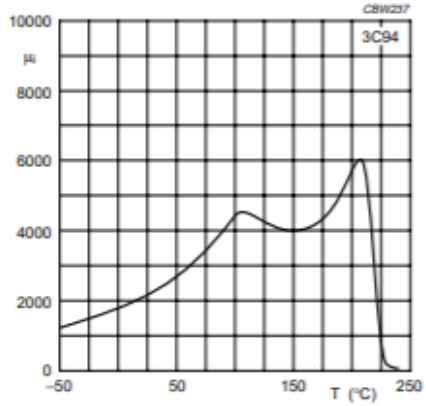


Fig.2 Initial permeability as a function of temperature.

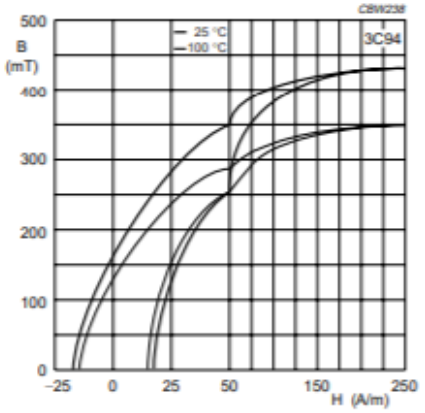


Fig.3 Typical B-H loops.

EK F

TDK

SIFERRIT materials

N87

Material properties

Preferred application			Power transformers
Material			N87
Base material			MnZn
	Symbol	Unit	
Initial permeability (T = 25 °C)	μ_i		2200 ±25%
Flux density (H = 1200 A/m, f = 10 kHz)	B_S (25 °C) B_S (100 °C)	mT mT	490 390
Coercive field strength (f = 10 kHz)	H_c (25 °C) H_c (100 °C)	A/m A/m	21 13
Optimum frequency range	f_{min} f_{max}	kHz kHz	25 500
Hysteresis material constant	η_B	10^{-6}/mT	<1.0
Curie temperature	T_C	°C	>210
Mean value of α_F at 25 … 55 °C		10^{-6}/K	4
Density (typical values)		kg/m³	4850
Relative core losses (typical values)	P_V		
25 kHz, 200 mT, 100 °C		kW/m³	57
100 kHz, 200 mT, 100 °C		kW/m³	375
300 kHz, 100 mT, 100 °C		kW/m³	390
500 kHz, 50 mT, 100 °C		kW/m³	215
Resistivity	ρ	Ωm	10
Core shapes			RM, P, PM, ETD, EFD, E, ER, EP, EQ, ELP, U, Toroid

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Bager ÖZBEY

Doğum Tarihi ve Yeri **:** Şişli - 1996

E-posta **:** ozbey15@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Mart 2018-Ekim 2019 tarihleri arasında PAVO Tasarım'da Elektronik Tasarım Mühendisi olarak çalıştı.
- Ekim 2019'dan beri PAVO Tasarım'da Test Grup Lideri olarak çalışmaktadır.