

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ ŞARJ
SİSTEMİNİN ANALİZİ VE TASARIMI

İlyas ASLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman

Prof. Dr. Atiye Hülya OBDAN

Aralık, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ ŞARJ
SİSTEMİNİN ANALİZİ VE TASARIMI**

İlyas ASLAN tarafından hazırlanan tez çalışması 20.12.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Atiye Hülya OBDAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Atiye Hülya OBDAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kamuran Nur BEKİROĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Atiye Hülya OBDAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Sisteminin Analizi ve Tasarımı” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İlyas ASLAN

İmza

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, bana kazandırmış olduğu mesleki ve teknik bilgilerin yanı sıra üzerinde yeterli bilgi sahibi olmadığım bir konuyu nasıl araştırmam ve nasıl öğrenmem gerektiği konusunda birçok şey öğretmiş oldu.

Öncelikle beni bu çalışma için cesaretlendiren, mesleki gelişimim ve olaylara bakış açımı önemli ölçüde etkileyen Elk. Yük. Müh. Halit ZENGİNCE'ye bütün katkıları için teşekkürlerimi bildiririm.

Yüksek lisans eğitimim ve tez yazım sürecim boyunca motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve yapıcı yorumları ile tez danışmanım Prof. Dr. Atiye Hülya OBDAN'a çok şey borçluyum.

Teknik açıdan sağlamış oldukları katkılardan dolayı gömülü yazılım uzmanları Asım KALELİ ve Batuhan EKİNCİ'ye teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışma süresi boyunca bana desteklerini esirgemeyen Ford Otosan Güç Elektroniği ekibine, başta Elk. Yük. Müh. Semih Kavurucu ve Fatih Kültür olmak üzere bir teşekkürü borç bilirim.

Maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen, her koşulda yanımda olan ve her zaman bana inanan kıymetli aileme en büyük şükranlarımı sunuyorum.

İlyas ASLAN

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
2 KET SİSTEMLERİNİN GENEL YAPISI	5
2.1 Giriş.....	5
2.2 Elektrikli Araçlar İçin Şarj Sistemleri.....	5
2.2.1 Kablolu Şarj Sistemleri	6
2.2.2 Kablosuz Şarj Sistemleri	6
2.3 KET Sistemlerinin Analizi.....	9
2.3.1 KET Sistemlerinde Kompanzasyon İhtiyacı	11
2.4 Seri-Seri Kompanzasyon.....	14
2.5 Kompanzasyon Topolojilerinin Karşılaştırılması	20
2.6 KET Sistemlerinde Kullanılan Sargı Yapıları	22
3 KET SİSTEMİNİN TASARIMI	25
3.1 Dairesel Sargı Tasarımı.....	25
3.1.1 İletken Tipi ve Kablo Tasarımı	26
3.1.2 İç Çap	29
3.1.3 Dış Çap	30
3.1.4 Sarım Adımı	31
3.1.5 Ferrit Nüve	32

3.1.6	Alüminyum Ekranlama	36
3.1.7	Sargı Tasarımının Simülasyonu	38
3.2	Güç Devresinin Tasarımı	43
3.3	Seri-Seri Topolojinin Simülasyonu	44
3.3.1	Çalışma Koşulları	44
3.3.2	Çalışma No #1	45
3.3.3	Çalışma No #2	50
3.3.4	Çalışma No #3	55
3.3.5	Çalışma No #4	60
4	DENEYSEL ÇALIŞMA	66
4.1	Primer ve Sekonder Sargılar	66
4.2	Ferrit Nüve	70
4.3	Kuplaj Katsayısının Ölçümü	73
4.4	Rezonans Kapasitörler	76
4.5	Yarı İletken Anahtar Seçimi	77
4.6	Elektronik Kart Tasarımı	77
4.7	Çalışma Koşulları	80
4.7.1	500W Çalışma	81
4.7.2	1000W Çalışma	82
4.7.3	1500W Çalışma	85
5	SONUÇ	87
	KAYNAKÇA	89
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	94

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Kablolu şarj sistemi güç akış diyagramı	6
Şekil 2.2	Kablosuz şarj sistemi güç akış diyagramı	7
Şekil 2.3	Kompanze edilmemiş KET devre şeması	9
Şekil 2.4	Kompanze edilmemiş KET devresinin indirgenmiş şeması	12
Şekil 2.5	Yük direncinin sargı reaktansına oranının çıkış gücüne etkisi.	13
Şekil 2.6	Dört temel kompanzasyon topolojisi a) seri-seri, b) seri-paralel, c) paralel seri, d) paralel-paralel.	14
Şekil 2.7	Seri-seri kompanzasyon devre şeması	14
Şekil 2.8	Maksimum verim ve maksimum çıkış gücünün yük direncine göre değişimi.....	20
Şekil 3.1	Dairesel sargının kesit görünümü	26
Şekil 3.2	Yuvarlak bir iletken kesitinde deri kalınlığının gösterimi	27
Şekil 3.3	Tek damarlı bakır iletkeninde deri etkisi nedeniyle akım yoğunluğunun dağılımı	28
Şekil 3.4	Bir demet iletkeninde deri ve yakınlık etkileri nedeniyle akım yoğunluğunun dağılımı	28
Şekil 3.5	Primer (TX) ve sekonder (RX) sargı dış çapları ile kuplaj katsayısının değişimi.....	31
Şekil 3.6	Dairesel KET sargıları a) nüvesiz, b) ferrit nüveli.....	32
Şekil 3.7	Dairesel KET sargılarının manyetik akı dağılımı a) nüvesiz sargı, b) ferrit nüveli sargı.....	33
Şekil 3.8	Ferrit nüvelerin kalınlığına bağlı olarak a) nüve kaybı, b) kuplaj katsayısı.....	34
Şekil 3.9	Özdeş sargılar üzerine çeşitli şekillerde yerleştirilmiş nüveler.....	35
Şekil 3.10	Farklı sayıdaki nüvelerin yerleşimi.....	36
Şekil 3.11	a) Alüminyum ekranlama kullanılmamış sargı, b) ekranlama kullanılmış sargı.....	37
Şekil 3.12	Manyetik akı dağılımı a) ekranlama yapılmamış sargı, b) ekranlama yapılmış sargı	37
Şekil 3.13	Tasarlanan dairesele sargılar a) üstten görünüm, b) yandan görünüm	39

Şekil 3.14	Nüvesiz sargının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi ..	41
Şekil 3.15	Nüve eklenmiş sargının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi.....	41
Şekil 3.16	KET sisteminin PSIM simülasyonu.....	44
Şekil 3.17	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	45
Şekil 3.18	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.....	46
Şekil 3.19	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	46
Şekil 3.20	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	46
Şekil 3.21	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	47
Şekil 3.22	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.....	47
Şekil 3.23	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	48
Şekil 3.24	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	48
Şekil 3.25	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	48
Şekil 3.26	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.....	49
Şekil 3.27	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	49
Şekil 3.28	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	50
Şekil 3.29	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	50
Şekil 3.30	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.....	51
Şekil 3.31	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	51
Şekil 3.32	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	51
Şekil 3.33	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	52
Şekil 3.34	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.	52

Şekil 3.35	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	53
Şekil 3.36	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	53
Şekil 3.37	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	53
Şekil 3.38	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.	54
Şekil 3.39	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	54
Şekil 3.40	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	55
Şekil 3.41	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	55
Şekil 3.42	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.	56
Şekil 3.43	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	56
Şekil 3.44	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	56
Şekil 3.45	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	57
Şekil 3.46	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.	57
Şekil 3.47	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	58
Şekil 3.48	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	58
Şekil 3.49	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	58
Şekil 3.50	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.	59
Şekil 3.51	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	59
Şekil 3.52	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	60
Şekil 3.53	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	60
Şekil 3.54	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.	61

Şekil 3.55	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	61
Şekil 3.56	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	61
Şekil 3.57	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	62
Şekil 3.58	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.	62
Şekil 3.59	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	63
Şekil 3.60	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	63
Şekil 3.61	Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).	63
Şekil 3.62	Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.	64
Şekil 3.63	Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).	64
Şekil 3.64	Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).	65
Şekil 4.1	Primer ve sekonder sargılar için üretilen 1200 x 0.1mm litz teli.	66
Şekil 4.2	a) Primer sargı, b) sekonder sargı	67
Şekil 4.3	Nüvesiz primer sargısının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi.	68
Şekil 4.4	Nüvesiz sekonder sargısının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi	69
Şekil 4.5	Ferrit nüvelerin sargı tabanındaki yerleşimi a) primer sargısı, b) sekonder sargısı.	71
Şekil 4.6	Nüve eklenmiş primer sargısının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi	72
Şekil 4.7	Nüve eklenmiş sekonder sargısının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi	73
Şekil 4.8	x, y ve z eksenlerinde sargıların hizalanması.	76
Şekil 4.9	Primer sargı sürme devresi şematiği	78
Şekil 4.10	Primer mosfet sürücü devresi.	79
Şekil 4.11	Sekonder köprü doğrultucu devre şematiği	79
Şekil 4.12	Kablosuz enerji transferi deney düzeneği	80
Şekil 4.13	500W çıkış gücü için rezonans tank gerilimi ve primer sekonder sargı akımları a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4	81

Şekil 4.14	500W çıkış gücü için giriş ve çıkış akım ve gerilimleri a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4	82
Şekil 4.15	1000W çıkış gücü için rezonans tank gerilimi ve primer sekonder sargı akımları a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4	83
Şekil 4.16	1000W çıkış gücü için giriş ve çıkış akım ve gerilimleri a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4	84
Şekil 4.17	1500W çıkış gücü için rezonans tank gerilimi ve primer sekonder sargı akımları a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4	85
Şekil 4.18	1500W çıkış gücü için giriş ve çıkış akım ve gerilimleri a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4	86



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Empedans uyumlama amacıyla kullanılan DC-DC dönüştürücülerin eşdeğer yük direnci	20
Tablo 2.2	Dört temel topoloji için rezonans noktasında geçerli ifadeler	22
Tablo 3.1	Elektrikli araçların kablosuz şarjı için SAE J2954'te yer alan temel parametreler	25
Tablo 3.2	Farklı damar çaplarına sahip litz tellerinde AC direncin DC dirence oranı	29
Tablo 3.3	İç çapa bağlı olarak kuplaj katsayısındaki değişim.....	30
Tablo 3.4	Farklı sarım adımlarında kuplaj katsayısının değişimi	32
Tablo 3.5	Nüve yerleşimine bağlı olarak kuplaj katsayısının değişimi	35
Tablo 3.6	Nüve adedine bağlı olarak kuplaj katsayısındaki ve öz endüktanstaki değişim.....	36
Tablo 3.7	Nüvesiz sargıların farklı hizalanma koşullarındaki kuplaj katsayılarının ölçümü.....	40
Tablo 3.8	Nüveli sargıların farklı hizalanma koşullarındaki kuplaj katsayılarının ölçümü.....	42
Tablo 3.9	Tasarlanan sargı parametreleri	43
Tablo 3.10	Güç transferi hizalanma koşulları	45
Tablo 4.1	Primer sargı ölçümleri (nüvesiz).....	68
Tablo 4.2	Sekonder sargısı ölçümleri (nüvesiz).....	69
Tablo 4.3	Primer sargı ölçümleri (nüveli)	70
Tablo 4.4	Sekonder sargı ölçümleri (nüveli).....	72
Tablo 4.5	Nüvesiz sargıların farklı hizalanma koşullarındaki kuplaj katsayılarının ölçümü.....	74
Tablo 4.6	Nüveli sargıların farklı hizalanma koşullarındaki kuplaj katsayılarının ölçümü.....	75

Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Sisteminin Analizi ve Tasarımı

İlyas ASLAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Atiye Hülya OBDAN

Elektrikli araç ekosisteminin en temel bileşenlerinden biri olan şarj sistemleri, elektrikli araç kullanımının yaygınlaşmasında önemli bir etkiye sahiptir. Kablosuz araç şarj sistemleri, kullanım kolaylığının yanı sıra elektrikli araçların batarya gereksinimini azaltma, yüksek güvenlik, düşük bakım maliyeti gibi avantajlar da sunar. Akademik çalışmalar ve ticari girişimler ile birlikte oldukça popüler bir konu haline gelmiştir.

Kablosuz enerji transferi (KET) sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, çeşitli kompanzasyon topolojileri ve sargı yapıları üzerine yoğunlaşmış durumdadır. KET sistemlerinin başarı parametreleri; güç transfer yeteneği, verim, kontrol kolaylığı, hizalanma toleransı, efektif şarj alanı, boyut ve maliyet olarak sıralanabilir. Bu çalışmada, elektrikli araçların şarjı gibi yüksek güçlü uygulamalarda yaygın olarak kullanılan kompanzasyon topolojileri ve sargı yapıları, başarı parametreleri açısından karşılaştırılmış, birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur.

Yapılan karşılaştırma neticesinde, Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE) tarafından elektrikli araçların kablosuz şarjı için tanımlanan parametreler göz önünde bulundurularak 1.5 kW çıkış gücüne sahip 85 kHz rezonans frekansında seri-seri kompanzasyon topolojisine sahip araç şarj sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Verici ve alıcı sargılar için dairesel sargı yapısı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Araç şarj sistemleri, elektrikli araçlar, kablosuz enerji transferi, kablosuz şarj.



ABSTRACT

Analysis and Design of Wireless Charging System for Electric Vehicles

İlyas ASLAN

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Atiye Hülya OBDAN

Charging systems are one of the fundamental components of the electric vehicle ecosystem and have a significant impact on the widespread adoption of electric vehicles. Wireless vehicle charging systems not only offer ease of use but also provide benefits such as reducing battery requirement, ensuring high safety and lowering maintenance costs. They have become a highly popular topic through academic studies and commercial ventures.

Research on wireless power transfer (WPT) systems has focused on various compensation topologies and coil structures. The key success parameters for WPT systems include power transfer capability, efficiency, ease of control, misalignment tolerance, effective charging area, size, and cost. In this study, commonly used compensation topologies and coil structures in high-power applications, such as electric vehicle charging systems, are compared in terms of their success parameters, highlighting their respective advantages and disadvantages.

Based on the comparison, a wireless EV charging system with a 1.5 kW output power at 85 kHz resonance frequency with a series-series compensation topology has been designed, considering the parameters defined by the Society of

Automotive Engineers (SAE) for wireless charging of electric vehicles. Circular coil structures have been used for both the transmitter and receiver coils.

Keywords: Electric vehicles, vehicle charging systems, wireless power transfer, wireless charging.



1.1 Literatür Özeti

Kablosuz enerji transferi için yapılan ilk çalışmalar, 18.yy'ın sonu ile 19.yy'ın başlarında Nikola Tesla tarafından yapılmıştır. Kablosuz enerji transferi için inşa edilen Wardencllyffe Kulesi, mali problemlerden ötürü faaliyete geçememiştir [1].

2007 yılında, MIT araştırmacıları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, 30 cm çapında sargılar kullanılarak yaklaşık 2 metre mesafede, 60 W güç transferi yaklaşık %40 verimle gerçekleştirilmiştir [46].

Dört temel kompanzasyon topolojisinin yanı sıra multi-rezonans topolojiler ile KET performansı artırılmaya çalışılmıştır. [2]'de yapılan çalışmada LCC-LCC topolojisi ile 150mm hava aralığında 3.3kW güçte %92.6 verim elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan verici ve alıcı sargılar dairesel yapıdadır.

Dairesel ve dikdörtgen yapıdaki sargılar ile elde edilen KET performansı, elektrikli araçların şarjı gibi yüksek hizalanma toleransı ve yüksek hava aralığı gerektiren uygulamalarda yeterli olmayabilir. Bu nedenle, yatay hizalanma toleransı yüksek ve geniş hava aralıklarında yüksek kuplaj gösterebilen gelişmiş sargı yapıları önerilmiştir. Yaygın olarak kullanılan geliştirilmiş sargı yapıları DD ve DDQ sargı yapıları [3], bipolar pad (BPP) [4] ve tripolar (TP) sargı yapısı [5], flux pipe (FP) sargı yapısı [6] olarak sıralanabilir.

[7]'da, elektrikli araç şarj uygulamaları için uygun LCC-LCC rezonans topolojisi ile KET sistemi tasarlanmıştır. Bu topolojinin getirdiği ilave endüktans ihtiyacı için yeni bir sargı kullanılmayıp ana sargıya entegrasyon sağlanmıştır. Böylece sistem daha kompakt bir yapıya sahip olabilmektedir. Çalışmada tam hizalanma durumunda 150mm'lik mesafeden 3 kW güç %95,5 verim ile aktarılmıştır.

KET sistemleri belirli koşullar altında birden fazla sıfır faz açısına sahip olabilmektedir. Çatallanma olgusu olarak adlandırılan bu durum sistemin kontrolünü kararsız bir yapı haline getirmektedir. Çatallanma olgusunun ortadan kaldırılması için KET sistemlerinin tasarımı için bir akış diyagramı önerilmiştir [8].

[9]'de KET sistemlerinde sıklıkla kullanılan dört temel kompanzasyon topolojisi olan SS, SP, PS ve PP topolojileri incelenmiştir. Dört temel topoloji için çatallanma olgusunu önlemek için sekonder sargısı ile kuplaj katsayısı arasındaki ilişki formüle edilmiştir.

[10]'da, dört temel kompanzasyon topolojisi için, sıfır faz açısında anahtarlamının (ZPA) sağlanabilmesi amacıyla primer kapasitesi hesabı verilmiştir. Diğer üç topolojinin aksine SS topolojisinde primer kapasitesi yükten ve manyetik kuplajdan bağımsız olması nedeniyle iyi bir tercih olabileceği belirtilse de çalışma kapsamında elektrikli araç batarya şarj uygulamaları için PP topolojisinin avantajları ortaya konulmuştur.

KET sistemleri için en önemli parametrelerden biri de sistem maliyetidir. KET sargıları için kullanılan bakır miktarı, sistem maliyeti içerisinde önemli bir yer teşkil edebilir. Dört temel kompanzasyon topolojisi, 200 kW gücündeki bir sistem için optimize edilmiş ve sargılar için kullanılması gereken bakır miktarı açısından karşılaştırılmıştır [1]. Buna göre en az bakır ihtiyacı duyulan topoloji SS topolojisidir.

[11]'da, sargılar arası mesafenin ve hizalanmanın değiştiği durumlar için adaptif frekans kontrolü önerilmiştir. Önerilen yapı ile, verim değerini maksimize eden frekans değeri anlık olarak hesaplanıp sistem maksimum verim noktasında çalıştırılmıştır. 0 ila 70 cm arasında değişen hava aralığında, %70'in üzerinde ve verim değeri elde edilmiştir.

[12]'de önerilen kontrol yapısı ile SS topolojisinde primer rezonans kapasitör uçlarından alınan gerilim örneklenerek anahtarlama frekansının sürekli sistemin rezonans noktasında tutulması sağlanmıştır.

[13]'te elektrikli araçların şarjı için kullanılan KET sistemlerinin sahip olması gereken temel özelliklere değinilmiş ve bu kriterlerin karşılanması amacıyla, literatürde sıklıkla kullanılan tek taraflı dairesel sargılar yerine iki taraflı dikdörtgen sargılardan oluşan KET transformatörü sunulmuştur. Tek taraflı sargıya sahip KET

sargılarının karşısında, çift taraflı sargılardan oluşan KET sargılarının daha küçük boyutlarda tasarlanabileceği ve sargılar arası hizalanma toleransının artırılabilceği ortaya konulmuştur. Çift taraflı sargının yapısı nedeniyle nüvenin arka tarafında oluşan kaçak akılar, alüminyum plaka ile minimize edilmiştir. Ayrıca sargıların maliyetini ve ağırlığını azaltabilmek amacıyla parça nüveler kullanılmış ve tek parça dikdörtgen nüve ile hemen hemen aynı performansı verdiği gösterilmiştir.

KET sistemlerinde kimi çalışmalarda regülasyon amacıyla ilave bir DC-DC dönüştürücü kullanılmaktadır. DC-DC dönüştürücü araç şarj uygulamalarında bataryanın hemen öncesinde kullanılabilir ancak bu durumda araç üzerinde ilave ağırlık oluşturur. [14]'da yapılan çalışmada 22kW gücünde SS topolojisine sahip araç şarj sistemi tasarımı yer almaktadır. Bu çalışmada şebeke doğrultulduktan sonra bir düşürücü dönüştürücü ile SS topolojinin giriş gerilimi kontrol edilir. Çalışmada 200 mm hava aralığında 4.87kW güç %95 verimlilikle aktarılmıştır.

KET sargıları, sistem performansını etkileyen temel bileşenlerden biridir. Literatürde önerilen çeşitli sargı yapıları ile birlikte bu yapıların optimizasyonu üzerine de birçok çalışma mevcuttur. [15]'de yapılan çalışmada dairesel sargıların optimizasyonu için ferrit nüve boyutları, yerleşimi ve sayısı, sarımlar arası mesafe, sargı iç ve dış çapı gibi parametreler analiz edilmiştir.

[16]'de yapılan çalışmada dört sargılı KET sistemi tasarlanmıştır. Sistemin batarya şarj uygulamaları için gerekli olan sabit akım ve sabit gerilim modları için kontrolcü tasarımı yapılmıştır. 200 mm hava aralığında 3.7 kW güç aktarımı gerçekleştirilmiş, sabit akım modunda %97.08, sabit gerilim modunda %96.39 pik verim elde edilmiştir.

[17]'de yer alan çalışmada, dört temel kompanzasyon topolojisi, girişlerinde akım kaynaklı evirici ve gerilim kaynaklı evirici kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen toplam sekiz adet yapı karşılaştırılmış ve akım kaynaklı SS topolojisi ve akım kaynaklı SP topolojisi, değerlendirme kriterleri açısından en iyi performansı göstermiştir.

1.2 Tezin Amacı

Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte, araç şarj sistemlerinin önemi de giderek artmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kablolu şarj sistemleri

kullanılmaktadır. Kablosuz şarj sistemleri uzun yıllardır düşük güçlü ve kısa mesafe enerji aktarımı için kullanılsa da elektrikli araçların şarjı gibi yüksek güçlü ve geniş hava aralığına sahip sistemler için halen gelişim aşamasındadır. Kablosuz şarj sistemlerinin performansını artırmak amacıyla çalışmalar kompanzasyon topolojileri ve sargı yapıları üzerinde yoğunlaşmış durumdadır. Bir KET sistemi tasarımı için sistem gereksinimleri belirlenmeli ve buna uygun kompanzasyon topolojisi ile sargı yapısı seçilmelidir.

Bu çalışmada, elektrikli araç kablosuz şarj sistemleri için sistem gereksinimleri incelenmiş ve buna uygun kompanzasyon topolojileri ve sargı yapıları analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, ele alınan yapıların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymak, elektrikli araç şarj uygulamaları için uygunluğunu incelemek ve sistemin optimizasyonunu yapmaktır.

Çalışma kapsamında, elektrikli araçların kablosuz şarjı için Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) tarafından yayınlanmış olan SAE J2954 standardı referans alınmıştır.

1.3 Hipotez

Bu çalışma kapsamında 1.5 kW çıkış gücüne sahip bir KET sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Literatürde ve uygulamalarda yayın olarak yer alan dört temel kompanzasyon topolojisi içerisinde SS topolojisi, sahip olduğu üstünlükler nedeniyle elektrikli araçların kablosuz şarjı için en uygun topoloji olduğu ortaya konulmuştur.

Diğer yandan KET sistemlerinde kullanılan en yaygın sargı yapılarından biri olan dairesel sargı yapısı sonlu eleman yöntemi (SEY) kullanılarak Ansys Maxwell 3D ile analiz edilmiştir. Tasarlanan sistem gereksinimlerine uygun olarak optimize edilmiştir.

2.1 Giriş

Elektrikli araçların ilk tasarımı bu yana bir yüzyıldan fazla süre geçmiş olmasına karşın, kullanımının yaygınlaşması 2000’li yıllara değin gerçekleşmemiştir. Yarı iletken teknolojilerinin gelişiminin yanı sıra küresel ısınma nedeniyle artan çevresel duyarlılık ve sınırlı fosil yakıt rezervi gibi nedenler, elektrikli araçlara olan ilgiyi artırmıştır. Elektrikli araçların yaygınlaşması, beraberinde enerji depolama sistemleri ve şarj teknolojilerinin önemini de artırmıştır. Günümüzde kullanımı en yaygın ulaşım araçları fosil yakıtlar ile beslenmektedir. Fosil yakıtlı araçlarla karşılaştırıldığında, elektrikli araçların en büyük dezavantajlarından biri uzun şarj süreleridir. DC hızlı şarj istasyonları ile şarj süresi 30 dakika gibi kısa sürelerle kadar inebilmiş olsa da [18], fosil yakıtlı araçlarla kıyaslandığında arada dikkate değer bir fark mevcuttur.

Öte yandan, elektrikli araçlar enerji kaynağı olarak enerji yoğunluğu nispeten düşük bataryaları kullanır. Petrolün enerji yoğunluğunun 12,000 Watt-satt/kg olmasına karşın lityum-iyon bataryaların enerji yoğunluğu 200 Watt-saat/kg gibi oldukça düşük bir değerdedir [19]. Bu durum, elektrikli araçların menzil probleminde batarya gereksiniminin önemli bir payı olduğuna işaret eder.

2.2 Elektrikli Araçlar İçin Şarj Sistemleri

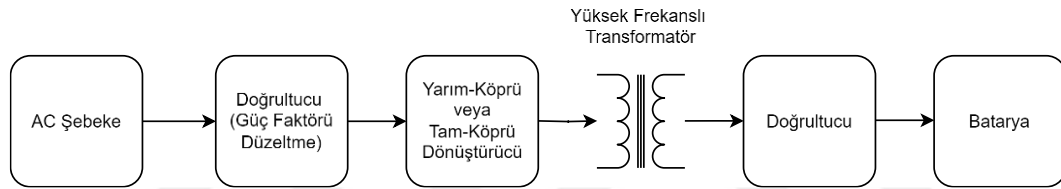
Batarya teknolojisi, elektrikli araçların en önemli bileşenlerinden biridir. Bir elektrikli aracın maliyetinin ve ağırlığının üçte birini bataryalar oluşturur [20]. En yaygın kullanılan batarya tipi lityum-iyon bataryalardır. Bataryaların toplam ömrü ve şarj süresi, şarj cihazı ile doğrudan ilişkilidir. Bir batarya şarj cihazı; yüksek güç

yoğunluğu, yüksek verim, düşük ağırlık, düşük hacim ve düşük maliyete sahip olmalıdır [18].

Elektrikli araçlar için kablolu şarj sistemleri ve kablosuz şarj sistemleri olarak iki temel şarj yönteminden bahsedilebilir. Her iki yöntem birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

2.2.1 Kablolu Şarj Sistemleri

Kablolu şarjda araç bataryaları dışarıdan bağlanan bir kablo aracılığıyla şarj edilir. Enerji kaynağı olarak genellikle tek fazlı veya üç fazlı şebeke kullanılır. Şebeke gerilimi bir güç faktörü düzeltmeli doğrultucu ile doğrultulur ve izoleleli bir DC-DC dönüştürücü ile araç bataryası için gerekli gerilim regülasyonu sağlanır. DC-DC dönüştürücü aynı zamanda şebeke ile batarya arasında galvanik izolasyonu sağlar. Tipik bir kablolu şarj sistemi için güç akış diyagramı Şekil 2.1’de verilmiştir.



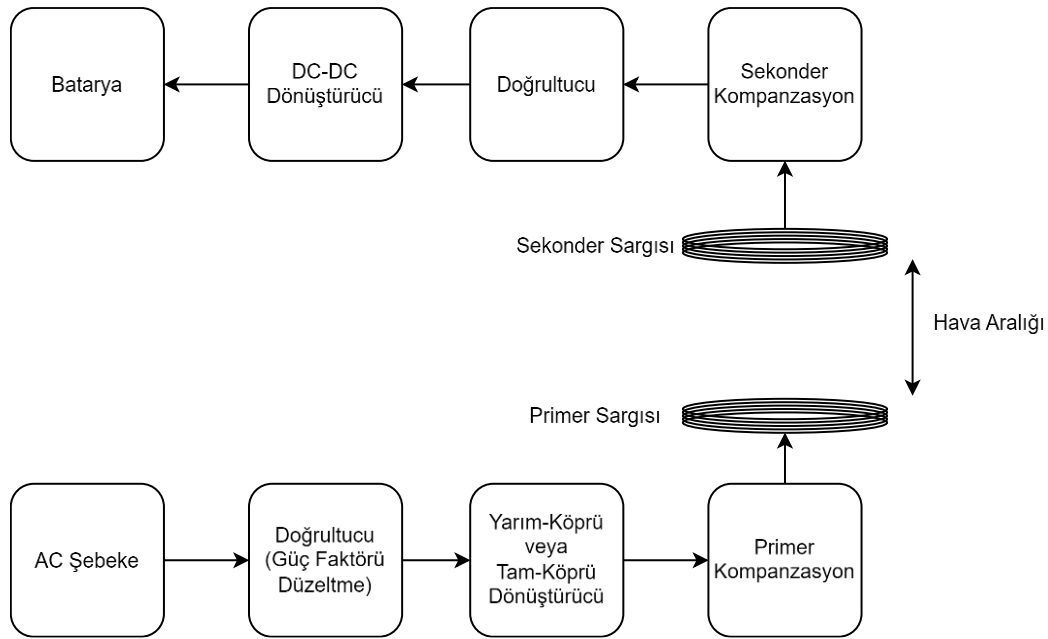
Şekil 2.1 Kablolu şarj sistemi güç akış diyagramı

Kablolu araç şarj sistemleri araç üstü/yerleşik (on-board) ve araç dışı (off-board) olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Yerleşik şarj cihazlarında, şebeke gerilimi bir kablo yardımı ile doğrudan araca bağlanır. Araç içerisinde yer alan doğrultucu ve DC-DC dönüştürücü ile bataryalar şarj edilir. Bu yöntem, güç dönüştürücülerin araç üzerinde bulunması nedeniyle sınırlı bir güç seviyesine kadar elverişlidir. Araç dışı şarj sistemlerinde araca bağlanan kablo ile bataryaların şarjı için gerekli DC gerilim doğrudan uygulanır. Güç dönüştürücülerin araç dışında bulunması nedeniyle boyut ve ağırlık kısıtlaması bulunmayabilir. Günümüzde, MW mertebelerine kadar DC şarj istasyonları mevcuttur.

2.2.2 Kablosuz Şarj Sistemleri

Kablosuz şarjda araç bataryaları fiziksel bir bağlantı ihtiyacı olmadan şarj edilebilir. Kablolu şarjda olduğu gibi enerji kaynağı olarak güç seviyesine bağlı olarak tek fazlı veya üç fazlı şebeke kullanılır. Şebeke gerilimi güç faktörü düzeltmeli bir doğrultucu ile doğrultulur. Doğrultulan gerilim bir rezonans evirici ile yüksek frekanslı AC gerilime dönüştürülür ve primer sargı beslenir. Primer sargısı bir

genellikle bir kompanzasyon tankı ile kompanze edilir. Primer sargısından akan akım, sekonder sargısında bir gerilim endükler. Sekonder sargısı da genellikle bir kompanzasyon tankına sahiptir. Endüklenen gerilim bir doğrultucu ile doğrultulur ve araç bataryaları için gerekli gerilim seviyesi elde edilir. Sekonder tarafta doğrultucu ile batarya arasına bir DC-DC dönüştürücü de eklenebilir. Bu ilave dönüştürücü, batarya şarjı için sabit akım ve sabit gerilim modlarını sağlayabileceği gibi empedans uyumlama görevi de görmektedir [21]. Kablosuz şarj için blok diyagram Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Kablosuz şarj sistemi güç akış diyagramı

Sistemin yahut kullanıcının ihtiyacı doğrultusunda ilave yapıların da eklendiği çalışmalar mevcuttur. Örneğin primer sargısında meydana gelebilecek izolasyon hatalarına karşın, yüksek frekansı evirici çıkışına bir izolasyon transformatörü eklenerek ekstra güvenlik ve koruma sağlanabilir [22]. Eklenebilecek bu transformatör aynı zamanda empedans uyumlama görevini de yerine getirebilir.

Araç dışı DC şarj cihazları, elektrikli araç bataryalarını doğrudan şarj ettiği için, araç üzerinde ayrıca bir güç dönüştürücüsüne ihtiyaç bulunmamaktadır. Ancak kablosuz şarj için, araç üzerinde sekonder sargısı, doğrultucu ve hatta kimi durumlar için bir DC-DC dönüştürücü yer alması gerekmektedir. Eklenen her ilave yapı, sistemin maliyetini ve boyutunu artırmaktadır. Özellikle araç tarafında ağırlığın olabildiğince düşük olması çok daha büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle primer ve sekonder sargılarının kompanzasyonu için kullanılacak

topolojiler, sekonderde yer alacak ilave dönüştürücünün görevini yerine getirebilecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. Nitekim kimi kompanzasyon topolojileri ile Nitekim kimi kompanzasyon topolojileri, yük tarafında sabit akım ve/veya sabit gerilim karakteristiği göstermektedir. KET için literatürde yer alan çalışmaların çok büyük bir çoğunluğu, kompanzasyon topolojisinin veya sargı yapısının tasarımına odaklanmıştır.

Elektrikli araçların kablosuz şarjı için üç farklı moddan bahsedilebilir: statik, yarı-dinamik ve dinamik [23]. Statik şarj, bir aracın bir kablosuz şarj vericisinin üzerinde sabit durduğu; otoparklar, alışveriş merkezleri ve konutlar gibi alanlar için uygun olan şarj modudur. Yarı-dinamik şarj, yolculuk esnasında kısa süreli duraklamalar esnasında elektrikli araç bataryalarının şarj edilmesini hedefler. Trafik ışıkları ve otobüs durakları gibi alanlar yarı-dinamik kablosuz şarj için idealdir. Dinamik şarjda ise araç sürekli hareket halinde iken yol altına döşenmiş şarj vericileri ile araç bataryaları şarj edilir. Dinamik şarj, sürekli aynı rotayı izleyen otonom araçlar, otobüsler ve otobanlar gibi alanlarda kullanım için elverişlidir. Dinamik şarjda, uzun bir verici hattının yol altına döşenmesi gerektiği için altyapı maliyeti oldukça yüksektir. Ancak araçların sürekli şarj ediliyor olması sayesinde batarya gereksinimi %20 kadar azaltılabilir [22]. Statik şarj, en düşük kurulum maliyetine sahip olsa da uzun süreli duraklama gereksinimi bir dezavantajdır. Yarı-dinamik şarj, statik ve dinamik şarj modlarının avantajlarını birleştirir. Düşük altyapı maliyetine sahiptir ve uzun süreli duraklamalar gerektirmez.

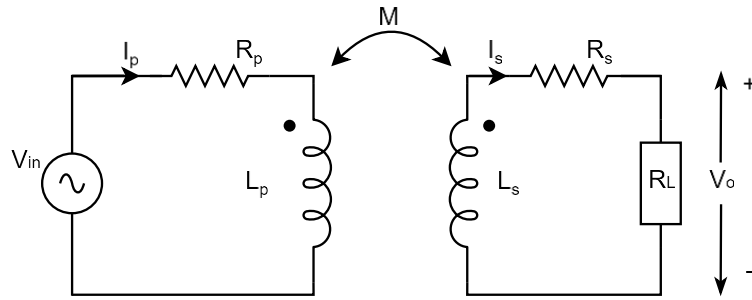
Elektrikli araçların şarjı için KET sistemlerinin kullanılması; kullanım kolaylığı, yüksek güvenilirlik, kablo karmaşasının ortadan kaldırılması, konnektör uyumsuzluğunun giderilmesi, uzun ömür gibi avantajları beraberinde getirir. Tüm bu avantajlarının yanı sıra, KET sistemlerin şu dört özelliğe sahip olması oldukça önemlidir [13].

- Yüksek verim (en az %95)
- Hava aralığı (en az 75mm)
- Yatay hizalanma toleransı (± 125 mm)
- Kompakt yapı ve düşük ağırlık

2.3 KET Sistemlerinin Analizi

KET sistemleri manyetik bağışımli iki veya daha fazla sargıya sahiptir. Primer sargısı olarak isimlendirilen sargı, bir kaynak tarafından beslenir. Primer sargısı ile manyetik bağışımı bulunan sargılar üzerinde bir gerilim endüklenir ve sargı uçlarına yük bağılandığı durumda yükten bir akım akar. Kablosuz enerji transferi bu şekilde gerçekleşmiş olur.

Sargıları kompanze edilmemiş bir KET sisteminin devre şeması Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Kompanze edilmemiş KET devre şeması

Şekil 2.3'te, şebeke gerilimi ve devamında yer alan doğrultucu ve evirici ideal bir sinüsoidal gerilim kaynağı V_{in} olarak modellenmiştir. Gerçek uygulamada evirici çıkışı kare dalga formundadır ve yüksek frekanslı harmonikler içermektedir. Ancak analizi kolaylaştırmak amacıyla Temel Harmonik Yaklaşımı adı verilen yaklaşım kullanılacaktır. Bu yaklaşım ile rezonans dönüştürücüler gerçeğe yakın bir doğrulukta analiz edilebilmektedir.

N tur sayısına sahip bir sargının içerisinde i akımı geçirilirse, indüktör etrafında bir manyetik akı oluşur. Sargı uçlarında oluşacak gerilim ise Faraday yasasına göre tur sayısı N ve manyetik akının zamana göre değışimi ile doğru orantılıdır.

$$v = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1)$$

ϕ akısı i akımı sayesinde oluşur. Akımdaki herhangi bir değışim, akıdaki değışimi yaratır.

$$v = N \frac{d\phi}{dt} \frac{di}{dt} \quad (1.2)$$

$N \frac{d\phi}{di}$ ifadesi, endüktansa (L) eşit olduğu için:

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (1.3)$$

Birbirine yeterince yakın olan iki sargıdan her biri, diğer sargının ürettiği manyetik akıya maruz kalır ve maruz kalınan akı, sargı uçlarında bir gerilim endükler. Yalnızca birinci sargıdan akım aktığını ve ikinci sargının uçlarının açık devre olduğu kabul edilirse ve birinci sargının ürettiği akı ϕ_1 olarak isimlendirilirse,

$$\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12} \quad (1.4)$$

ϕ_{11} , birinci sargının ürettiği akının ikinci sargıyı kesmediği akı.

ϕ_{12} , birinci sargının ürettiği ve ikinci sargıyı kesen akı.

Birinci sargıda endüklenen gerilim

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (1.5)$$

İkinci sargıda endüklenen gerilim

$$v_2 = N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} \quad (1.6)$$

olarak ifade edilir.

$N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt}$ ifadesi, ortak endüktans (M_{21}) olarak isimlendirilir. Ortak endüktans, bir sargının diğer bir sargıya gerilim endükleme yeteneğini ifade eder ve endüktans gibi Henry (H) ile ölçülür.

$$v_2 = M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (1.7)$$

Eğer ikinci sargıdan da bir akım aktığı düşünülürse, benzer şekilde ikinci sargı etrafında oluşan manyetik akı da birinci sargıda bir gerilim endükler. Bu durumda oluşacak ortak endüktans ifadesi M_{12} olarak ifade edilecek olursa, aşağıdaki ifade geçerli olacaktır.

$$M_{21} = M_{12} \quad (1.8)$$

Ortak endükans M değeri, iki sargının endüktanslarının geometrik ortalamasından daha büyük olamaz. (1.9)'da ifade edildiği üzere kuplaj katsayısı (k) ile sınırlandırılır.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (1.9)$$

Kuplaj katsayısı, sargılardan birinin oluşturduğu ve diğer sargıyı kesen manyetik akı miktarının (ϕ_{12}), ürettiği toplam manyetik akıya (ϕ_1) oranına eşittir.

$$\frac{\phi_{12}}{\phi_1} \quad (1.10)$$

(1.4) ve (1.10) eşitlikleri dikkate alındığında $0 \leq k \leq 1$ ifadesinin her zaman geçerli olduğu görülmektedir.

Herhangi iki sargı arasındaki kuplaj katsayısı sıfırdan büyükse bu iki sargı manyetik bağlaşımlı sargılardır.

2.3.1 KET Sistemlerinde Kompanzasyon İhtiyacı

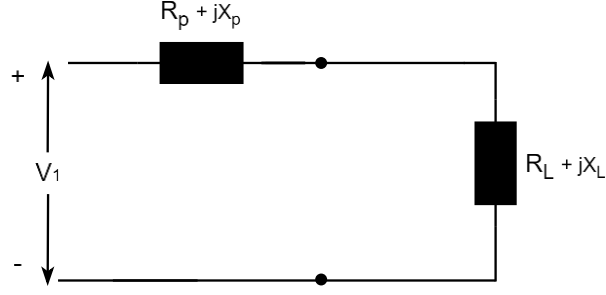
KET sekonder sargısı için çok önemli iki parametre vardır: açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akımı I_{sc} [24]. Bu parametreler sırasıyla (2.11) ve (2.12)'de verilmiştir.

$$V_{oc} = j\omega M I_1 \quad (1.11)$$

$$I_{sc} = \frac{M}{L_2} I_1 \quad (1.12)$$

Kompanze edilmemiş KET sistemlerinde açık devre gerilimi ile kısa devre akımının çarpımı, sistemin görünür gücünü verir. Diğer bir deyişle, sargıdan alınabilecek maksimum güç değerini verir [25].

Şekil 2.3'te yer alan kompanze edilmemiş KET devresi, Şekil 2.4'e indirgenebilir [26].



Şekil 2.4 Kompanze edilmemiş KET devresinin indirgenmiş şeması

Şekil 2.4'e göre, sekonderde yer alan toplam empedans $Z_{eş}$, (1.13) ile ifade edilir.

$$Z_{eş} = R_L + R_2 + j\omega L_2 \quad (1.13)$$

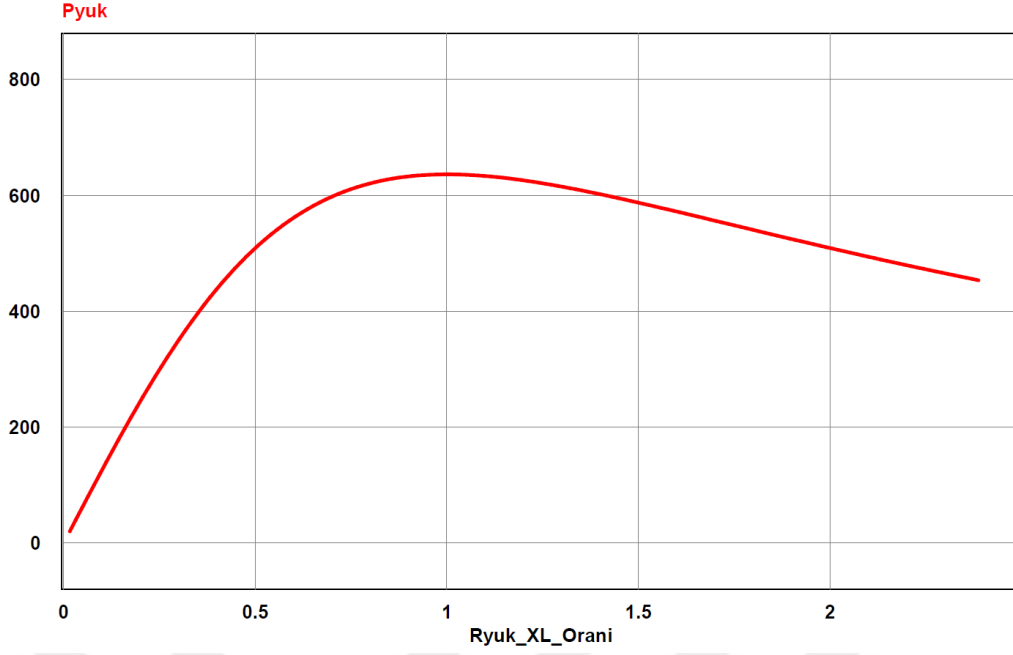
Yük akımı (1.14) ile ifade edilir.

$$I_o = \frac{V_{oc}}{\sqrt{(R_{yük} + R_2)^2 + \omega^2 L_2^2}} \quad (1.14)$$

Yüke aktarılan aktif güç (1.15) ile ifade edilir.

$$P_{yük} = I_o^2 R_{yük} = \frac{R_y V_o^2}{(R_{yük} + R_2)^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (1.15)$$

Maksimum güç transferi teorisine göre, çıkışa maksimum aktarılabilecek güç için yükün eşdeğer direncinin, çalışma frekansında sargının indüktif reaktansına eşit olması gerekmektedir. Bu durum Şekil 2.5'te de ayrıca gösterilmiştir. Yük direncinin sargının reaktansına oranının bire eşit olduğu durumda, çıkış gücü en yüksek değerini almıştır. Sargının eşdeğer seri direnci, yük direnci yanında oldukça küçük olacağından ihmal edilmiştir.



Şekil 2.5 Yük direncinin sargı reaktansına oranının çıkış gücüne etkisi.

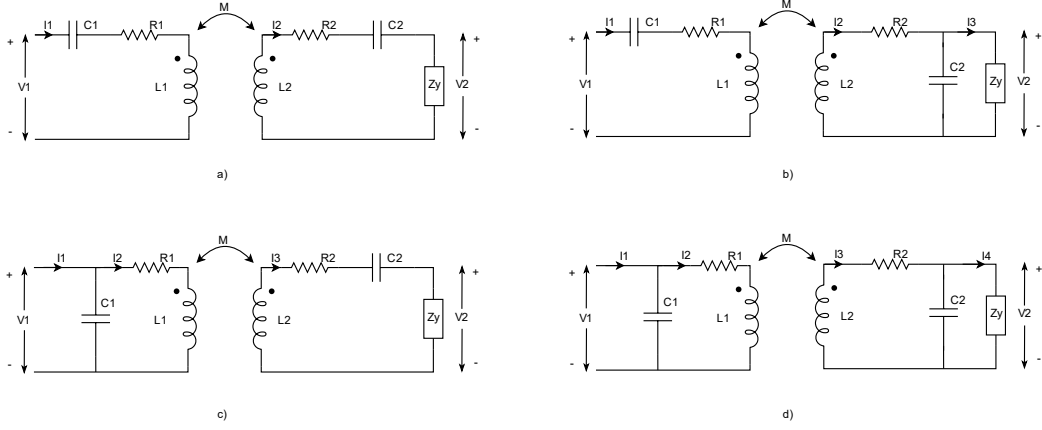
Kompanzasyon yapılmaz ise, yüke aktarılan güç en fazla sargının VA değerinin yarısı kadar olabilmektedir [25, 27].

$$P_{max} = \frac{V_{oc}^2}{2R_{yük}} \quad (1.16)$$

KET sistemlerinde çoğunlukla hem primerde hem sekonderde kompanzasyon yapılmaktadır. Sekonderdeki yapılan kompanzasyonun amacı, transfer edilen gücü artırmak; primerdeki kompanzasyonun amacı ise, sistemi besleyen kaynağın görünür gücünü minimize etmektir [2].

Literatürde çok çeşitli kompanzasyon topolojileri yer almaktadır. Sistem boyutu, maliyet, güç seviyesi, yük karakteristiği gibi parametreler seçilecek kompanzasyon topolojisi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle farklı uygulamalar için farklı kompanzasyon topolojileri daha elverişli olabilir.

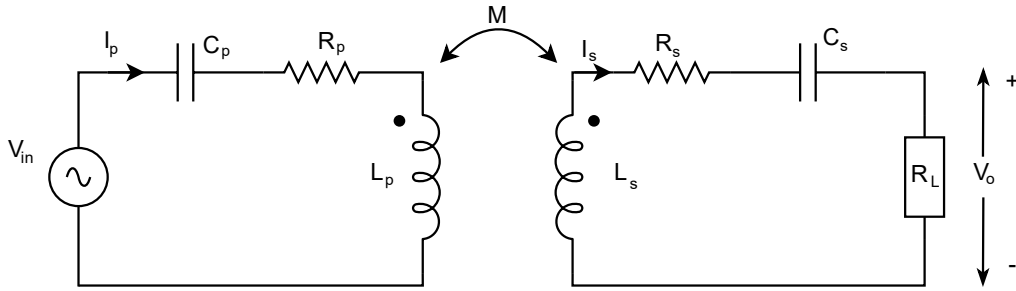
Dört temel kompanzasyon topolojisi Şekil 2.6'da verilmiştir. Bu topolojiler, kompanzasyon için kullanılan kapasitörlerin, sargıya seri veya paralel bağlantısına göre isimlendirilmektedir. Örneğin primer sargısına seri bağlı bir kapasitör ve sekonder sargısına paralel bağlı bir kapasitörden meydana gelen topoloji seri-seri (SS) olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 2.6 Dört temel kompanzasyon topolojisi a) seri-seri, b) seri-paralel, c) paralel-seri, d) paralel-paralel.

2.4 Seri-Seri Kompanzasyon

Seri-seri kompanzasyon topolojisi, KET sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Devre şeması Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 Seri-seri kompanzasyon devre şeması

Seri-seri topolojide, çevre denklemleri (1.17) ve (1.18) eşitlikleri ile ifade edilebilir.

$$V_1 = \left[R_1 + j\omega L_1 + \left(\frac{1}{j\omega C_1} \right) \right] I_1 - j\omega M I_2 \quad (1.17)$$

$$0 = \left[Z_y + R_2 + j\omega L_2 + \left(\frac{1}{j\omega C_2} \right) \right] I_2 - j\omega M I_1 \quad (1.18)$$

(1.17)’de eşitliğin her iki tarafı I_1 akımına bölünecek olursa,

$$\frac{V_1}{I_1} = \left[R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right] - \frac{j\omega M I_2}{I_1} \quad (1.19)$$

elde edilir. Giriş geriliminin giriş akımına bölümünden, kaynağın gördüğü toplam empedans değeri elde edilir. Yani (1.19)'da eşitliğin sağ tarafı, kaynak tarafından görülen empedansa eşittir.

(1.18)'de I_1 akımı ifadesi yalnız bırakılıp (1.19)'da eşitliğin sağ tarafına yazılacak olursa,

$$\frac{V_1}{I_1} = \left[R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right] + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + Z_y + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} \quad (1.20)$$

elde edilir.

(1.20) ile elde edilen ifadede, eşitliğin sağ tarafı primerde yer alan kaynağın gördüğü toplam empedans ifadesidir. $\left[R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right]$ ifadesinde yer alan parametreler sırasıyla primer sargısının iç direncini, primer sargısının endüktif reaktansını ve primer rezonans kapasitörünün kapasitif reaktansını ifade etmektedir. $R_2 + Z_y + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}$ ifadesi Z_2 eşdeğer empedans olarak ifade edilecek olursa sekonderden primere yansıyan toplam empedans, $\frac{\omega^2 M^2}{Z_2}$ olarak ifade edilir [24, 28, 29].

Görüldüğü üzere sekonderde SS topolojisinde, rezonans frekansında çalışıldığı durumda, primere yansıyan reaktans sıfırdır. Bu durum seri-seri topolojinin diğer topolojilere göre en büyük avantajlarından biridir [9, 10, 28]. Bu avantaj şu şekilde detaylandırılabilir [9, 21, 30]:

- 1- Primer kapasitör değeri kuplaj katsayısından bağımsızdır. Bu nedenle sargılar arası hizasızlık durumunda sistemin rezonans frekansı değişmez.
- 2- Primer kapasitör değeri yükten bağımsızdır. Değişken yük durumları için sistemin rezonans frekansı değişmez.

Sekonderden primere yansıyan bir reaktans olmadığı için, primer rezonans kapasitörünün değeri yalnızca primer sargı endüktansını kompanze edecek şekilde hesaplanır.

$$C_p = \frac{1}{\omega L_p} \quad (1.21)$$

Seri-seri kompanzasyon topolojisinin en büyük dezavantajı ise, eğer alıcı tarafı yoksa, yani boşa çalışma durumunda, primerden görülen eşdeğer empedans sıfır olur. İndüktörün ve kapasitörün iç dirençleri dışında akımı sınırlayacak bir şey bulunmamaktadır. Bu durum çok yüksek gerilim indüklenmesine yol açar ve çalışma güvenliğini tehlikeye sokar [31].

SS topolojisinde KET trafosunun dönüştürme oranını bulmak için, (1.18)'deki ifadeden çıkış akımının giriş akımına oranı elde edilebilir.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{j\omega M}{Z_y + R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} \quad (1.22)$$

Eğer sistem rezonans frekansında çalışıyor ise, (1.22)'deki ifadede paydada yalnızca yük empedansı ve sekonder sargısının eşdeğer direnci kalır.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{j\omega M}{Z_y + R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} \quad (1.23)$$

Rezonans frekansında çalışma durumunda (1.23)'teki ifadeden elde edilecek sonuçlar şu şekildedir:

- 1- Frekans ve kuplaj katsayısı arttıkça, KET trafosunun dönüştürme oranı yükselir.
- 2- Yük empedansı arttıkça KET trafosunun dönüştürme oranı azalır.

Primerde seri kapasitör ile kompanzasyon yapıldığı durumda kompanzasyon kapasitesi yükten bağımsız olur ve (1.24) ile hesaplanır [27].

$$C_s = \frac{1}{\omega^2 L_1} \quad (1.24)$$

Primerden akan akım ile sekonderden yansıyan empedansın reel kısmı çıkış gücü ifadesini verir. Buna göre, rezonans frekansında çalışıldığında transfer edilen gücün limiti teorik olarak yoktur [32].

$$P_{(\omega=\omega_0)} = \frac{\omega^2 M^2}{R} \cdot I_1^2 \quad (1.25)$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{P \cdot R}}{\omega_0 \cdot M} \quad (1.26)$$

Verim, yüke aktarılan toplam gücün kaynaktan çekilen toplam aktif güce oranı olarak ifade edilir ve seri-seri topoloji için (1.27)'daki gibi hesaplanabilir [33].

$$\eta = \frac{I_2^2 R_L}{I_1^2 R_1 + I_2^2 (R_2 + R_L)} = \frac{R_L}{\left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 R_1 + R_2 + R_L} \quad (1.27)$$

Eşitliğin paydasında yer alan $\frac{I_1}{I_2}$ ifadesi, yeniden düzenlenecek olursa verim için (1.28) ifadesi elde edilir.

$$\eta = \frac{\omega^2 M_{12}^2 R_L}{[(R_2 + R_L)^2 + X_2^2] R_1 + \omega^2 M_{12}^2 (R_2 + R_L)} \quad (1.28)$$

Düzenlenmiş verim ifadesine göre, manyetik bağlaşımın ve çalışma frekansının artması, sistem verimini artıracaktır. Ayrıca, primerdeki eşdeğer reaktansın (X_1), verim ifadesine etkisinin olmadığı; sekonder tarafın eşdeğer reaktansının (X_2) ise verimi ters orantılı olacak şekilde etkilemektedir [33].

Verim ifadesinin sekonder reaktansı X_2 'ye göre türevi alınıp sıfıra eşitlenecek olursa, maksimum verim için X_2 'nin optimal değeri elde edilebilir.

$$\frac{\partial \eta}{\partial X_2} = 0 \quad (1.29)$$

$$X_{2_OPT} = 0 \quad (1.30)$$

(1.30)'a göre optimal sekonder kapasitör değeri, sistemin çalışma frekansında sekonder sargı endüktansını kompanze edecek değer olarak seçilmelidir.

Benzer şekilde (1.28)'de elde edilen verim ifadesinin yükün eşdeğer direncini temsil eden R_L 'ye göre türevi alınarak optimal yük direnci değeri elde edilebilir.

$$\frac{\partial \eta}{\partial R_L} = 0 \quad (1.31)$$

$$R_{L_OPT_ \eta} = R_2 \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 R_2}} = R_2 \sqrt{1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2} \quad (1.32)$$

(1.32)'de elde edilen optimum eşdeğer yük direnci ifadesi, (1.28)'deki verim ifadesinde yerine konulacak olursa, maksimum verim ifadesi (1.33) olarak elde edilir.

$$\eta_{max} = \frac{k_{12}^2 Q_1 Q_2}{\left(1 + \sqrt{1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2}\right)^2} \quad (1.33)$$

Seri-seri topoloji için sistemin verimi, $k_{12}^2 Q_1 Q_2$ ifadesinin büyüklüğü ile ölçülür [33].

Seri kompanzasyonlu KET sistemlerinde maksimum güç transferi için optimal bir kuplaj değeri mevcuttur [34]. Çıkış gücü ifadesi (1.34) ile ifade edilir [12].

$$P_o = I_2^2 \cdot Z_y$$

$$= \left[\frac{V_1 j \omega M}{\left[R_2 + Z_y + j \omega L_2 - \frac{1}{j \omega C_2} \right] \left[R_1 + j \omega L_1 - \frac{1}{j \omega C_1} \right] + \omega^2 M^2} \right]^2 \cdot Z_y \quad (1.34)$$

Güç ifadesinin, ortak endüktans M'ye göre türevi alınır ve sıfıra eşitlenirse [34];

$$\frac{\partial P}{\partial M} = 0 \quad (1.35)$$

$$M = \frac{\sqrt{R_1(R_2 + R_{Load})}}{\omega_0} \quad (1.36)$$

Bu durum için çıkış gücü ifadesi şu şekilde elde edilir;

$$P_{max} = \frac{R_L V_1^2}{4 R_p (R_2 + R_L)} \quad (1.37)$$

Optimal kuplaj değeri şu şekilde ifade edilir;

$$k = \frac{1}{\sqrt{Q_1 Q_2}} \quad (1.38)$$

Maksimum çıkış gücü için eşdeğer yük direncinin optimal değeri aşağıdaki şekilde bulunur [33]:

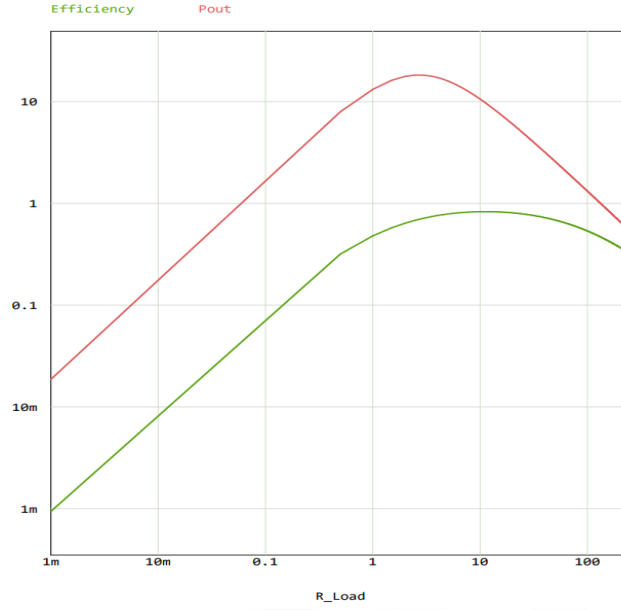
$$\frac{\partial P}{\partial R_L} = 0 \quad (1.39)$$

$$R_{L_OPT_Po} = R_2 \left(1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 R_2} \right) \quad (1.40)$$

Elde edilen bu ifade (1.32) ile karşılaştırılacak olursa, yük direncinin optimal değerinin maksimum verim ve maksimum çıkış gücü noktaları için farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılır.

$$R_{L_OPT_Po} < R_{L_OPT_η} \quad (1.41)$$

(1.41)'teki eşitsizliğe göre, eşdeğer yük direnci sistemin nominal çıkış gücünde çalışacak şekilde seçilirse, sistem çalışabileceği maksimum verim noktasında çalışamaz. Şekil 2.8'de görüldüğü üzere maksimum verim ile maksimum çıkış gücü aynı yük durumunda gerçekleşmemektedir. Ayrıca batarya şarjı gibi uygulamalarda eşdeğer yük direnci, bataryaların şarj karakteristiğinden ötürü zaman içerisinde değişiklik gösterecektir. Bu nedenle eğer sistem belirli bir yük direncine göre optimize edilmiş olsa dahi şarj süresi içerisinde optimum bölgeden uzaklaşması kaçınılmazdır. Bu istenmeyen durumun üstesinden gelebilmek amacıyla maksimum verim noktasını takip edebilecek yapılar önerilmiştir [33]. Örneğin [35]'te, maksimum verim noktasının takibi için sekonder tarafta senkron doğrultucu yapısı önerilmiştir. Sekonder tarafta DC-DC dönüştürücüler kullanılarak empedans uyumlama ile eşdeğer yük direnci istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Temel DC-DC dönüştürücüler için empedans PWM sinyalinin doluluk oranına bağlı olarak dönüştürücü girişinden görülen eşdeğer yük direnci değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.8 Maksimum verim ve maksimum çıkış gücünün yük direncine göre değişimi

Düşürücü, yükseltici ve düşürücü-yükseltici DC-DC dönüştürücüler için sürekli akım modunda Tablo 2.1’deki eşitlikler geçerlidir:

Tablo 2.1 Empedans uyumlama amacıyla kullanılan DC-DC dönüştürücülerin eşdeğer yük direnci

Dönüştürücü	Dönüştürücü Girişinden Görülen Eşdeğer Direnç
Düşürücü	$R'_L = \frac{R_L}{D^2}$
Yükseltici	$R'_L = (1 - D)^2 R_L$
Düşürücü-Yükseltici	$R'_L = \left(\frac{1 - D}{D}\right)^2 R_L$

2.5 Kompanzasyon Topolojilerinin Karşılaştırılması

KET sistemlerinde kompanzasyonun temel amacı sistem performansını maksimize etmektir. Bununla birlikte her bir topoloji birbirinden farklı performans özelliklerine sahiptir. Dolayısıyla optimum sistem tasarımı için uygulamanın gereksinimlerine göre en elverişli topoloji belirlenmelidir.

Literatürde çok sayıda topoloji önerilmiştir. Bunların en başında, dört temel topoloji olarak isimlendirilen seri-seri, ser-paralel, paralel-seri ve paralel-paralel topolojileri yer almaktadır.

Dört temel topoloji için primer rezonans kapasitör hesabı, sekonderden primere yansıyan empedans ifadesi ve primer-sekonder kalite faktörü eşitliği Tablo 2.2’de verilmiştir. Bu tabloya göre aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir [28].

- Primer sargı akımının sabit olduğu kabul edilirse, seri kompanzasyonda R yükü sıfıra doğru gittiğinde primere yansıyan empedans ve güç transfer yeteneği sonsuza doğru gitmektedir.
- Benzer sonuç paralel kompanzasyonda R yükünün sonsuza doğru gittiği durumda da gerçekleşir.
- Seri kompanzasyonda primere yansıyan empedansta reaktif bileşen yoktur.
- Paralel kompanzasyonda primere kapasitif bir empedans yansır.
- Dört temel kompanzasyon topolojisi için primer endüktansı ve sekonderden primere yansıyan reaktif bileşenin kompanzasyonu için primere kapasitesinin nasıl hesaplanacağı Tablo 2.2 (b)’de yer almaktadır.
- Primerde seri kompanzasyon yapıldığı durumda, primer kompanzasyon kapasitesi yükten bağımsız olur.
- Primerde paralel kompanzasyon yapıldığı durumda kapasite yüke bağlı olarak hesaplanır. Bu durumda kapasite hesabı, nominal güç için yapılır. Çünkü kapasitenin değerinin yük ile değişebilmesi pratik açıdan pek mümkün değildir.

Buradan çıkan sonuca göre, değişken yük ve değişken kuplajlı sistemlerde SS topolojisi çok daha avantajlı olmaktadır.

Dört temel topoloji için aynı güç değerinde kullanılması gereken bakır miktarı karşılaştırıldığında, seri-seri topolojinin en az bakır ihtiyacına sahip olduğu; seri-paralel topolojide %4.6, paralel-seri topolojide %30 ve paralel-paralel topolojide %24 daha fazla bakır gereksinimi olduğu elde edilmiştir [1].

Elde edilen bulgular neticesinde bu çalışma kapsamında seçilen kompanzasyon topolojisi seri-seri topoloji olmuştur.

Tablo 2.2 Dört temel topoloji için rezonans noktasında geçerli ifadeler [28]

a) Primere Yansıyan Empedans		
Sekonderde Seri Kompanzasyon	$ReZ_{r0} = \frac{\omega_0^2 M^2}{R}$	$ImZ_{r0} = 0$
Sekonderde Paralel Kompanzasyon	$ReZ_{r0} = \frac{M^2 R}{L_s^2}$	$ImZ_{r0} = -\frac{\omega_0 M^2}{L_s}$
b) Primer Kapasitör Hesabı		
Seri-Seri Topoloji	$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 L_p}$	
Seri-Paralel Topoloji	$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 \left(L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)}$	
Paralel-Seri Topoloji	$C_p = \frac{L_p}{\left(\frac{\omega_0^2 M^2}{R} \right)^2 + \omega_0^2 L_p^2}$	
Paralel-Paralel Topoloji	$C_p = \frac{L_p - \frac{M^2}{L_s}}{\left(\frac{M^2 R}{L_s^2} \right)^2 + \omega_0^2 \left(L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)^2}$	
c) Primer ve Sekonder Kalite Faktörleri		
Sekonderde Seri Kompanzasyon	$Q_p = \frac{L_p R}{\omega_0 M^2}$	$Q_s = \frac{\omega_0 L_s}{R}$
Sekonderde Paralel Kompanzasyon	$Q_p = \frac{\omega_0 L_p L_s^2}{M^2 R}$	$Q_s = \frac{R}{\omega_0 L_s}$

2.6 KET Sistemlerinde Kullanılan Sargı Yapıları

Kompanzasyon topolojilerinin yanı sıra KET sistemlerinin en önemli bileşenlerinden bir diğeri kullanılan sargı yapılarıdır. KET sargılarının temel olarak geniş bir hava aralığında yüksek kuplaj göstermesi ve yüksek hizalanma toleransına sahip olması beklenir. Aynı zamanda sistem verimliliği açısından sargıların yüksek kalite faktörüne sahip olması gerekmektedir. Kalite faktörü (Q), bir periyot içerisinde sargıda depolanan enerjinin, harcanan enerjiye oranı olarak tanımlanır ve boyutsuz bir büyüklüktür.

$$Q = 2\pi \frac{\text{Bir periyotta depolanan enerji}}{\text{Bir periyotta harcanan enerji}} \quad (1.42)$$

Kalite faktörü, indüktör ve kondansatörlerin sahip olduğu bir niteliktir ve her birinin enerji depolama yeteneği ile doğru orantılı; eşdeğer seri dirençleri ile ters orantılıdır. Bir sargının kalite faktörü (1.43) ile hesaplanır.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_{eş}} \quad (1.43)$$

Öz endüktans tur sayısının karesi, manyetik akı yolunun kesit alanı ve manyetik materyalin permeabilitesi ile doğru orantılı olup iletken uzunluğu ile ters orantılıdır ve (1.44)'deki şekilde ifade edilir [36].

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (1.44)$$

KET trafolarında, geleneksel trafoların aksine yüksek manyetik geçirgenliğe sahip ortak bir manyetik çekirdek bulunmamaktadır. Manyetik akı yolu, hava aralığı üzerinden tamamlanır ve bu nedenle kaçak akı oranı yüksektir. Kaçak akının azaltılması amacıyla manyetik geçirgenliği yüksek ferrit nüveler kullanılır. Ferrit nüveler, manyetik akıyı sekonder sargısına yönlendirmeye yardımcı olur ve böylece manyetik bağlaşımı artırır. Ferrit nüve kullanımı aynı zamanda sargının öz endüktansını dolayısıyla kalite faktörünü yükseltir. Öz endüktans, tur sayısının artırılması ile de artırılabilir. Ancak tur sayısının artması, iletken uzunluğunu artıracığı için eşdeğer direncin artmasına da yol açar. Ayrıca sargı hacminde meydana gelecek artış dolayısıyla maliyet de artacaktır. Yüksek kalite faktörü için, sargıların eşdeğer seri direnç değerinin olabildiğince düşük olması gerekmektedir. Deri ve yakınlık etkileri nedeniyle daha geniş kesit alanına sahip iletkenler kalite faktörünü artırmada yardımcı olmayabilir. Bunun yerine bu etkileri en aza indirecek şekilde litz teli kullanımı yaygındır.

Literatürde birçok sargı yapısı önerilmiştir. Dairesel sargılar en yaygın kullanılan sargı yapılarından [2]. Simetrik yapısı sayesinde tüm yönlerde yatay hizalanma toleransı eşittir. Dairesel sargının sarımları tek bir düzlem üzerinde olduğu için kaçak akı düşüktür. Ancak dairel sargıların güç transfer mesafesi, diğer bir deyişle temel akı yüksekliği, sargı boyutu ile sınırlıdır [37]. Dairesel sargılarda

temel akı yüksekliği, sargı çapının dörtte biri kadardır [4]. Yani uygulamaya bağlı olarak gerekli olacak hava aralığı mesafesinin dört katı kadar çapa sahip bir sargı tasarımı gerekmektedir.

Yüksek güçlü KET uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir diğer sargı yapısı ise iki adet D şeklindeki sargıdan oluşan DD sargı yapısıdır. DD sargılar, dairesel sargılara göre daha yüksek kuplaj katsayısına sahip olmaktadır. Ayrıca temel akı yüksekliği de sargı uzunluğunun yarısı kadardır [19]. Bu açıdan, dairesel sargılardan daha küçük hacimde benzer performans gösterebilmektedir. DD sargılar simetrik olmadığından, y-ekseni boyunca iyi hizalanma toleransı sergilerken x-ekseni boyunca hizalanma toleransı düşüktür. X-eksenindeki hizalanma toleransının artırılması amacıyla DD sargıya bir Q sargısı eklenir ve oluşturulan bu yeni yapı DDQ sargı olarak isimlendirilir [10]. Bu sayede hem yatay hem dikey ekseninde yüksek hizalanma toleransı elde edilebilir. Ancak DDQ sargılar, güç katı için ilave maliyet gerektirmektedir. Eğer DDQ sargısı primer sargısı olarak kullanılacak olursa, ilave bir rezonans evirici köprüsüne ihtiyaç duyulur. Eğer sekonder sargısı olarak kullanılacak olursa, ilave bir doğrultucu katına ihtiyaç vardır [22]. Bu durum sistem için ilave maliyet, hacim ve ağırlık getirmektedir.

3

KET SİSTEMİNİN TASARIMI

3.1 Dairesel Sargı Tasarımı

Bu çalışma kapsamında tasarlanacak KET sistemi için dairesele sargı yapısı tercih edilmiştir. Dairesel sargılar basit ve simetrik yapıları, düşük kaçak akıya sahip olması ve hizalanma durumunda gösterdikleri yüksek kuplaj nedeniyle bu gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Elektrikli araçların kablosuz şarjı için Otomotiv Mühendisleri Birliği tarafından SAE J2954 standardı yayınlanmıştır. Bu standart, hafif ticari elektrikli araçların kablosuz şarjı için güç seviyesi, çalışma frekansı, hava aralığı, hizalanma koşulları, elektromanyetik uyumluluk, test koşulları gibi çeşitli durumlar için parametreleri tanımlar. Standartta tanımlanan parametreler Tablo 3.1’de verilmiştir.

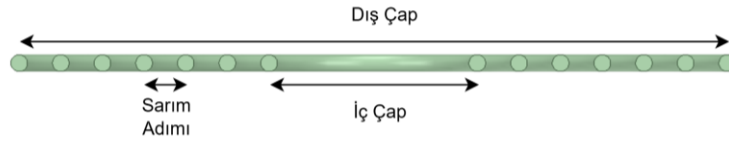
Tablo 3.1 Elektrikli araçların kablosuz şarjı için SAE J2954’te yer alan temel parametreler [38]

Parametre	KET 1	KET 2	KET 3
Giriş Gücü	3.7 kVA	7.7 kVA	11.1 kVA
Frekans	85 kHz nominal		
	79-90 kHz çalışma aralığı		
X-ekseninde hizalanma	± 75 mm		
Y-ekseninde hizalanma	± 100 mm		
Verici ve Alıcı Sargılar Arasındaki Hava Aralığı	Z1: 100 – 150 mm		
	Z2: 140 – 210 mm		
	Z3: 170 – 250 mm		
Verim (Hizalanma Durumu)	80%	82%	85%
Verim (Hizasızlık Durumu)	75%	77%	80%
Çıkış Gerilim Aralığı	280 - 420V		

Bu çalışma kapsamında SAE J2954 standardında yer alan parametreler referans alınarak KET sistemi tasarımı yapılmıştır. Sistemin rezonans frekansı, standartta

belirtildiği gibi 85 kHz olarak belirlenmiştir. Çıkış gücü ise 1.5 kW olarak belirlenmiştir. Bu parametrelere uygun dairesel sargı tasarımı yapılmış ve sargının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon için Ansys Maxwell 3D kullanılmıştır. Ansys Maxwell 3D, Sonlu Eleman Yöntemi (SEY) kullanarak çeşitli geometrilere sahip sargı yapıları için yüksek doğruluklu sonuçlar verebilmektedir.

Dairesel bir sargının kesiti Şekil 3.1’de verilmiş ve optimizasyon parametreleri olan iç çap, dış çap ve sarım adımı tanımlanmıştır.



Şekil 3.1 Dairesel sargının kesit görünümü

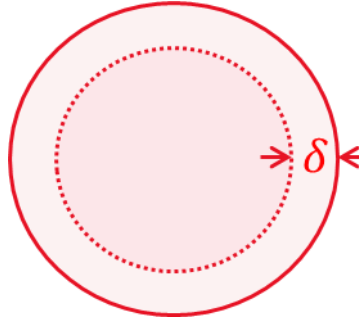
3.1.1 İletken Tipi ve Kablo Tasarımı

Yüksek frekanslı sistemlerde iletkenlerin DC direncinin yanı sıra AC direncinin de hesaba katılması gerekmektedir. Bunun nedeni, yüksek frekanslarda etkisi daha fazla hissedilen deri ve yakınlık etkileri nedeniyle, akım yoğunluğunun iletken kesitinde homojen bir şekilde dağılmamasıdır.

Deri etkisi, alternatif akım taşıyan bir iletkende oluşan manyetik alanın Lenz kanununa göre iletkende zıt yönde bir akım indüklemesi olarak tanımlanır [11]. Zıt yönde indüklenen bu akım girdap akımları olarak isimlendirilir. Deri etkisi nedeniyle, iletken merkezinden uzaklaştıkça akım yoğunluğu artar. Bu durum iletkenin efektif kesitinin azalması, diğer bir deyişle direncinin artması anlamına gelir. İletken kesitinde, akım yoğunluğunun %37’nin altına düşmeye başladığı nokta deri kalınlığı (δ) olarak isimlendirilir [39] ve (1.1) ile hesaplanır.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (1.1)$$

Yuvarlak bir iletken kesitinde deri kalınlığı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Yuvarlak bir iletken kesitinde deri kalınlığının gösterimi

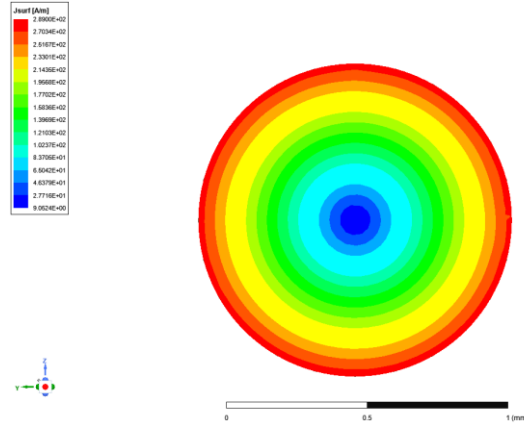
Deri kalınlığını etkileyen başlıca etken, iletken içerisindeki akımın frekansı ve iletkenin malzeme tipidir. Bakır iletkenin öz direnci alüminyum iletkenine kıyasla düşüktür ancak deri etkisi göz önünde bulundurulduğunda alüminyum iletken kullanımı özellikle yüksek frekans uygulamalarında üstünlük sağlamaktadır [26].

Deri etkisini elimine etmek, dolayısıyla iletkenin AC direncini azaltmak amacıyla Litz teli kullanılabilir. Litz telleri, birbirinden elektriksel olarak izole çok sayıda iletkenin birbiri etrafında örülmesi ile elde edilir.

Yüksek frekansta iletkenin AC direncini etkileyen bir diğer faktör yakınlık etkisidir. İletken içerisindeki alternatif akım, kendisine yakın diğer iletkenler üzerinde bir gerilim indükler. İndüklenen bu gerilim iletkende ilave bir akıma neden olur [11] ve bu etki yakınlık etkisi olarak isimlendirilir. Yakınlık etkisi, çalışma frekansı ve iletkenlerin birbirine olan mesafesi ile doğru orantılıdır. Transformatör tasarımında iletkenlerin yan yana ve/veya üst üste sarılması sonucu etkisini artıran yakınlık etkisi, tasarımda dikkat edilmesi gereken parametrelerden biridir. Litz telinde iletkenler bükümlü sarılarak yakınlık etkisi elimine edilebilir. Ancak iletkenlerin bükümlü sarılması iletkenin toplam uzunluğunu ve dolayısıyla DC direncini de artırır [40].

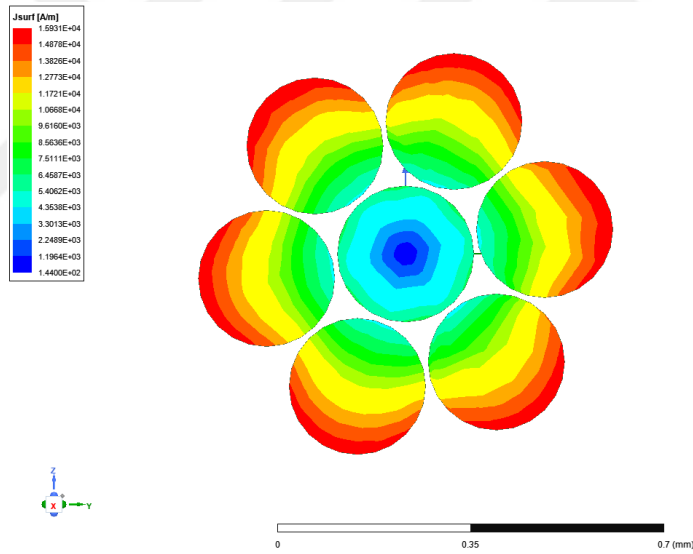
AC direncin hesaplanabilmesi için çeşitli yaklaşımlar literatürde yer almaktadır [41, 42, 43]. Bununla birlikte SEY ile yapılan analizler ile de AC direnç hesabı yapılabilmektedir.

Tek damarlı bir iletken kesitinde deri etkisi nedeniyle akım yoğunluğunun dağılımı Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Tek damarlı bakır iletkende deri etkisi nedeniyle akım yoğunluğunun dağılımı

Birden fazla damara sahip bir demet halindeki iletkende deri etkisinin yanı sıra yakınlık etkisi de akım yoğunluğunu etkiler. Bir demet iletken kesitinde deri ve yakınlık etkileri nedeniyle akım yoğunluğunun dağılımı Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4 Bir demet iletkende deri ve yakınlık etkileri nedeniyle akım yoğunluğunun dağılımı

Görüldüğü üzere iletken kesiti içerisinde akım yoğunluğu iletkenin dış çeperlerine doğru artmıştır ve dağılım homojen değildir. Bu etkileri en aza indirebilmek için deri kalınlığının iki katından daha küçük kesitli damarlara sahip litz teli kullanılmalıdır. 50 ila 100 kHz aralığında çalışma frekansı için 0.1007 mm (38 AWG) kesite sahip iletken kullanılması üreticiler tarafından önerilmektedir [5].

Ayrıca Ansys Maxwell 3D üzerinde yapılan simülasyon ile farklı damar çapına sahip litz tellerinde AC direncin DC dirence oranındaki değişim incelenmiştir. Karşılaştırmada litz telinin toplam efektif kesit alanını sabit tutmak amacıyla damar çapı azaldıkça damar sayısı artırılmıştır. Simülasyon sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Farklı damar çaplarına sahip litz tellerinde AC direncin DC dirence oranı

Damar sayısı	38	60	95	148	239	380	595	990
Damar çapı (AWG)	26	28	30	32	34	36	38	40
$R_{ac}@85kHz/R_{dc}$	5.15	2.44	1.88	1.56	1.35	1.14	1.09	1.05

Beklenildiği üzere damar çapı azaldıkça deri ve yakınlık etkileri azalmakta ve AC direnç DC dirence yaklaşmaktadır. Ancak damar çapı azaldıkça üretim zorluğunun artacağı ve maliyetin yükseleceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle 38 AWG kesite sahip iletken seçimi yapılmıştır.

3.1.2 İç Çap

Bir diğer sargı parametresi olan iç çapın çeşitli hava aralıklarında kuplaj katsayısına olan etkisi incelenmiştir. Tüm durumlarda sargının sarım adımı ve dış çapı sabit tutulmuştur. Dış çapın sabit tutulabilmesi amacıyla iç çap arttıkça tur sayısı azaltılmıştır. Sargı parametreleri Tablo 3.3’te verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre iç çapın artırılması ilk etapta kuplaj katsayısında küçük bir iyileşme sağlar. Ancak iç çap artırıldıkça kuplaj katsayısı düşmeye başlar. Örneğin 10 mm ve 60 mm iç çapa sahip sargılar karşılaştırıldığında kuplaj katsayısında %6’lık bir azalma yaşanmıştır. Bununla birlikte kullanılan bakır miktarında %55’e varan azalma sağlanmıştır. Bununla birlikte sargı endüktansında meydana gelen azalma da dikkate alınmalıdır.

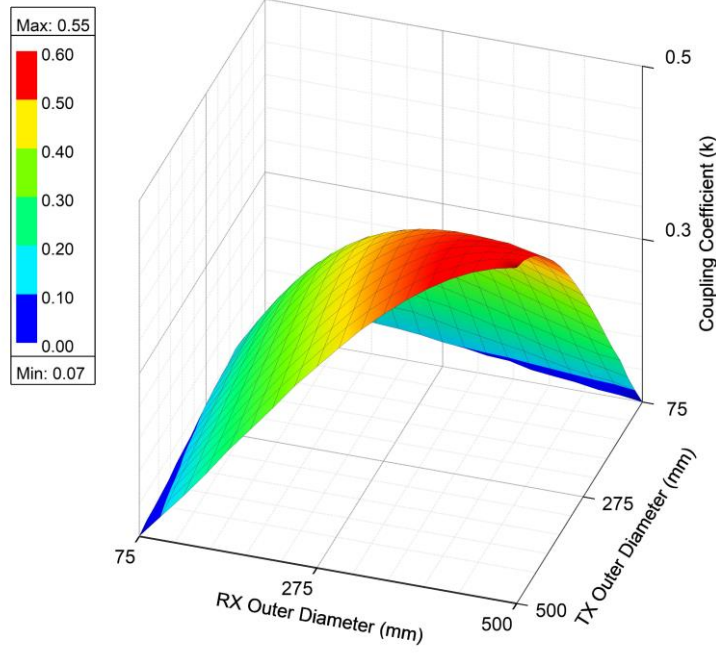
Tablo 3.3 İç çapa bağlı olarak kuplaj katsayısındaki değişim

Dış çap (mm)	100				
Sarım adımı (mm)	3				
İç çap (mm)	10	30	50	70	90
Tur sayısı	9	7	5	3	1
Sargı endüktansı (uH)	3.26	2.97	2.23	1.21	0.24
Kuplaj katsayısı (k) (30mm hava aralığı)	0.205	0.207	0.202	0.18	0.126
Bakır miktarı (mm ³)	4544	4160.1	3422.4	2330.5	884.3

3.1.3 Dış Çap

KET sargısının dış çapı, sistemin yatay düzlemde kaplayacağı minimum alanı belirler. Ayrıca elektrikli araç üzerinde yer alacak sekonder sargısının boyutları, araç tarafından sınırlandırılmıştır. KET sistemlerinde temel tasarım hedeflerinden biri, sistem gereksinimlerini olabildiğince küçük boyut ve ağırlıkla karşılamaktır.

İç çapın ve sarım adımı sabit tutularak dış çapın artırılması, tur sayısının artmasıyla mümkündür ve bu durumda kullanılan bakır miktarı da artış gösterir. Daha geniş dış çapa sahip sargılar daha geniş bir şarj alanı da sunar.



Şekil 3.5 Primer (TX) ve sekonder (RX) sargı dış çapları ile kuplaj katsayısının değişimi

Şekil 3.5'te primer ve sekonder sargılarının dış çapları 75 mm'den 500 mm'ye kadar değiştirilmiş ve sargılar arasındaki kuplaj katsayısı incelenmiştir. Elde edilen sonuca göre her iki sargının dış çapı ne kadar büyükse aralarındaki kuplaj katsayısı o kadar yüksek olmaktadır.

3.1.4 Sarım Adımı

Sarım adımı, sargının her bir turu arasındaki mesafeyi ifade eder. Sarımlar arası mesafenin sargı performansına etkisini analiz edebilmek amacıyla farklı sarım adımlarına sahip sargılar analiz edilmiştir. Tüm durumlarda sargının dış ve iç çapı sabit tutulmuştur. Sarım adımı azaldıkça tur sayısı artırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre iç ve dış çaplar sabit tutulduğunda sarım adımının artması, kuplaj katsayısında sınırlı bir azalmaya neden olur. Diğer yandan, yüksek sarım adımına sahip sargılar düşük öz endüktansa sahiptir. Bu nedenle sargı alanını verimli bir şekilde kullanabilmek için sarımlar arası mesafenin yüksek tutulmaması gerekmektedir. Ayrıca yakınlık etkisi nedeniyle sarım adımı azaldıkça AC dirençte bir artış meydana geleceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 3.4 Farklı sarım adımlarında kuplaj katsayısının değışimi

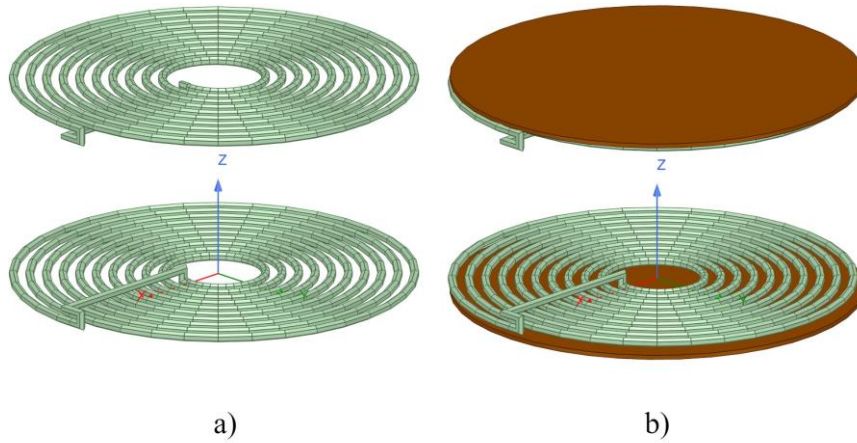
Dış çap (mm)	100			
İç çap (mm)	20			
Sarım adımı (mm)	6.00	3.71	2.44	1.64
Tur sayısı	5	7	9	11
Öz endüktans (uH)	1.01	1.79	2.83	4.12
Kuplaj katsayısı (k) (30mm hava aralığı)	0.1885	0.2018	0.2090	0.2124
Bakır miktarı (m ³)	2802.4	3864.84	4927.2	5990.6

3.1.5 Ferrit Nüve

Ferrit nüveler, özellikle yüksek güçlü KET uygulamalarında, sargıların öz endüktansını ve sargılar arası kuplaj katsayısını artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Ferritler yüksek manyetik geçirgenliğe sahiptir ve manyetik akıyı yönlendirir, kaçak akıları azaltır. Bu sayede sistem performansını olumlu etkiler.

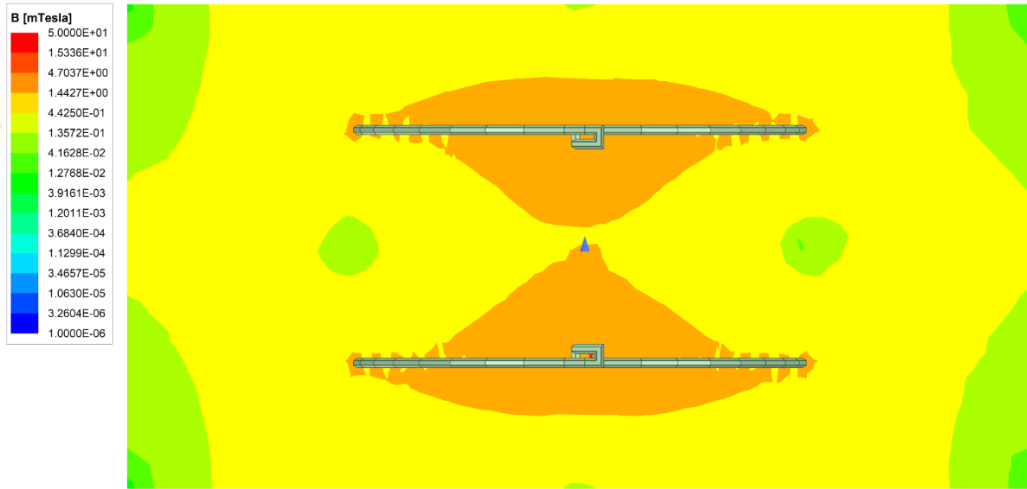
Ferrit nüveler KET sistemlerinde önemli bir maliyet oluşturur. Bu nedenle nüve seçimi, adedi ve yerleşimi önem arz eder.

KET sistemlerinde ferrit nüveler genellikle sargının tabanına yerleştirilir. Nüvesiz ve nüveye sahip dairesel sargılar Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

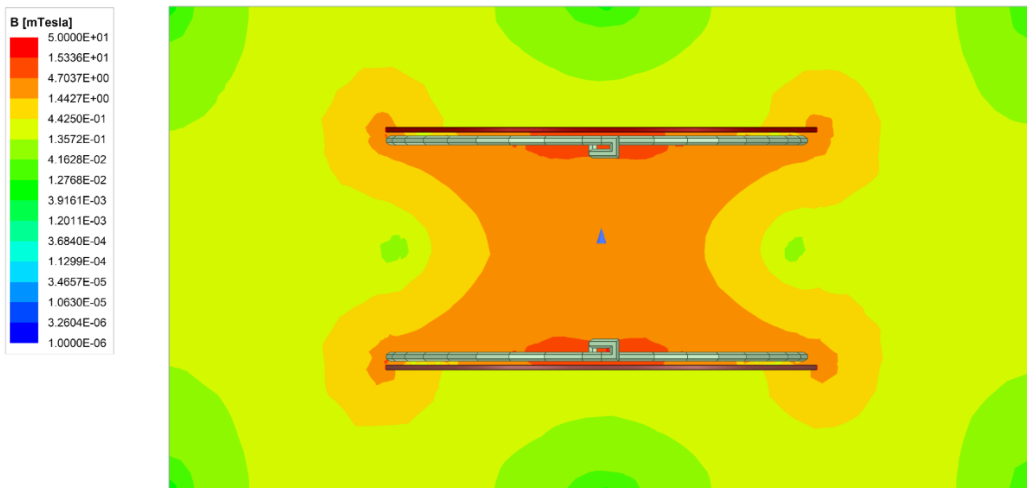
**Şekil 3.6** Dairesel KET sargıları a) nüvesiz, b) ferrit nüveli

Nüvesiz ve ferrit nüveli KET sargılarının manyetik akı dağılımı sırasıyla Şekil 3.7a ve Şekil 3.7b’de verilmiştir. Görüldüğü üzere sargıların arka taraflarında meydana gelen kaçak akılar azalmış, sargıların hava aralığında manyetik akı yoğunluğu artmıştır. Bu durum, ferrit nüvelerin sargılar arasındaki kuplajı artırdığını göstermektedir.

Kullanılan ferrit nüvelerin kalınlığının nüve kaybına ve kuplaj katsayısına etkisi analiz edilmiş ve sonuçlar sırasıyla Şekil 3.8a ve b’de verilmiştir.



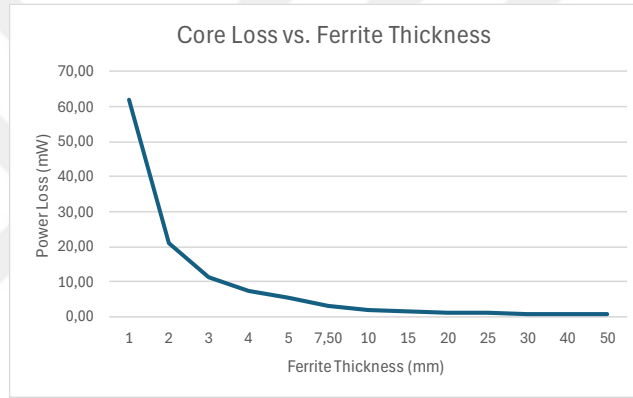
a)



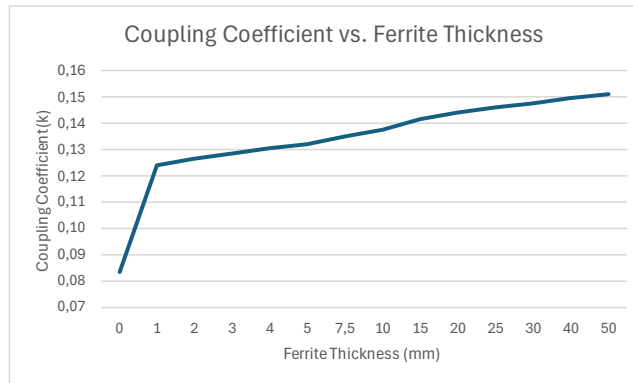
b)

Şekil 3.7 Dairesel KET sargılarının manyetik akı dağılımı a) nüvesiz sargı, b) ferrit nüveli sargı

Ferrit kalınlığının artırılması, belirli bir noktadan sonra kuplaj katsayısında büyük bir artışa neden olmamıştır. Ancak nüve hacmi azaldıkça nüvenin manyetik yoğunluğu artacaktır. Bu da nüvenin doyuma gitmesine neden olabilir. Ayrıca akı yoğunluğu arttıkça nüve kayıpları da artar. Bu nedenle ferrit nüve hacmi, manyetik akı yoğunluğunu güvenli bir seviyede tutacak şekilde belirlenmelidir. Şekil 3.7a’da görüldüğü üzere nüve kalınlığı arttıkça kayıplar da azalmaktadır. Ancak belirli bir noktadan sonra kayıplar neredeyse sabit kalmaktadır. Şekil 3.7b’deki eğriye göre ferrit nüve kullanımı, nüve olmadığı duruma göre kuplaj katsayısı açısından büyük bir fark yaratmıştır. Ancak belirli bir noktadan sonra kuplaj katsayısındaki artış minimaldir. Örneğin nüve kalınlığı 5 mm’den 15 mm’ye çıkarıldığında kuplaj katsayısındaki artış %15 kadar olmuştur.



a)

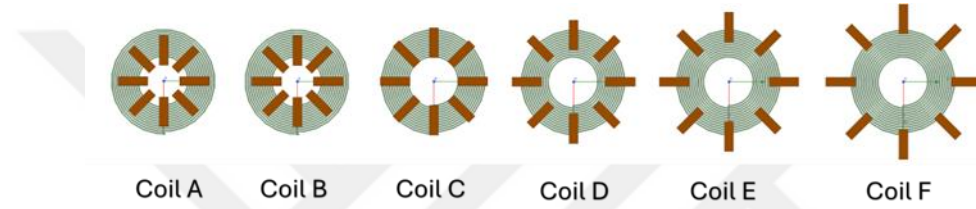


b)

Şekil 3.8 Ferrit nüvelerin kalınlığına bağlı olarak a) nüve kaybı, b) kuplaj katsayısı

Analizde verildiği gibi istenilen ölçüde yekpare bir ferrit nüve piyasada bulunmamaktadır. Bunun yerine üreticilerin standart olarak üretmiş olduğu nüveler şekilleri ve boyutları kullanılmalıdır. Statik elektrikli araç şarj sistemlerinde dairesel sargılar için standart nüve şekilleri arasından I şeklinde blok nüveler en uygun olan nüvelerdir. Bu nüveler çeşitli şekillerde yerleştirilebilir ve tasarımcıya esneklik sunar.

Kullanılacak ferrit nüvelerin optimum yerleşimini belirlemek amacıyla özdeş sargıların tabanına eşit sayıda nüveler çeşitli şekillerde yerleştirilmiştir. Nüvelerin yerleşimi merkezden dışarıya doğru olacak şekilde değiştirilmiştir. Nüvelerin yerleşimi Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 Özdeş sargılar üzerine çeşitli şekillerde yerleştirilmiş nüveler

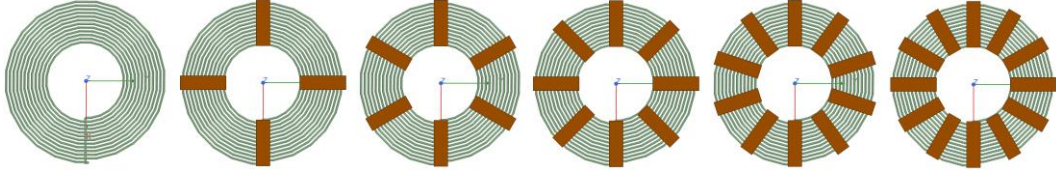
Yapılan simülsyonda primer ve sekonder sargıları özdeşdir ve kuplaj katsayısı incelenmiştir. Simülasyon sonuçları Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5 Nüve yerleşimine bağlı olarak kuplaj katsayısının değişimi

Sargılar	A	B	C	D	E	F
Kuplaj katsayısı (k)	0.1475	0.1501	0.1515	0.1508	0.1455	0.1370

Elde edilen sonuçlara göre, nüvelerin sargının sarımları üzerine yerleştirildiği durumda kuplaj katsayısının en yüksek değeri elde edilmektedir.

Diğer taraftan, sargının sarımları üzerine yerleştirilen farklı adetteki nüveler ile analiz yapılmış ve kuplaj katsayısındaki değişim incelenmiştir. Farklı adetteki nüvelerin yerleşimi Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10 Farklı sayıdaki nüvelerin yerleşimi

Nüve sayısına bağlı olarak sargıların öz endüktansındaki ve sargılar arasındaki kuplaj katsayısındaki değişim Tablo 3.6’da verilmiştir.

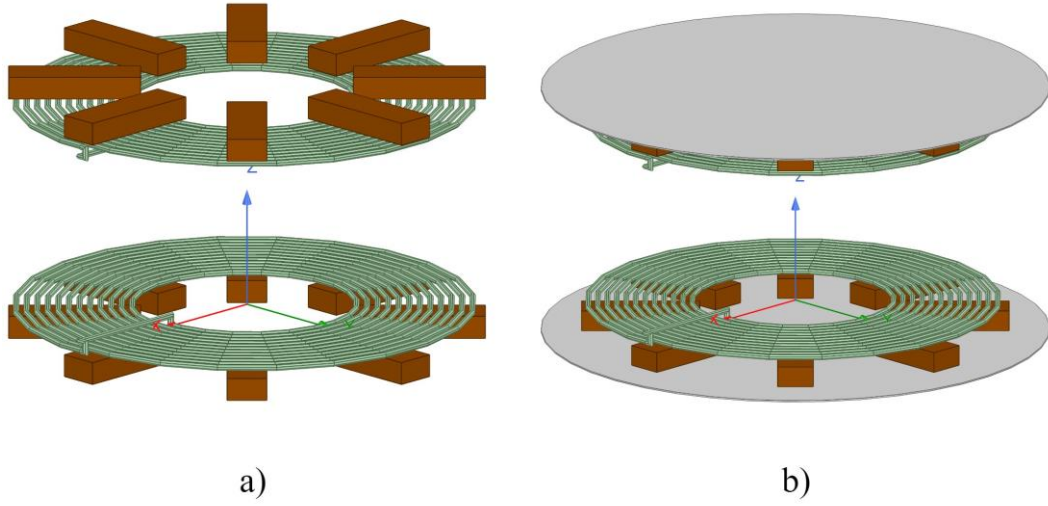
Tablo 3.6 Nüve adedine bağlı olarak kuplaj katsayısındaki ve öz endüktanstaki değişim

Nüve adedi	0	4	6	8	10	12
Kuplaj katsayısı (k)	0.126	0.142	0.147	0.152	0.155	0.158
Öz endüktans (uH)	39.6	48.57	52.13	55.06	57.32	59

Elde edilen sonuçlara göre nüve sayısı arttıkça kuplaj katsayısı ve öz endüktans değeri artmaktadır. Ancak nüvelerin sistem maliyetinde önemli bir pay sahibi olduğu unutulmamalıdır. Aynı zamanda sistemin ağırlığı da nüve sayısına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. Bu nedenle arzu edilen performansa ulaşabilmek için kullanılacak nüve sayısı optimize edilmelidir.

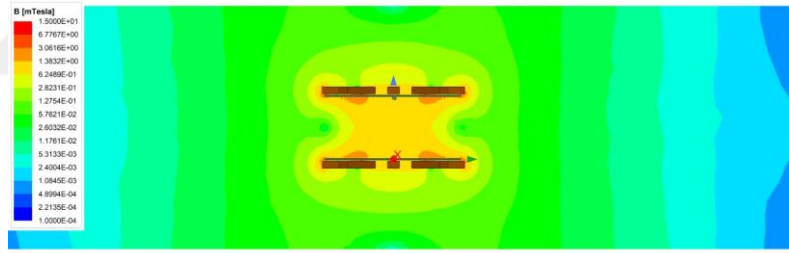
3.1.6 Alüminyum Ekranlama

KET sargılarında, kaçak akı nispeten yüksektir. Kaçak akılar, sistem performansını azaltmasının yanı sıra insan sağlığı üzerinde de olumsuz etkiye sahiptir. Ayrıca şarj alanında bulunan yabancı metal materyaller üzerinde girdap akımları oluşturarak ısınmaya yol açabilirler. Bu nedenle, enerji transferi doğrultusunda iletilmeyen akıların ekranlanması gerekmektedir. Bu amaçla, KET sargılarının tabanına alüminyum plakalar yerleştirilir. Alüminyum plakaların da girdap akımları nedeniyle ilave kayıplara neden olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Ekranlama yapılmamış ve yapılmış sargılar sırasıyla Şekil 3.11a ve Şekil 3.11b’de verilmiştir.

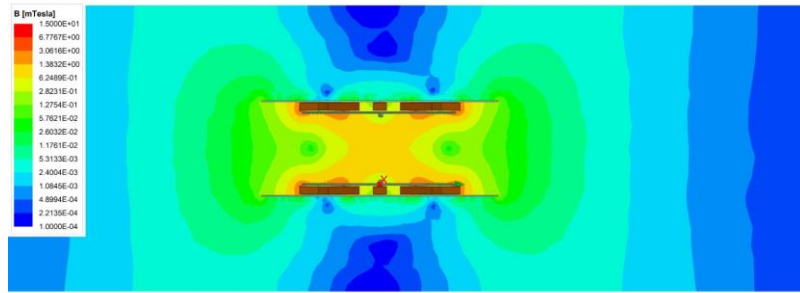


Şekil 3.11 a) Alüminyum ekranlama kullanılmamış sargı, b) ekranlama kullanılmış sargı

Şekil 3.11’de yer alan sargıların manyetik akı yoğunluğu analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 3.12’de verilmiştir. Elde edilen sonuca göre, ekranlama sayesinde enerji aktarımı doğrultusunda olmayan alanlarda manyetik akı yoğunluğu azalmıştır.



a)



b)

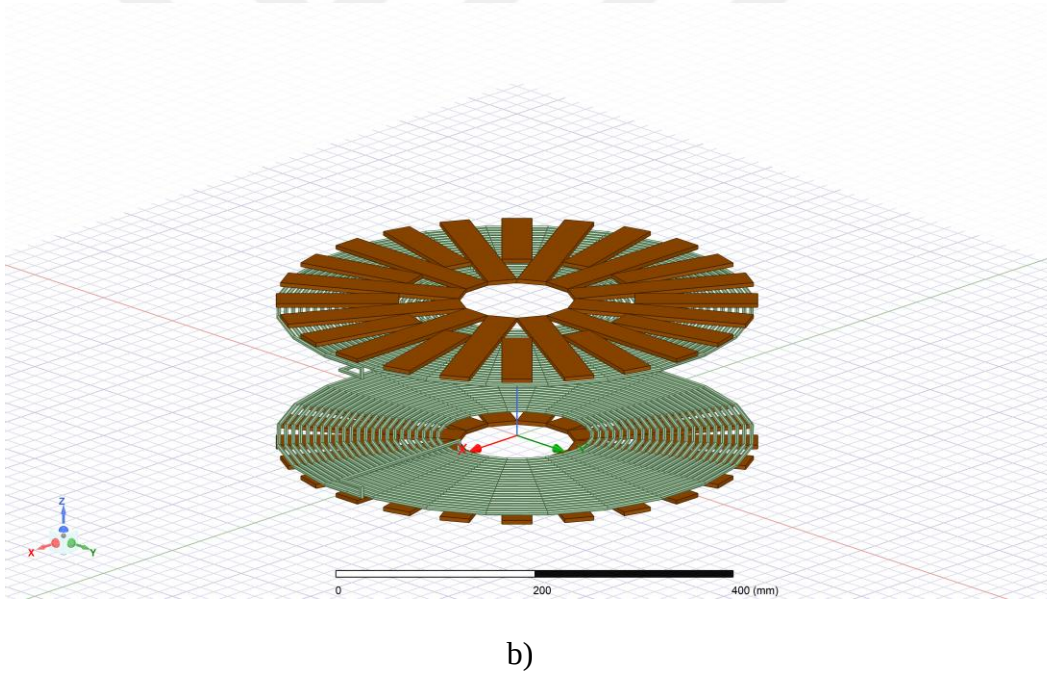
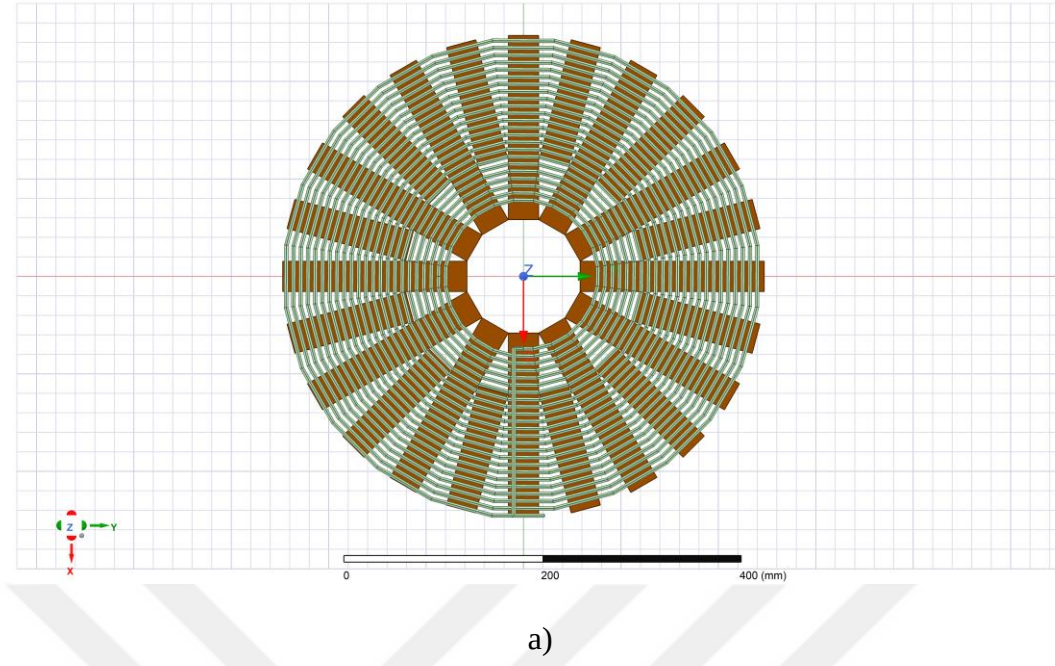
Şekil 3.12 Manyetik akı dağılımı a) ekranlama yapılmamış sargı, b) ekranlama yapılmış sargı

3.1.7 Sargı Tasarımının Simülasyonu

Elektrikli araçların kablosuz şarjı için tasarlanan KET sistemlerinde yüksek yatay hizalama ve geniş hava aralıklarında yüksek kuplaj performansı beklenir. Bununla birlikte çeşitli hizalanma durumlarında kuplaj katsayısındaki değişimin minimum olması arzu edilir. Seri-seri kompanzasyon topolojisinde kaynak tarafından görülen empedans, ortak endüktansın karesiyle ter orantılıdır. Bu nedenle, kaynaktan çekilen akımın, kuplaj katsayısının karesine bağlı olduğu söylenebilir. Dolayısıyla düşük kuplaj durumlarında kaynaktan çekilen akım çok yüksek değerlere ulaşabilir ve sistem güvenliğini riske atabilir. Ayrıca bu durum sistem maliyetini ve boyutunu da olumsuz etkiler. Bu nedenle tasarlanacak sargıların en kötü kuplaj durumu göz önünde bulundurularak tasarım yapılmalıdır. SAE J2954 standardındaki parametreler ışığında, en kötü koşul x-ekseninde 75mm ve y-ekseninde 100mm hizasızlık durumu ve sargılar arasında 210 mm hava aralığı olduğu durumdur. Bu koşul altında sargılar arasındaki kuplaj minimum değerini alacaktır.

Önceki bölümlerde yer alan dairesel sargı parametreleri ve optimizasyonu için yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre tasarlanan dairesel sargı Şekil 3.13'te verilmiştir.

Tasarlanan sargılar, 140 mm, 175 mm ve 210 mm hava aralıklarında, x ve y eksenlerinde çeşitli hizasızlık durumlarında analiz edilmiş ve kuplaj katsayısının değişimi incelenmiştir. Sonuçlar Tablo 3.7'de verilmiştir.

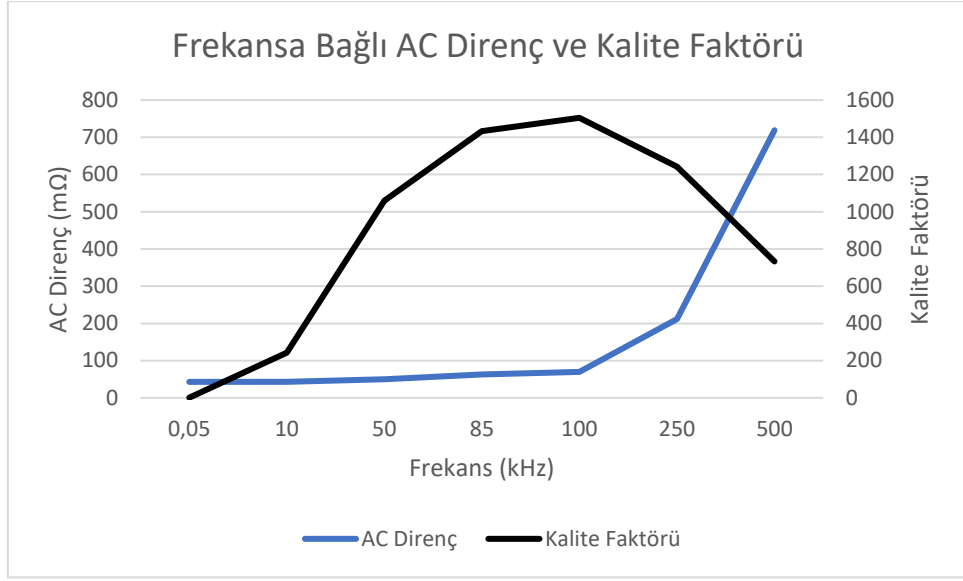


Şekil 3.13 Tasarlanan dairesel sargılar a) üstten görünüm, b) yandan görünüm

Tablo 3.7 Nüvesiz sargıların farklı hizalanma koşullarındaki kuplaj katsayılarının ölçümü

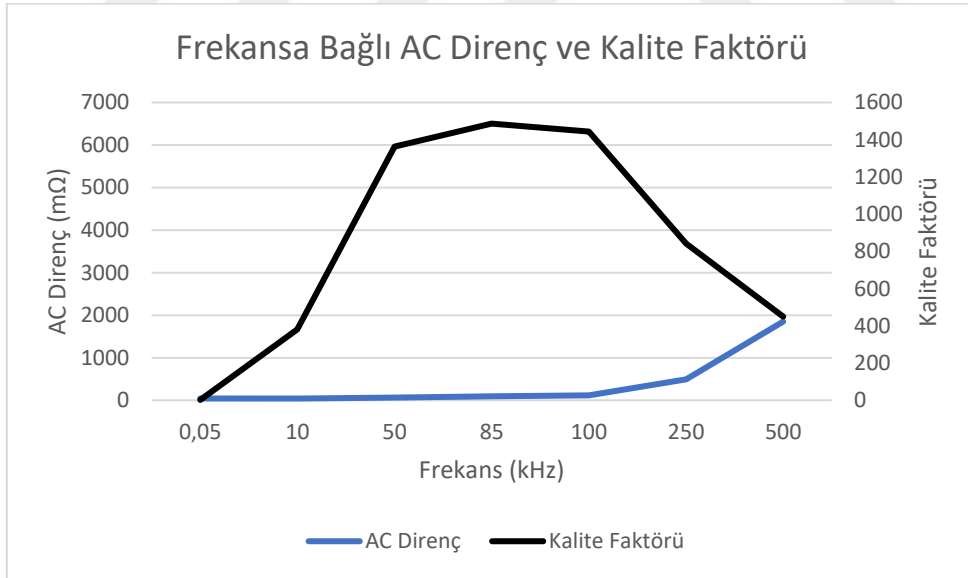
Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)	Ortak Endüktans (μH)	Kuplaj Katsayısı (k)
0	0	140	44.53	0.265
0	0	175	33.54	0.2
0	0	210	25.82	0.154
0	100	140	36.19	0.215
0	100	175	27.96	0.166
0	100	210	21.85	0.130
75	0	140	39.66	0.236
75	0	175	30.36	0.181
75	0	210	23.53	0.14
75	100	140	32.06	0.191
75	100	170	25.07	0.149
75	100	210	19.83	0.118

Tasarlanan sargının farklı frekanslar altında AC direnç değeri ve kalite faktörü incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14 Nüvesiz sargının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi

Sargının AC direncinin frekansın artışı ile birlikte hızlı yükseldiği görülmektedir. Bu yükseliş nedeniyle sargının kalite faktöründe de 100 kHz'den sonra düşüş görülmüştür. Sargının maksimum kalite faktörü, sargının optimize edildiği 85 kHz bölgesinde elde edilmiştir.



Şekil 3.15 Nüve eklenmiş sargının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi

Sargının AC direncinin frekansın artışı ile birlikte hızlı yükseldiği görülmektedir. Bu yükseliş nedeniyle sargının kalite faktöründe de 85 kHz'den sonra düşüş

görülmüştür. Sargının maksimum kalite faktörü, sargının optimize edildiği 85 kHz bölgesinde elde edilmiştir.

Tablo 3.8 Nüveli sargıların farklı hizalanma koşullarındaki kuplaj katsayılarının ölçümü

Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)	Ortak Endüktans (μH)	Kuplaj Katsayısı (k)
0	0	140	92.57	0.349
0	0	175	68.21	0.257
0	0	210	50.82	0.191
0	100	140	71.73	0.27
0	100	175	54.11	0.204
0	100	210	41.24	0.155
75	0	140	80.32	0.303
75	0	175	59.93	0.226
75	0	210	45.24	0.17
75	100	140	61.4	0.231
75	100	170	47.1	0.177
75	100	210	36.43	0.137

Tablo 3.8’de elde edilen sonuçlara göre en düşük kuplaj katsayısı, x-ekseninde 75 mm, y-ekseninde 100 mm ve hava aralığının 210 mm olduğu durumda gerçekleşmiştir. En yüksek kuplaj katsayısı ise x ve y eksenlerinde kayma olmadığı ve hava aralığının 140mm olduğu durumda gerçekleşmiştir. Kuplaj katsayısının en düşük değeri 0.137 ve en yüksek değeri 0.349 olarak elde edilmiştir.

Tasarlanan sargıların parametreleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9 Tasarlanan sargı parametreleri

Dış çap (Tx, Rx)	485mm
İç çap (Tx, Rx)	150mm
Hava aralığı	140 - 210mm
Tur sayısı (Tx, Rx)	23
Sarım adımı (Tx, Rx)	3.5mm
Litz teli	1200 x 38AWG
Öz endüktans (Tx, Rx)	265uH
AC direnç (@85kHz)	95.21 mΩ
Kuplaj katsayısı (k)	0.137 – 0.349
Ferrit nüve sayısı	60
Ferrit nüve boyutları	62x31x4 mm

3.2 Güç Devresinin Tasarımı

Sargı simülasyonlarında primer ve sekonder sargı öz endüktans değerleri 250 μ H olarak elde edildi. Primer ve sekonderde yapılacak seri kompanzasyon için kullanılacak kapasite değerleri, sırasıyla (1.21) ve (1.24) eşitlikleri yardımıyla her ikisi için de yaklaşık 14 nF olarak hesaplanmıştır.

Sistemin giriş ve çıkış gerilimleri birbirine eşit olup 400V olarak belirlenmiştir. Primer sargısı tam-köprü silikon mosfetler ile sürülmüştür ve mosfet dayanma gerilimi 650V olarak seçilmiştir. Sekonderde doğrultucu için tam köprü diyot kullanılmıştır ve diyotların gerilim dayanımı 650V olarak seçilmiştir. Bu diyotlar anahtarlama frekansı olan 85 kHz’de doğrultma işlemi yapacağı için yüksek hızlı seçilmeleri önem göstermektedir.

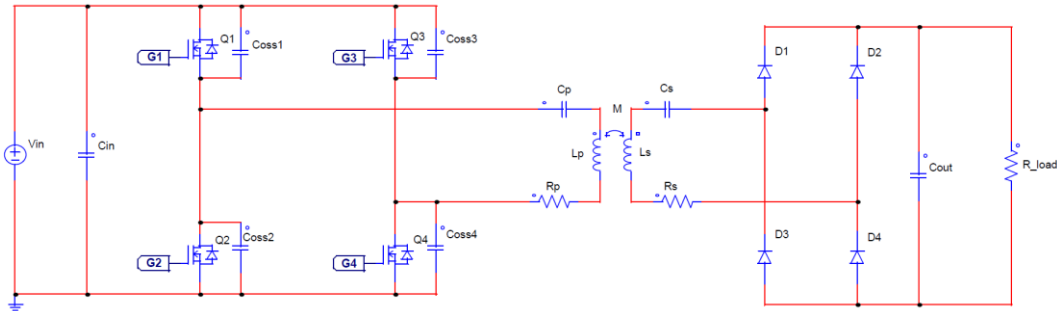
Çıkış filtre kapasitörü için 5x10 uF film kapasitör kullanılmıştır.

Ancak, MOSFET ve diyot içeren bir sistem için ZCS, en iyi yumuşak anahtarlama durumu değildir [45]. Çünkü sıfır akım altında ilettime giren anahtarın çıkış kapasitansında (C_{oss}) depolanan enerji harcanmış olacaktır [44]. Çıkış kapasitansı görece yüksek olan MOSFET'ler için, buradaki enerjinin kayba dönüşmemesi daha önemlidir. ZCS, kesime girme esnasında kuyruk akımına sahip olan IGBT anahtarları için daha önemlidir.

ZVS ile, MOSFET'in çıkış kapasitansında depolanan enerji kayba dönüştürülmez. Bunun yanı sıra ZVS ile MOSFET'in parazitik diyotunda ters toparlanması da önlenmiş olur [45].

3.3 Seri-Seri Topolojinin Simülasyonu

Tasarlanan sargıların sistem performansını elde edebilmek amacıyla seri-seri kompanzasyon topolojisi ile PSIM programında simülasyon yapılmıştır. PSIM simülasyonunda Ansys Maxwell 3D'de elde edilen sargı parametreleri kullanılmıştır. Devre şeması Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16 KET sisteminin PSIM simülasyonu

3.3.1 Çalışma Koşulları

Tasarlanan KET sisteminin performansı için dört farklı çalışma koşulu belirlenmiştir. Bu koşulların üçünde, sargılar yatay olarak eş merkezli olup 140 mm, 175 mm ve 210mm olarak değişen üç farklı hava aralığında konumlandırılmıştır. Dördüncü koşul ise sargıların yatay hizasızlığının ve hava aralığının en yüksek olduğu koşuldur. Bu hizalanma koşullarını güç devresinde modellemek amacıyla Ansys Maxwell 3D simülasyonlarında elde edilen kuplaj katsayıları kullanılmıştır.

Tablo 3.10 Güç transferi hizalanma koşulları

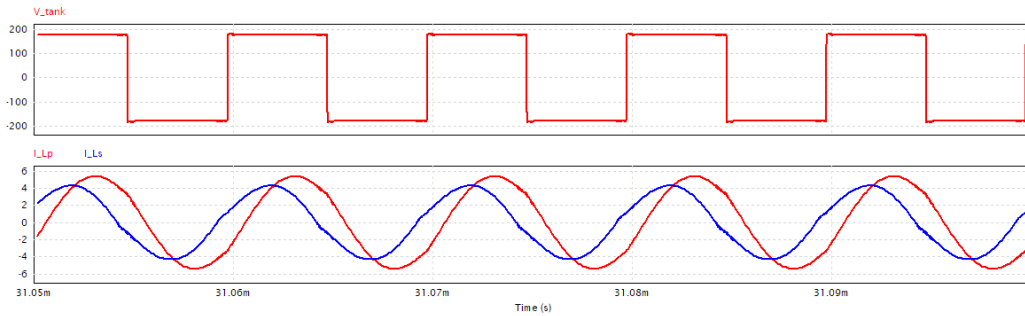
Çalışma No	$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ (mm)
#1	0, 0, 140
#2	0, 0, 175
#3	0, 0, 210
#4	75, 100, 210

3.3.2 Çalışma No #1

Bu koşulda sargıların yatay olarak eş merkezli olduğu ve sargılar arası mesafenin 140 mm olduğu durumda elde edilen kuplaj katsayısı kullanılarak simülasyon yapılmıştır.

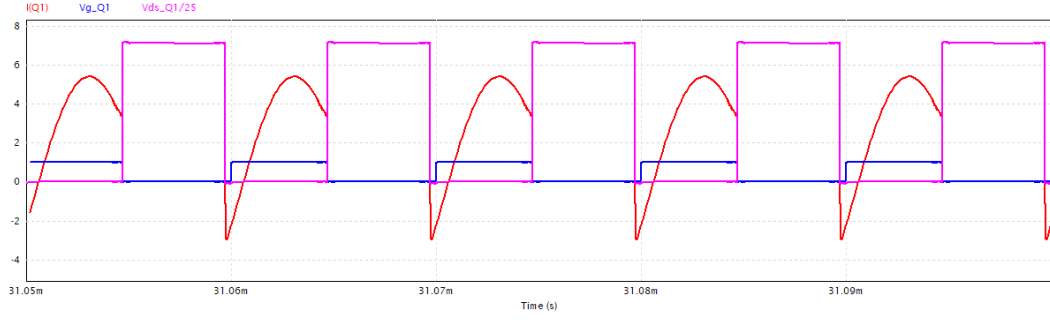
3.3.2.1 500W Çalışma

Şekil 3.17’de, primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



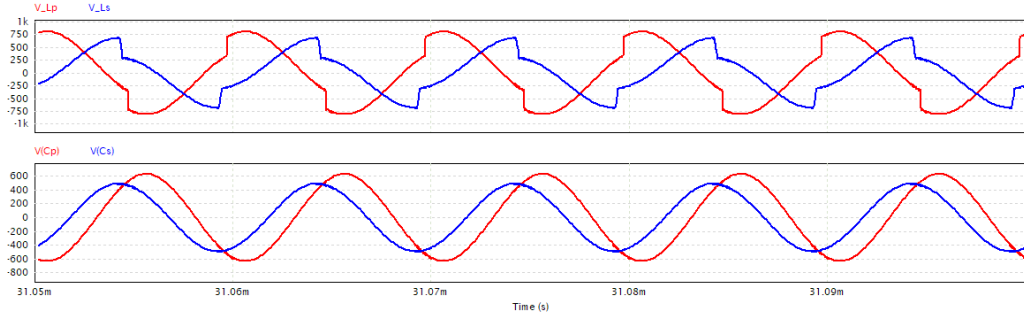
Şekil 3.17 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.18’de, primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde ilettime girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



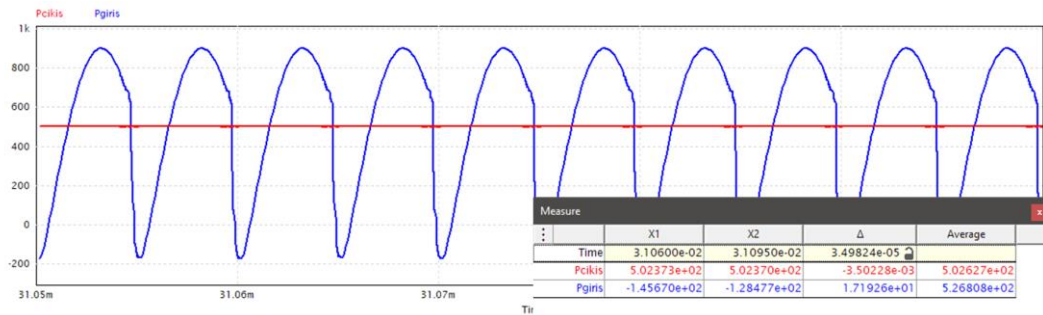
Şekil 3.18 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.19’da sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.19 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

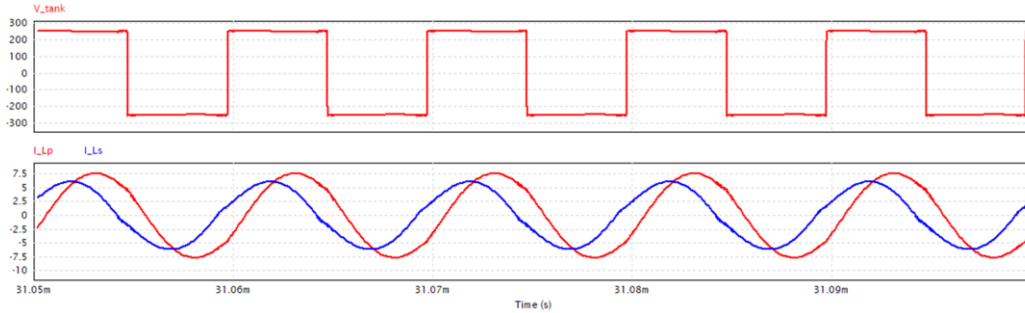
Şekil 3.20’de giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 500W çıkış gücünde %95.4 verim elde edilmiştir.



Şekil 3.20 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

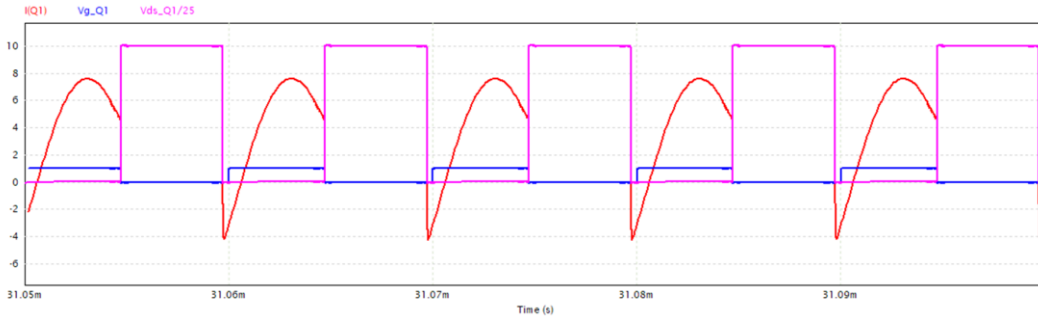
3.3.2.2 1000W Çalışma

Şekil 3.18’de, primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



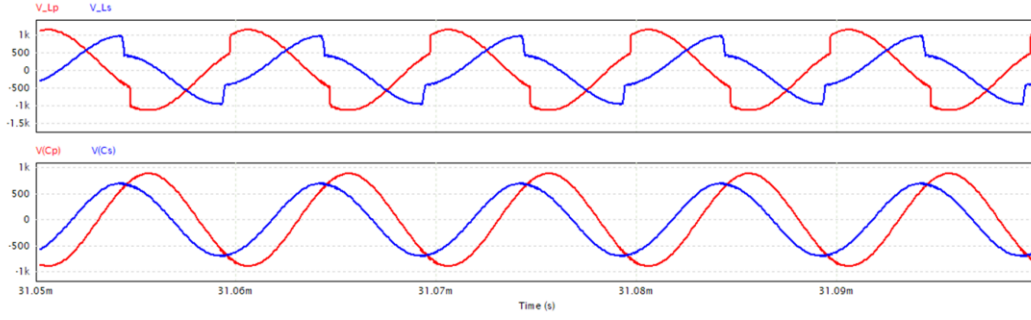
Şekil 3.21 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.22’de, primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



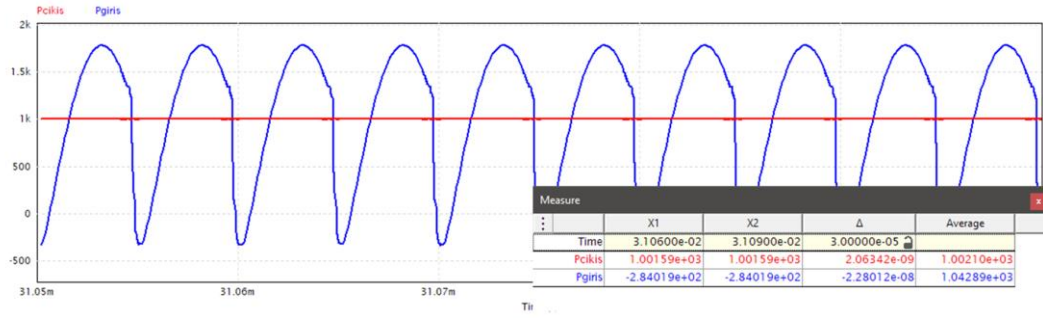
Şekil 3.22 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.23’te sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.23 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

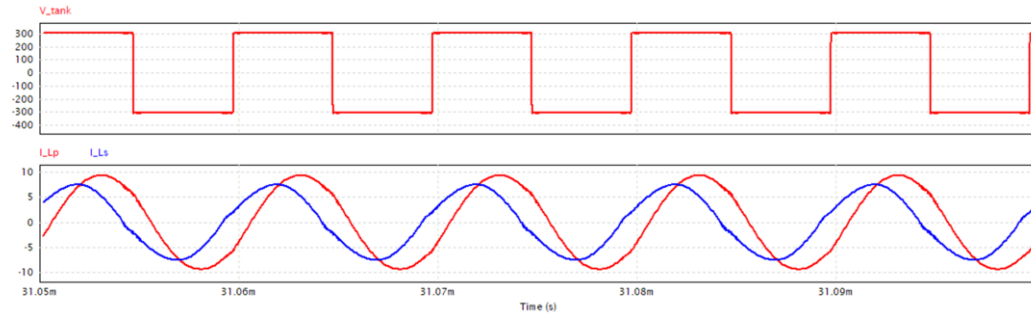
Şekil 3.24'te giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 1000W çıkış gücünde %96 verim elde edilmiştir.



Şekil 3.24 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

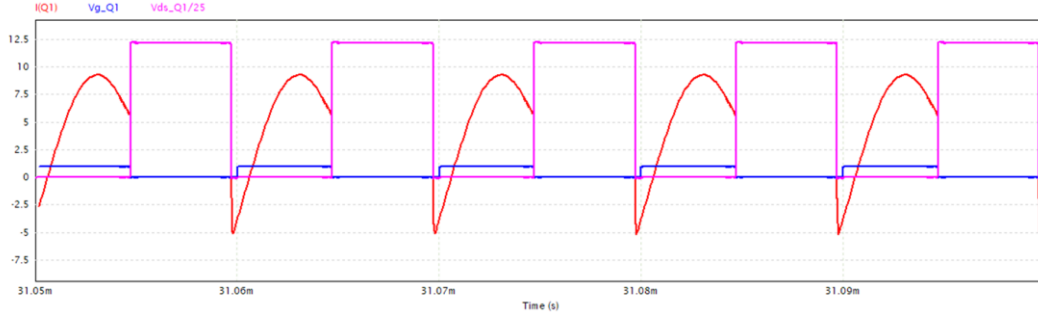
3.3.2.3 1500W Çalışma

Şekil 3.25'te primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



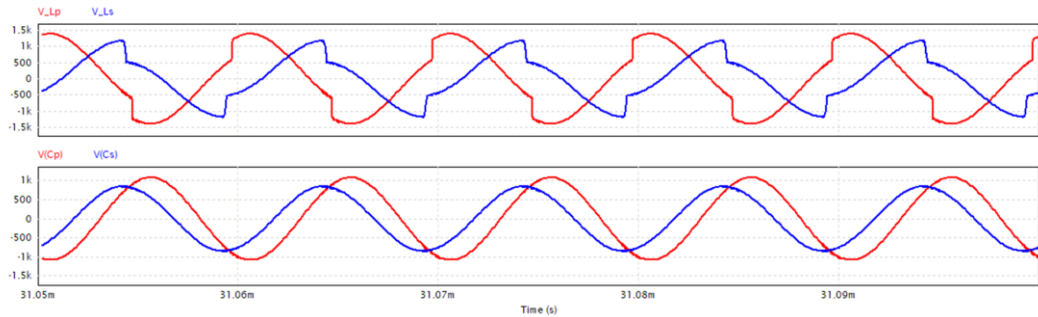
Şekil 3.25 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.26’da primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



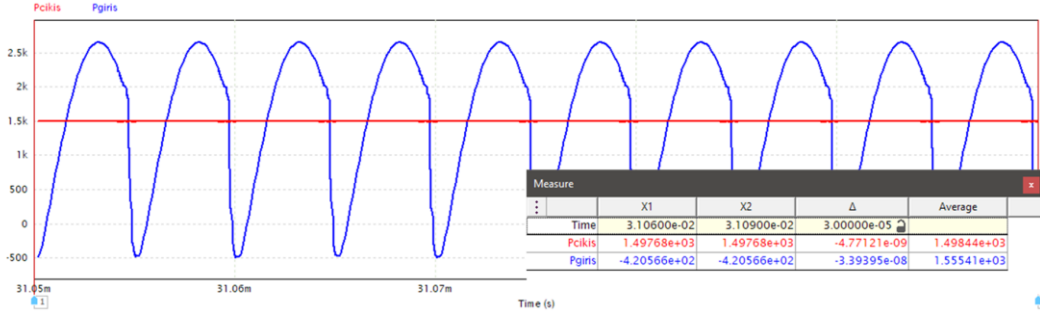
Şekil 3.26 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.27’de sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.27 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

Şekil 3.28’de giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 1500W çıkış gücünde %96.3 verim elde edilmiştir.



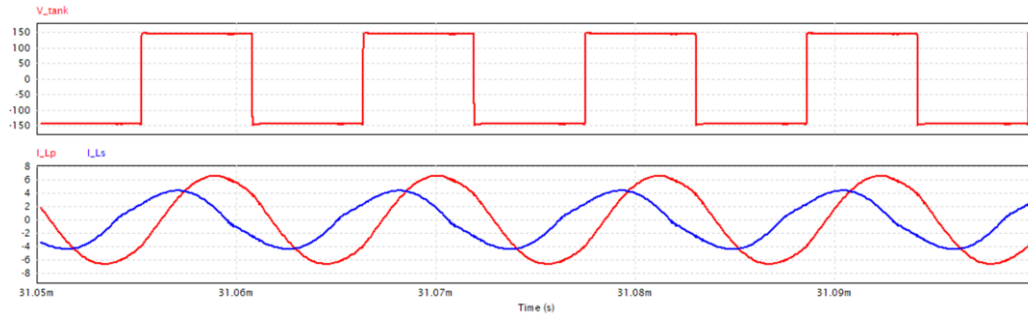
Şekil 3.28 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

3.3.3 Çalışma No #2

Bu koşulda sargıların yatay olarak eş merkezli olduğu ve sargılar arası mesafenin 175 mm olduğu durumda elde edilen kuplaj katsayısı kullanılarak simülasyon yapılmıştır.

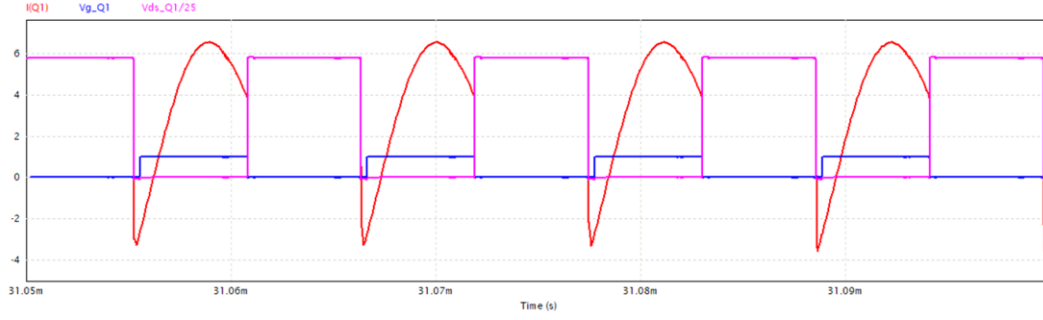
3.3.3.1 500W Çalışma

Şekil 3.29’da primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



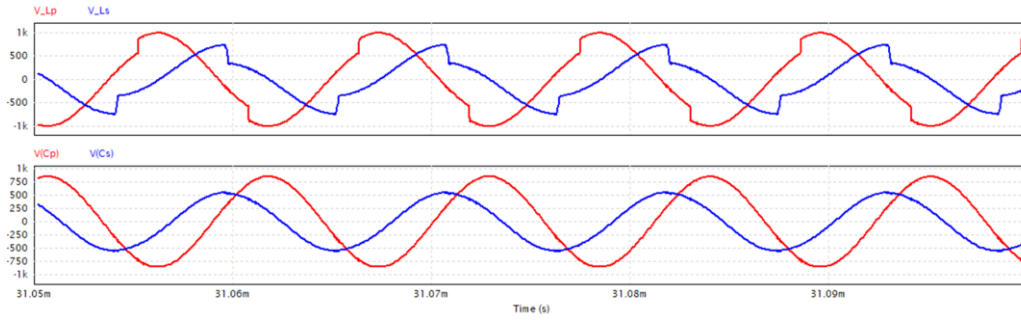
Şekil 3.29 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.30’da primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



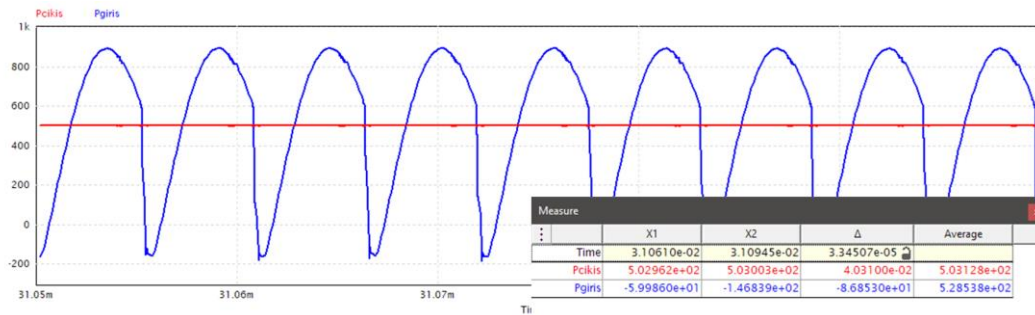
Şekil 3.30 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.31’de sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.31 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

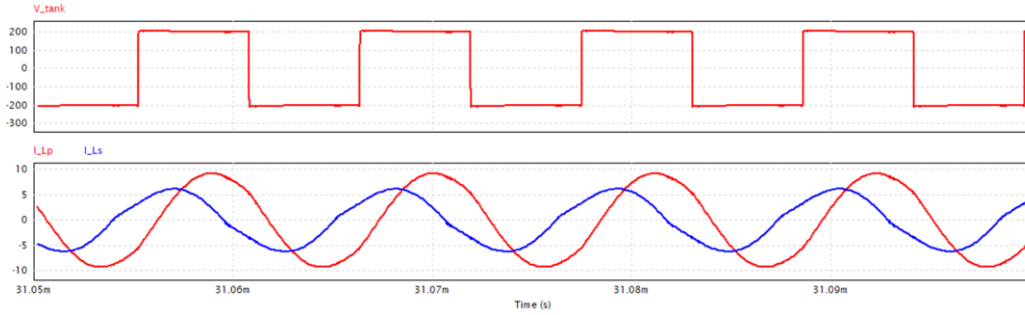
Şekil 3.32’de giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 500W çıkış gücünde %95.2 verim elde edilmiştir.



Şekil 3.32 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

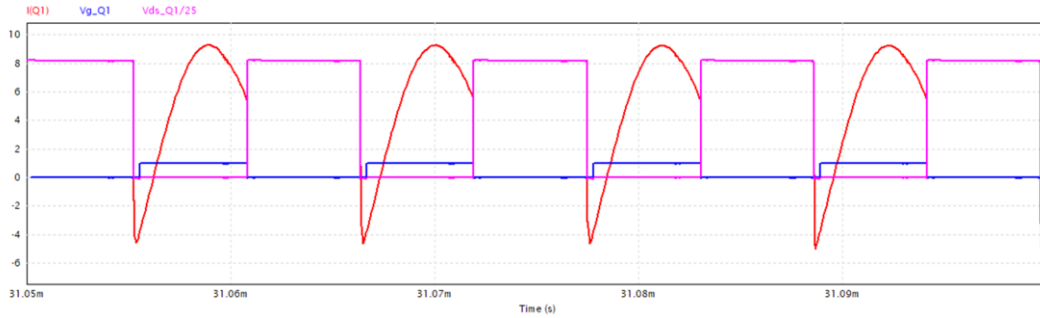
3.3.3.2 1000W Çalışma

Şekil 3.33'te primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



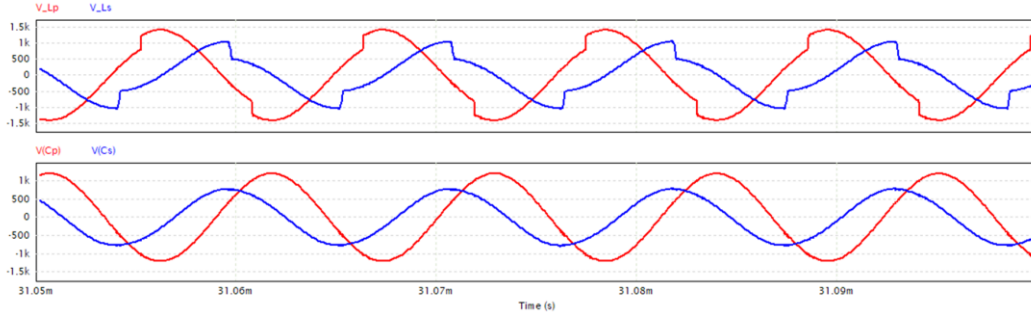
Şekil 3.33 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.34'te primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



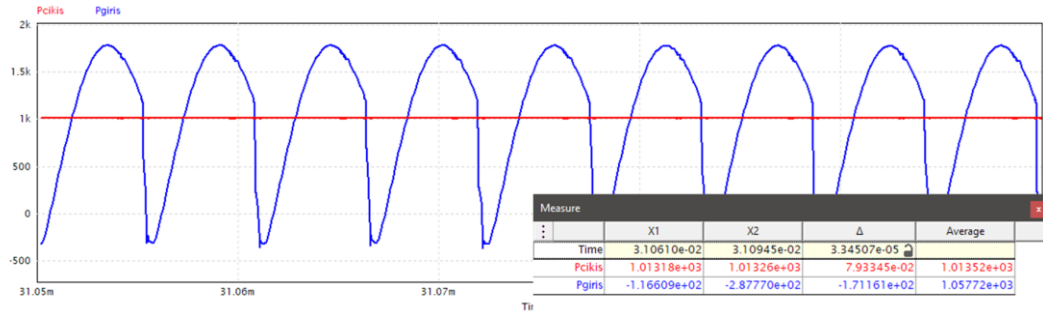
Şekil 3.34 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.35'te sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.35 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

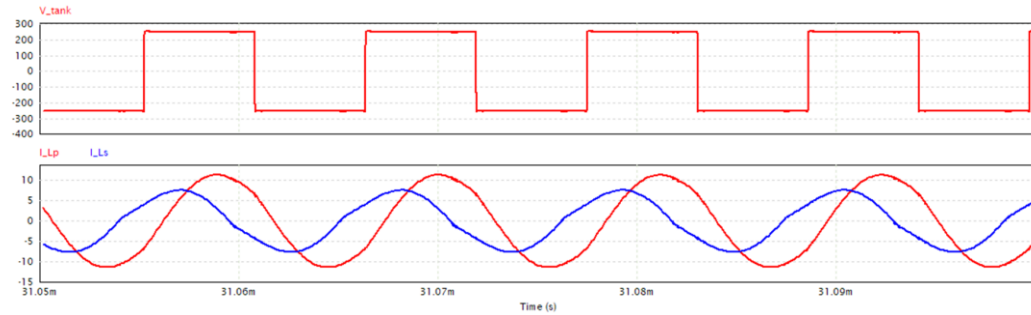
Şekil 3.36’da giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 1000W çıkış gücünde %96.1 verim elde edilmiştir.



Şekil 3.36 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

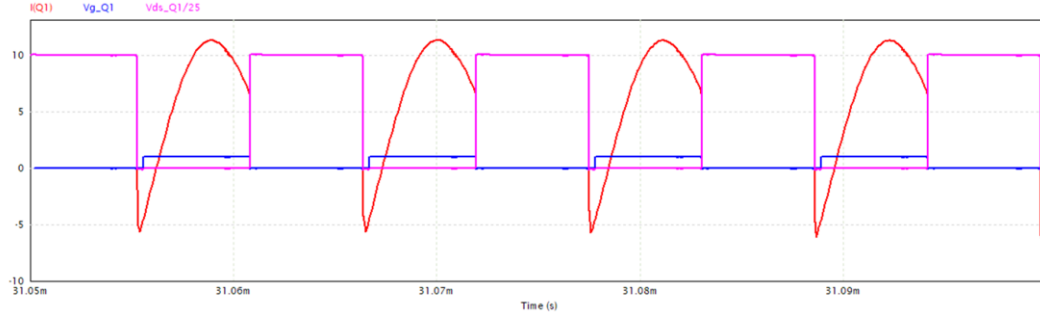
3.3.3.3 1500W Çalışma

Şekil 3.37’de primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



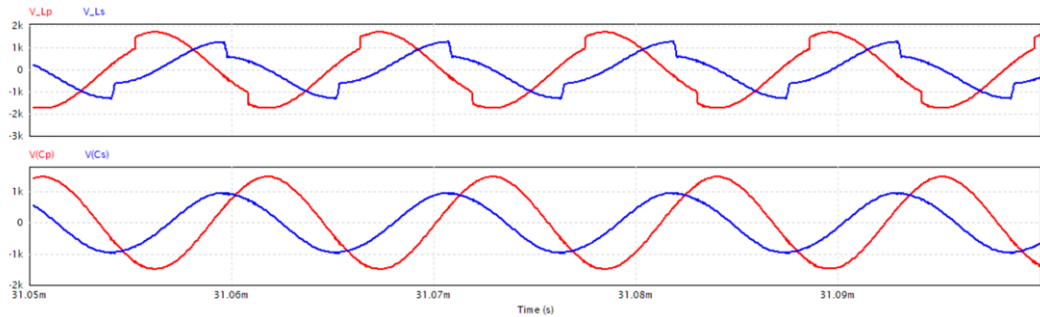
Şekil 3.37 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.38’de primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



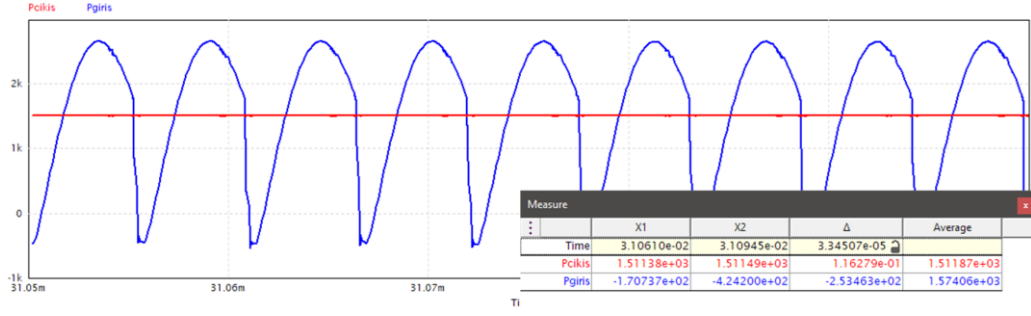
Şekil 3.38 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.39’da sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.39 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

Şekil 3.40’ta giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 1500W çıkış gücünde %96 verim elde edilmiştir.



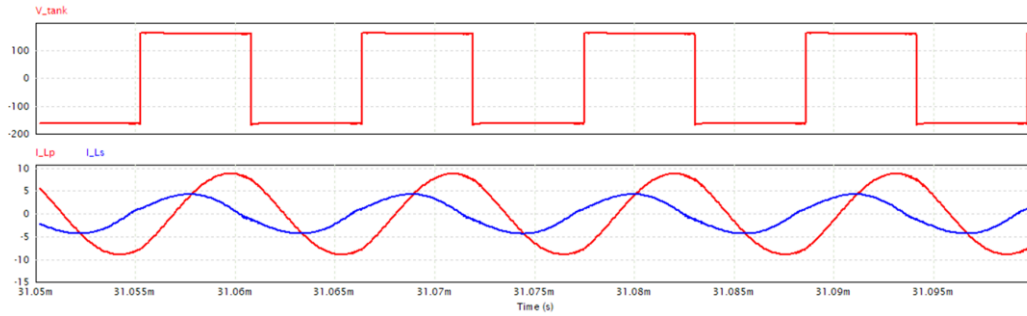
Şekil 3.40 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

3.3.4 Çalışma No #3

Bu koşulda sargıların yatay olarak eş merkezli olduğu ve sargılar arası mesafenin 210 mm olduğu durumda elde edilen kuplaj katsayısı kullanılarak simülasyon yapılmıştır.

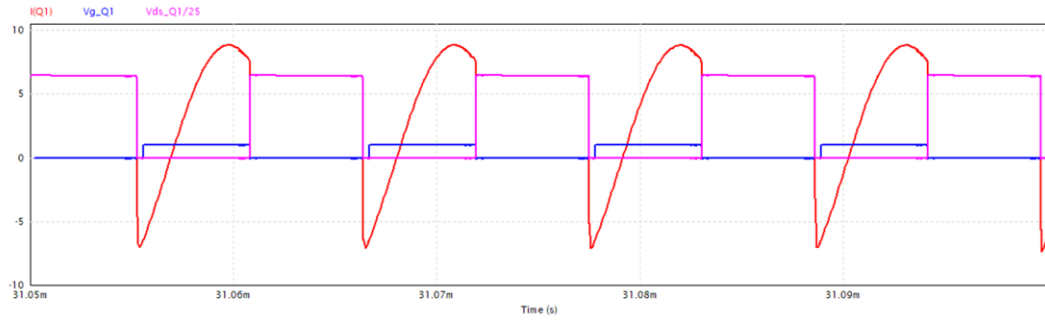
3.3.4.1 500W Çalışma

Şekil 3.41’de primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



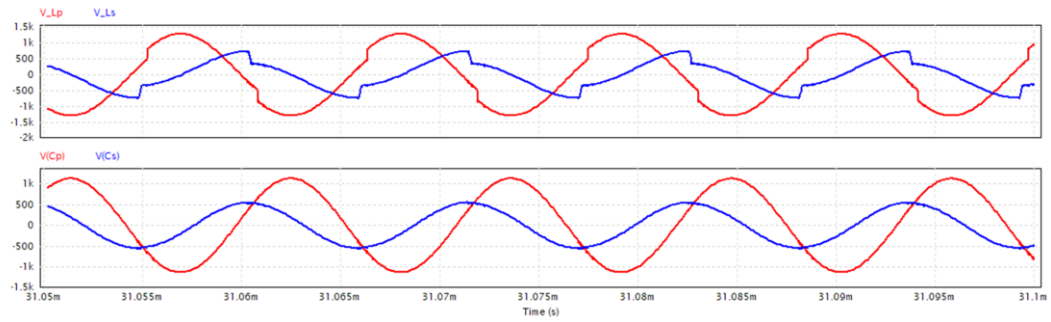
Şekil 3.41 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.42’de primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



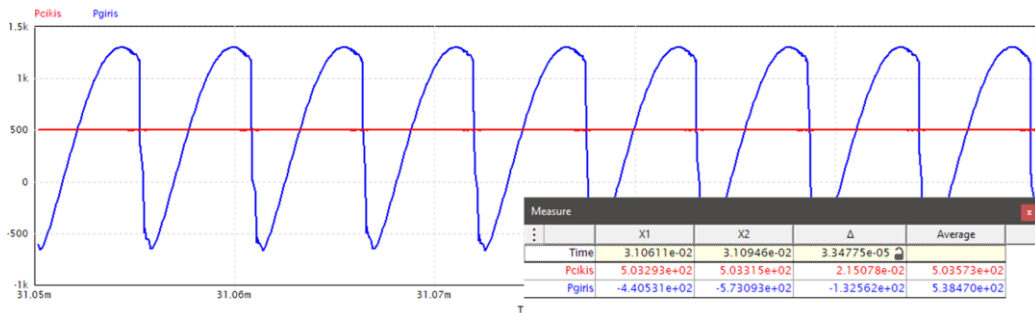
Şekil 3.42 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.43'te sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.43 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

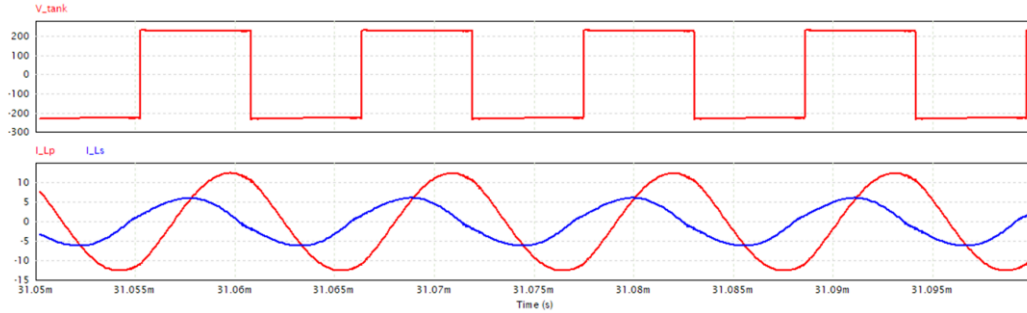
Şekil 3.44'te giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 500W çıkış gücünde %93.5 verim elde edilmiştir.



Şekil 3.44 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

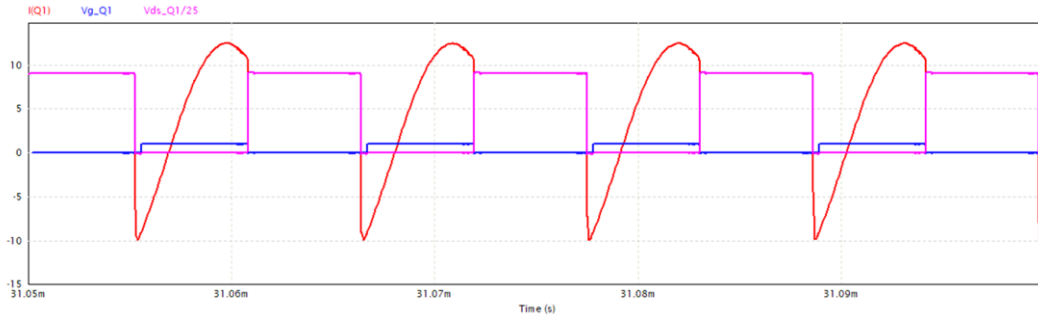
3.3.4.2 1000W Çalışma

Şekil 3.45’de primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



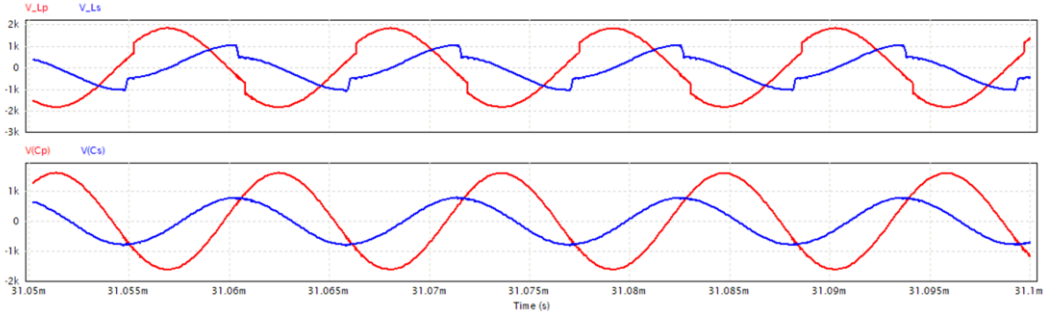
Şekil 3.45 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.46’da primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



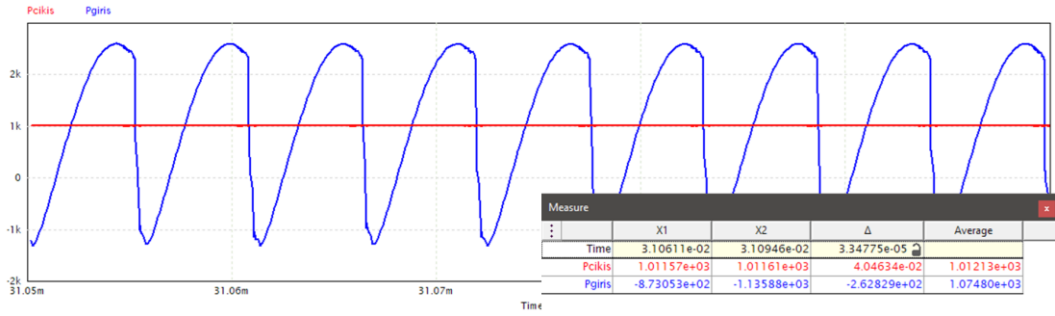
Şekil 3.46 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.47’de sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.47 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

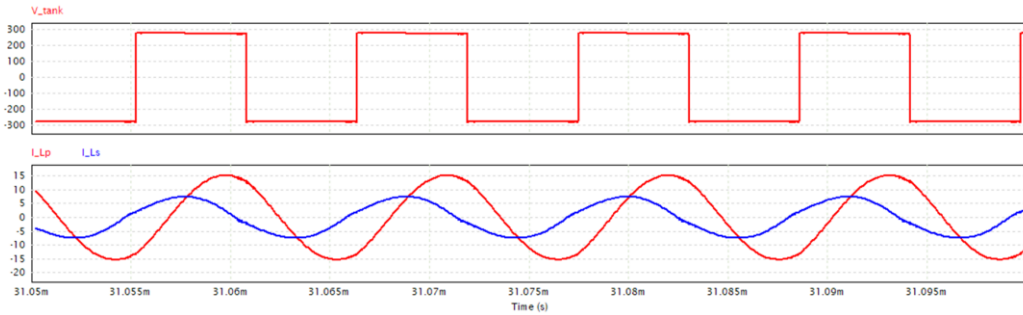
Şekil 3.48’de giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 1000W çıkış gücünde %94.16 verim elde edilmiştir.



Şekil 3.48 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

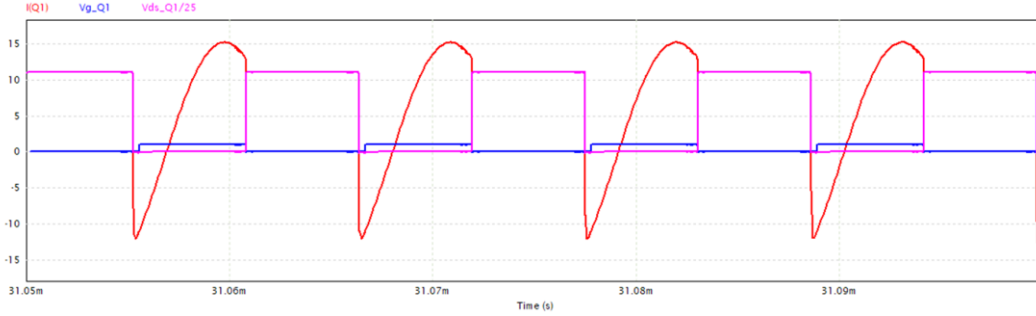
3.3.4.3 1500W Çalışma

Şekil 3.49’da primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



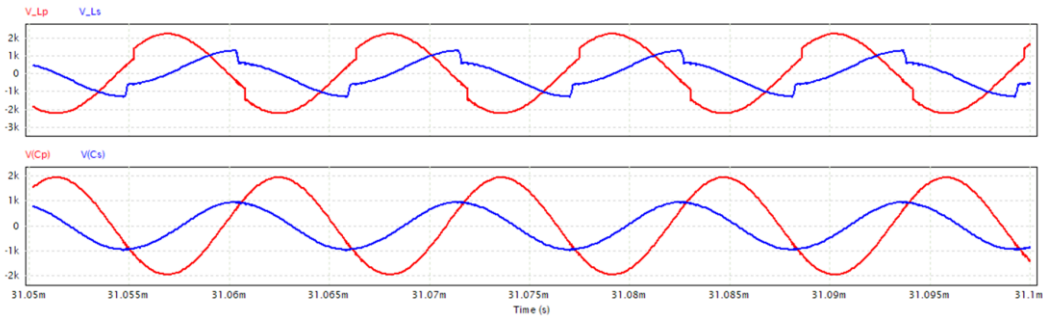
Şekil 3.49 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.50’de primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



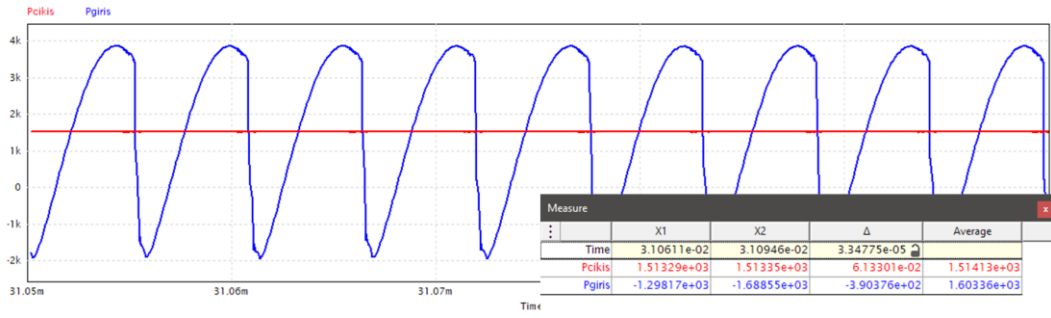
Şekil 3.50 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.51’de sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.51 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

Şekil 3.52’de giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 1500W çıkış gücünde %94.4 verim elde edilmiştir.



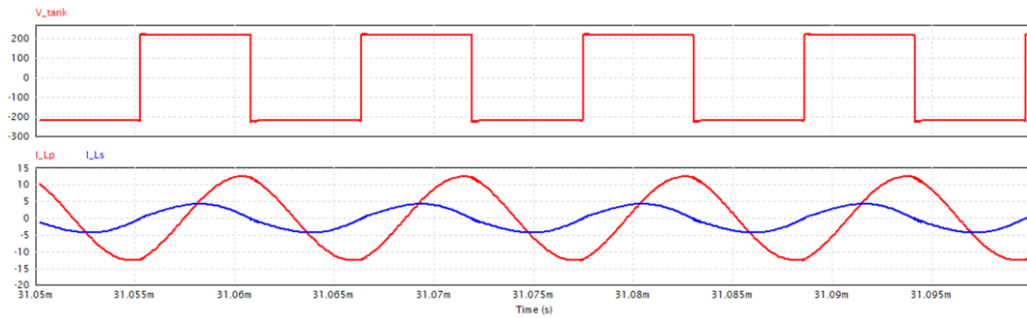
Şekil 3.52 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

3.3.5 Çalışma No #4

Bu koşulda sargıların x-ekseninde 75 mm; y-ekseninde 100 mm yatay hizasızlık durumundadır. Sargılar arası mesafe ise 210 mm'dir. Bu durumda elde edilen kuplaj katsayısı kullanılarak simülasyon yapılmıştır.

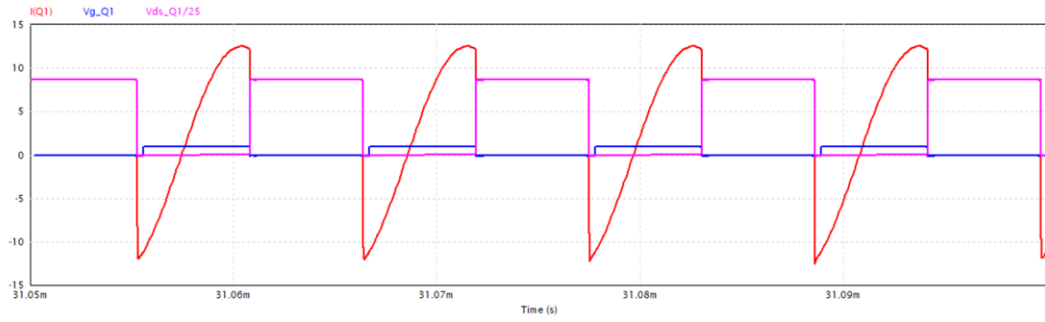
3.3.5.1 500W Çalışma

Şekil 3.53'te primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



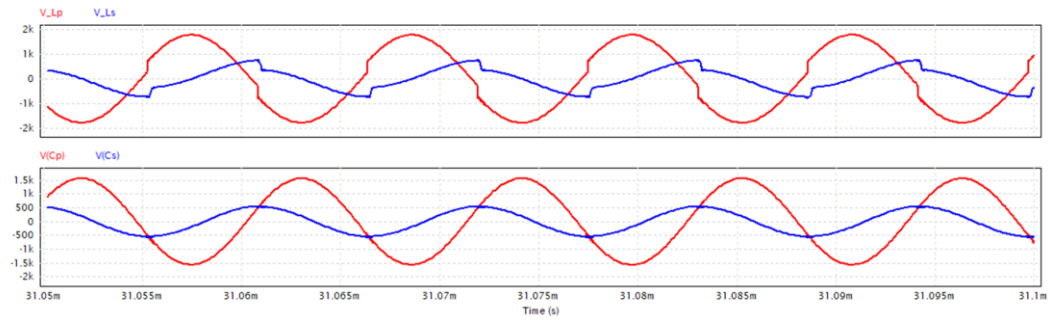
Şekil 3.53 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.54'te primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



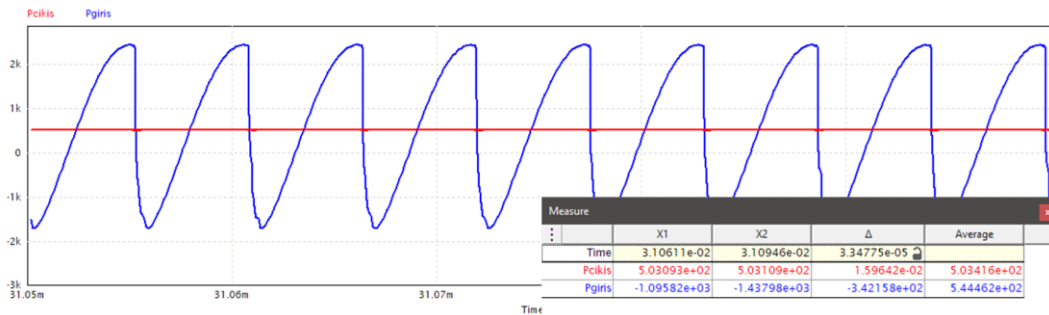
Şekil 3.54 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.55'te sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.55 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

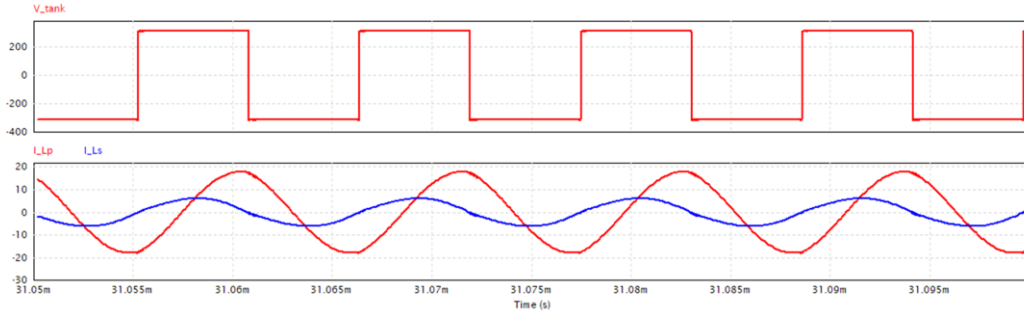
Şekil 3.56'da giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 500W çıkış gücünde %92.4 verim elde edilmiştir.



Şekil 3.56 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

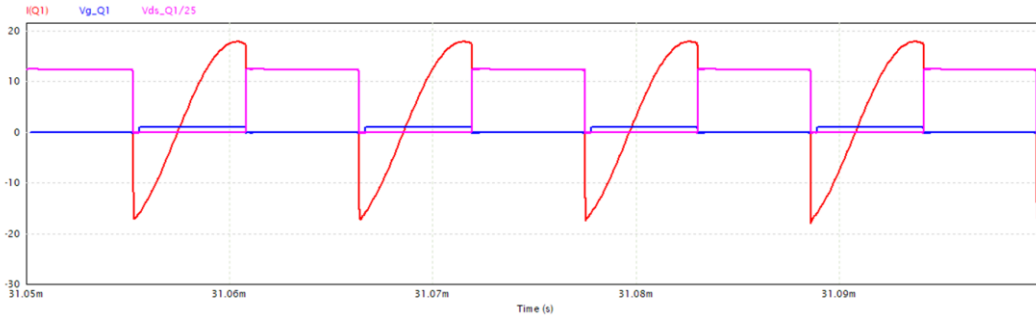
3.3.5.2 1000W Çalışma

Şekil 3.57’de primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



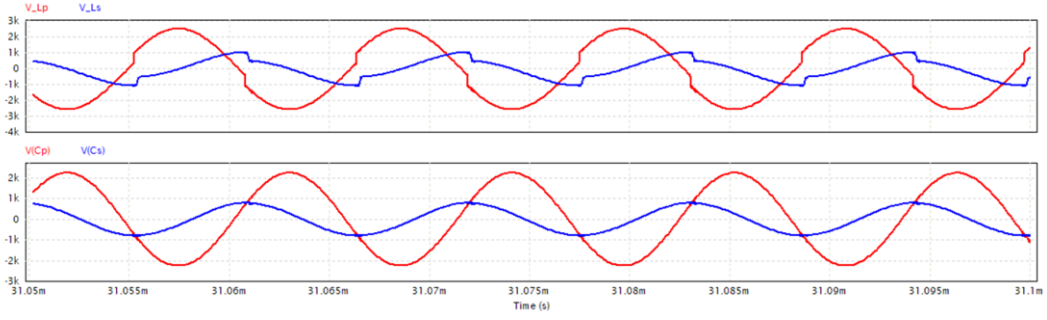
Şekil 3.57 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.58’de primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



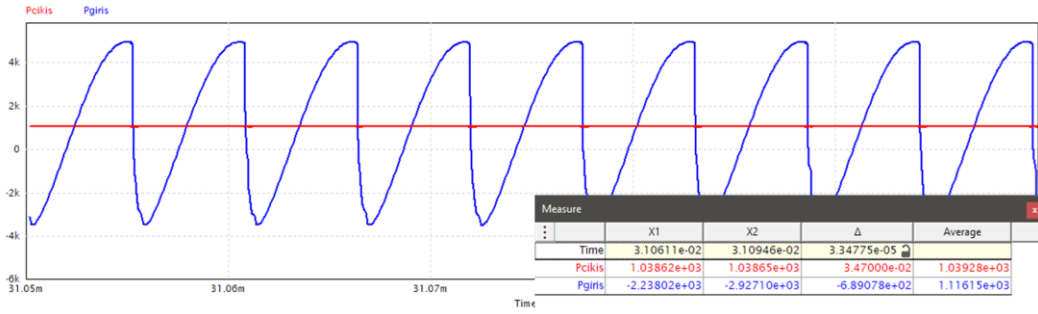
Şekil 3.58 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.59’da sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.59 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

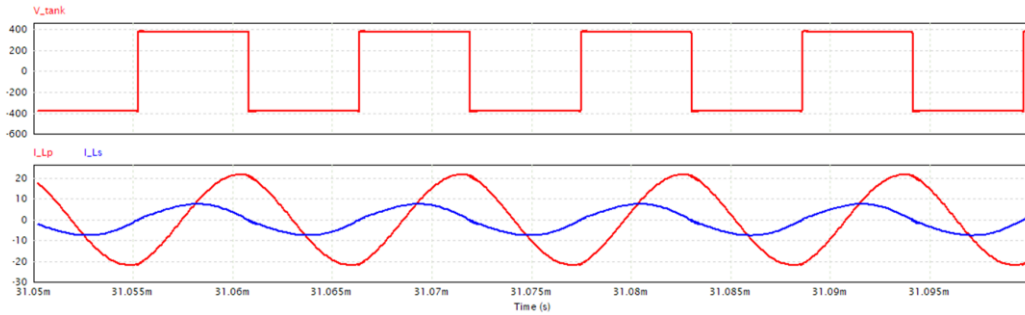
Şekil 3.60'da giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 1000W çıkış gücünde %96 verim elde edilmiştir.



Şekil 3.60 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

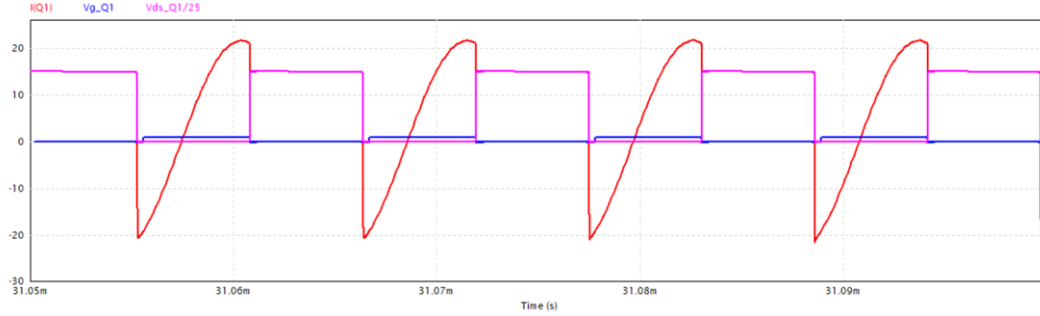
3.3.5.3 1500W Çalışma

Şekil 3.61'de primerde yer alan rezonans tankına uygulanan gerilim ile birlikte primer ve sekonder sargı akımları verilmiştir.



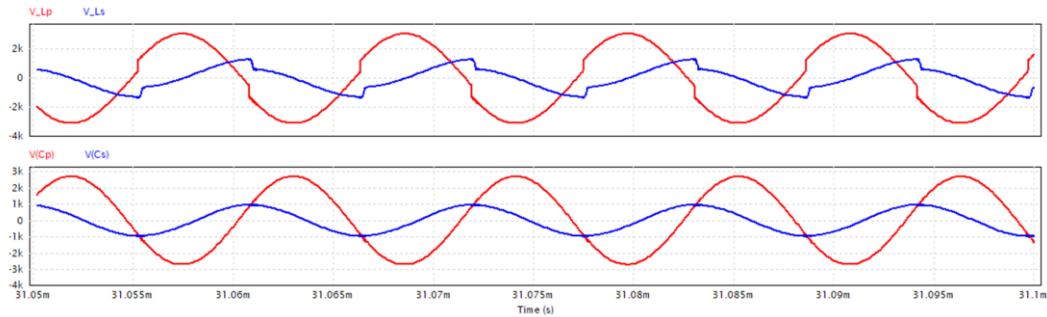
Şekil 3.61 Tank gerilimi (üstte), primer sargı akımı (altta kırmızı) ve sekonder sargı akımı (altta mavi).

Şekil 3.62’de primerde yer alan tam köprü anahtarlardan birine ait akım, gerilim ve kapı sürme sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi kapı sürme sinyali, anahtar gerilimi 0V iken uygulanmıştır. Bu sayede anahtar sıfır gerilimde iletme girmiş ve yumuşak anahtarlama sağlanmıştır.



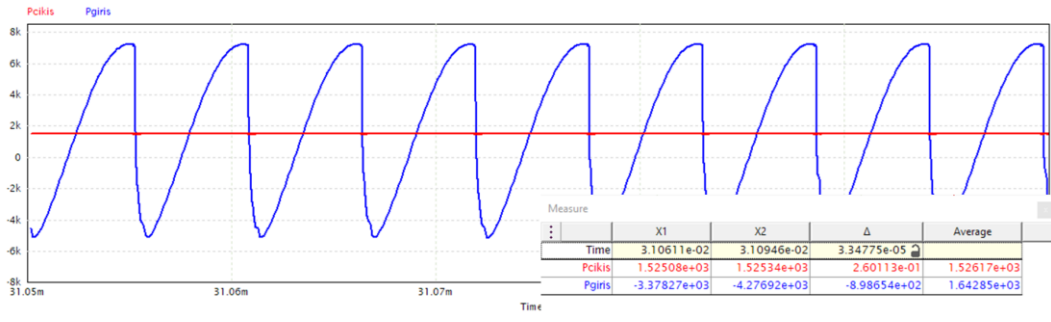
Şekil 3.62 Primer anahtar akımı (kırmızı), primer anahtar gerilimi (pembe) ve primer anahtar kapı sürme sinyali.

Şekil 3.63’te sargı ve rezonans kapasitör gerilimleri verilmiştir. Rezonans tankın kalite faktörüne bağlı olarak rezonans kapasitör uçlarında görülen gerilim, tanka uygulanan gerilime kıyasla çok yüksek değerler alabilmektedir.



Şekil 3.63 Primer sargı gerilimi (üstte kırmızı), sekonder sargı gerilimi (üstte mavi), primer rezonans kapasitör gerilimi (altta kırmızı) ve sekonder rezonans kapasitör gerilimi (altta mavi).

Şekil 3.64’te giriş ve çıkış gücü grafiği verilmiştir. 1500W çıkış gücünde %92.9 verim elde edilmiştir.



Şekil 3.64 Giriş gücü (mavi) ve çıkış gücü (kırmızı).

4 DENEYSEL ÇALIŞMA

Bir önceki bölümde bilgisayar destekli tasarımı yapılan KET sisteminin prototipi oluşturulmuştur.

4.1 Primer ve Sekonder Sargılar

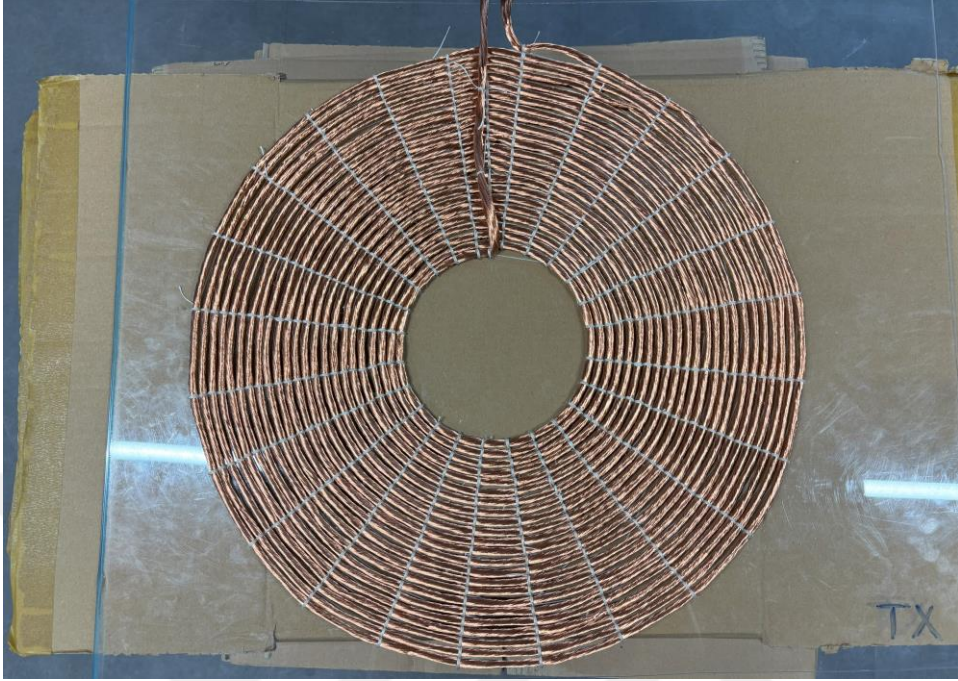
Ansys Maxwell 3D simülasyonunda optimal litz teli için 1200×0.1 mm konfigürasyonu elde edilmişti. Bunun için her biri 0.1mm çapa sahip 1200 damarlı litz teli ürettirilmiştir. Litz tellerinin lehim alabilir emaye kaplı olmasına dikkat edilmiştir. Üretilen litz telinin görseli Şekil 4.1’de verilmiştir.



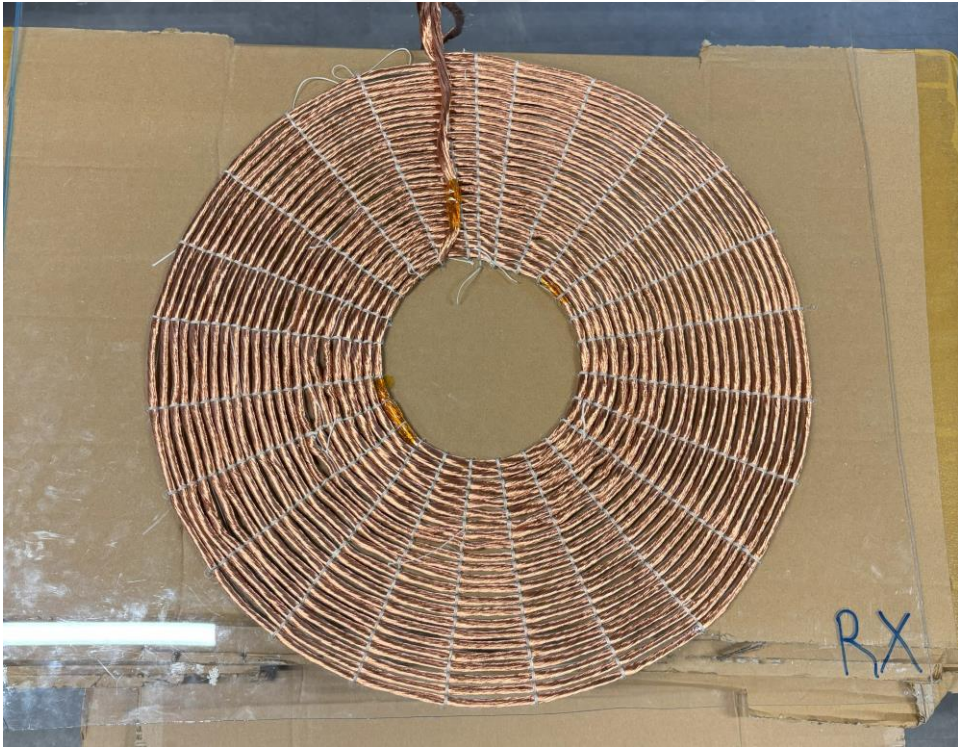
Şekil 4.1 Primer ve sekonder sargılar için üretilen 1200×0.1 mm litz teli.

Litz teli ile primer ve sekonder sargılar, pleksi bir yüzey üzerinde dairesel KET sargısı olacak şekilde sarılmıştır. Sargı parametreleri Tablo 3.9’daki ile aynıdır. Ancak sargıların elle sarılmasından ötürü sarım adımı her noktada sabit tutulamamıştır. Bu durumun sistem performansı üzerinde dikkate değer bir etki

yapması beklenmemektedir. 23 tura sahip primer ve sekonder sargıları sırasıyla Şekil 4.2 a ve b’de verilmiştir.



a)



b)

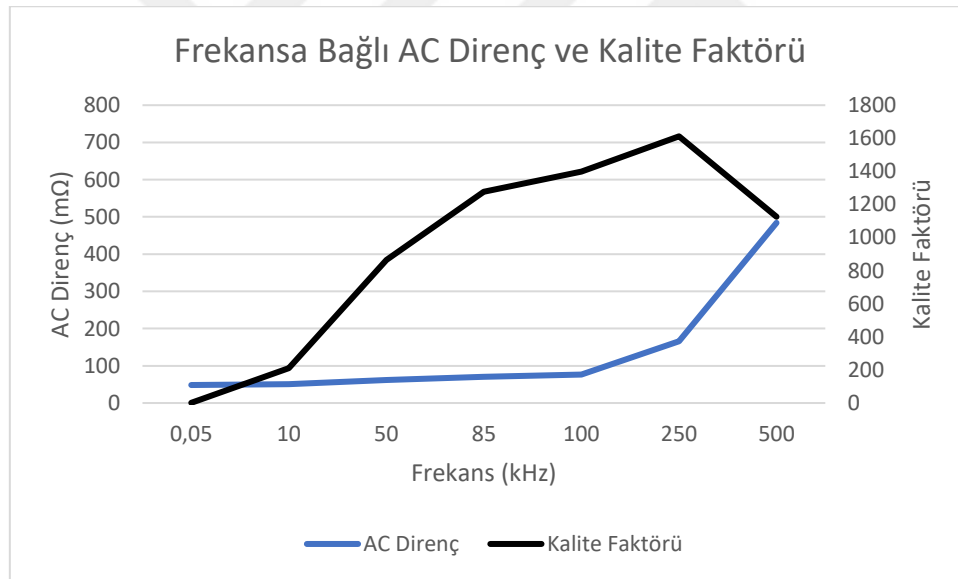
Şekil 4.2 a) Primer sargı, b) sekonder sargı

Primer ve sekonder sargıları özdeşdir. Her bir sargının çapı 485 mm'dir.

Sargıların çeşitli frekanslarda öz endüktansı, kalite faktörleri ve AC ve DC direnç değerleri ölçülmüştür. Ölçüm için Hioki IM 3536 LCR metre kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları

Tablo 4.1 Primer sargı ölçümleri (nüvesiz)

Frekans (kHz)	0.05	10	50	85	100	250	500
Endüktans (μH)	169.1	169.28	169.29	169.36	169.4	170.24	173.46
DC Direnç ($\text{m}\Omega$)	47.97	47.96	47.96	47.96	47.97	47.97	47.97
AC Direnç ($\text{m}\Omega$)	48.34	50.52	61.46	70.8	76.1	165.9	484
Kalite Faktörü	1.09	210	865	1277	1398	1611	1125

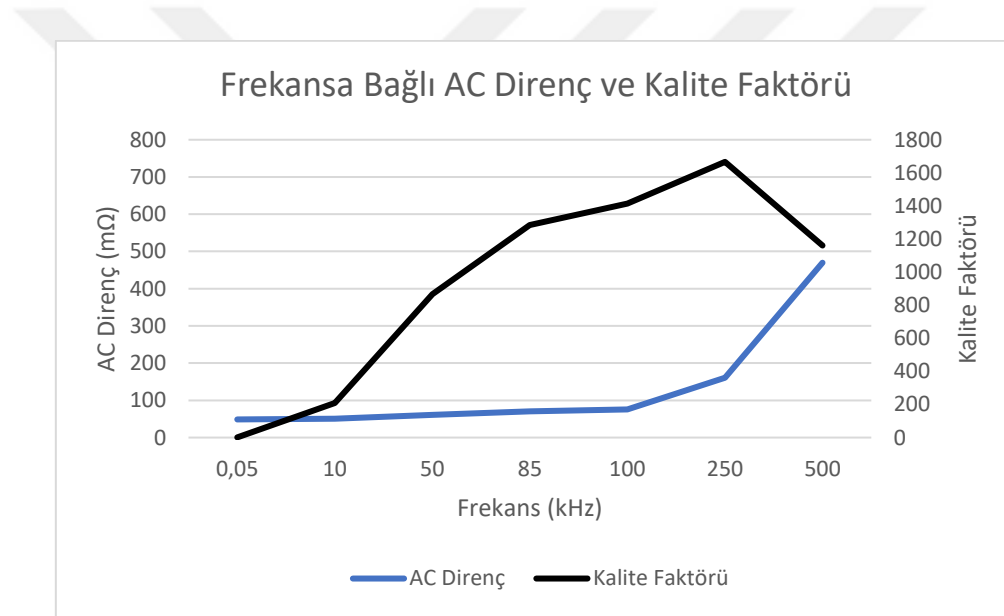


Şekil 4.3 Nüvesiz primer sargısının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi

Sargının AC direncinin frekansın artışı ile birlikte hızlı yükseldiği görülmektedir. Bu yükseliş nedeniyle sargının kalite faktöründe de 250 kHz'den sonra düşüş görülmüştür. Sargının maksimum kalite faktörü, sargının optimize edildiği 85 kHz bölgesinden uzakta 250 kHz civarlarında elde edilmiştir.

Tablo 4.2 Sekonder sargısı ölçümleri (nüvesiz)

Frekans (kHz)	0.05	10	50	85	100	250	500
Endüktans (μH)	169.2	169.16	169.17	169.24	169.28	170.16	173.43
DC Direnç ($\text{m}\Omega$)	48.39	48.38	48.39	48.4	48.38	48.38	48.38
AC Direnç ($\text{m}\Omega$)	48.7	50.74	61.32	70.4	75.2	160.4	469.7
Kalite Faktörü	1.09	209.4	866.7	1283.8	1414.3	1666.3	1159.9



Şekil 4.4 Nüvesiz sekonder sargısının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi

Sargının AC direncinin frekansın artışı ile birlikte hızlı yükseldiği görülmektedir. Bu yükseliş nedeniyle sargının kalite faktöründe de 250 kHz'den sonra düşüş görülmüştür. Sargının maksimum kalite faktörü, sargının optimize edildiği 85 kHz bölgesinden uzakta 250kHz civarlarında elde edilmiştir.

Yapılan ölçümlerde görülmektedir ki sargıların AC ve DC dirençleri düşük frekansta birbirine oldukça yakın değerdedir. Bununla birlikte düşük frekanslarda sargıların kalite faktörü oldukça düşük değerlerdedir. KET sistemlerinde yüksek güç transferi ve yüksek verim için sargıların kalite faktörlerinin yüksek olması

istenir. Frekans arttıkça kalite faktöründe artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte deri etkisi ve yakınlık etkisi nedeniyle AC direnç de artış göstermiştir.

Sargıların özellikle 250 kHz üzerindeki frekanslarda kalite faktörleri düşüş eğilimi göstermiştir. Bunun nedeni, seçilen litz tellerinin damar çapının bu bölge için optimize edilmemiş olmasıdır. Dolayısıyla 500kHz noktasında deri ve yakınlık etkisi, 0.1 mm çapındaki litz telleri ile elimine edilememiştir. Bu bölgede çalışmak için daha küçük kesitli litz teli seçimi yapılmalıdır.

4.2 Ferrit Nüve

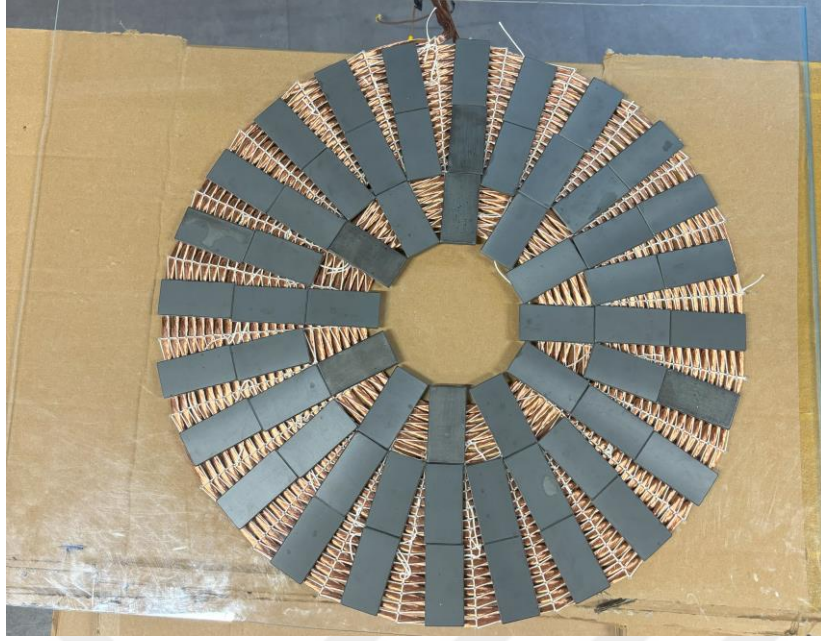
Sargıların kalite faktörlerinin ve sargılar arasındaki kuplajın artırılabilmesi amacıyla sargıların tabanına ferrit nüveler eklenmiştir. Ansys Maxwell 3D simülasyon çalışmasında 36 adet 93x28x16mm boyutlarında ferrit nüve kullanılmıştır. Tedarik problemlerinden ötürü prototip çalışmasında kullanılan nüve boyutları 62x31x4 mm olmuştur. Her bir sargı tabanına bu nüvelerden 60 adet yerleştirilmiştir. Kullanılan nüvelerin parça kodu CF139I6204'dir.

Ferrit nüveler simülasyon çalışmasında optimize edildiği gibi yerleştirilmiştir. Nüvelerin sargı tabanına yerleştirilmiş hali Şekil 4.5'te verilmiştir.

Nüvelerin yerleştirilmesi ile birlikte sargıların öz endüktans değerleri önemli ölçüde artmıştır. Bununla birlikte sargıların AC dirençlerindeki artış nedeniyle kalite faktöründe 85 kHz'den itibaren düşüş görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.4 ve Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 Primer sargı ölçümleri (nüveli)

Frekans (kHz)	0.05	10	50	85	100	250	500
Endüktans (μH)	253.2	253.2	253.59	254.49	255.02	265.56	311.05
DC Direnç ($\text{m}\Omega$)	47.78	47.78	47.78	47.79	47.79	47.8	47.8
AC Direnç ($\text{m}\Omega$)	48.41	51.96	79.04	127.7	157.5	1084	5222
Kalite Faktörü	1.6	306	1007	1064	1017	384.8	187.12

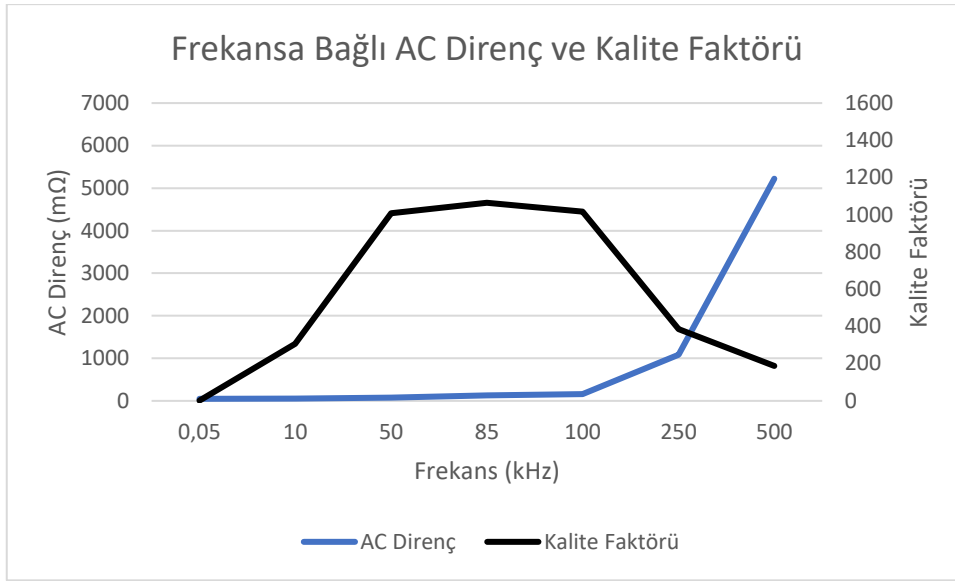


a)



b)

Şekil 4.5 Ferrit nüvelerin sargı tabanındaki yerleşimi a) primer sargısı, b) sekonder sargısı

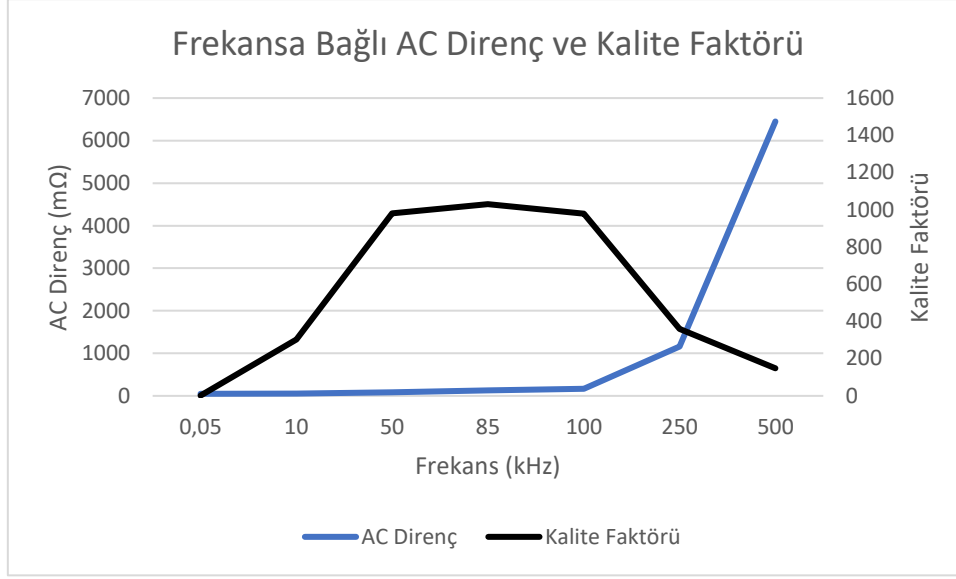


Şekil 4.6 Nüve eklenmiş primer sargısının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi

Sargının AC direncinin frekansın artışı ile birlikte hızlı yükseldiği görülmektedir. Bu yükseliş nedeniyle sargının kalite faktöründe de 100 kHz'den sonra düşüş görülmüştür. Sargının maksimum kalite faktörü, sargının optimize edildiği 85 kHz bölgesinde elde edilmiştir.

Tablo 4.4 Sekonder sargı ölçümleri (nüveli)

Frekans (kHz)	0.05	10	50	85	100	250	500
Endüktans (μH)	253.8	254.02	254.38	255.18	255.65	265.06	304.56
DC Direnç (mΩ)	48.21	48.22	48.22	48.22	48.23	48.21	48.23
AC Direnç (mΩ)	48.7	52.54	81.5	132.3	164.2	1157	6450
Kalite Faktörü	1.6	303.7	980.5	1030	978	359.8	148.3



Şekil 4.7 Nüve eklenmiş sekonder sargısının frekansa bağlı AC direnç ve kalite faktörü değişimi

Sargının AC direncinin frekansın artışı ile birlikte hızlı yükseldiği görülmektedir. Bu yükseliş nedeniyle sargının kalite faktöründe de 100 kHz'den sonra düşüş görülmüştür. Sargının maksimum kalite faktörü, sargının optimize edildiği 85 kHz bölgesinde elde edilmiştir.

4.3 Kuplaj Katsayısının Ölçümü

Farklı hizalanma durumları için primer ve sekonder sargılar arasındaki kuplaj katsayısının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Kuplaj katsayısının ölçümü için sargılardan birine genliği ve frekansı bilinen bir gerilim uygulanır. Bu esnada diğer sargıda indüklenen gerilim ölçülür. (2.11) ve (2.9) eşitlikleri yardımıyla sırasıyla ortak endüktans ve kuplaj katsayısı hesaplanır. Bu yöntem ile 85kHz frekansında farklı hizalanma koşullarında nüvesiz ve nüveli sargılar için elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da verilmiştir.

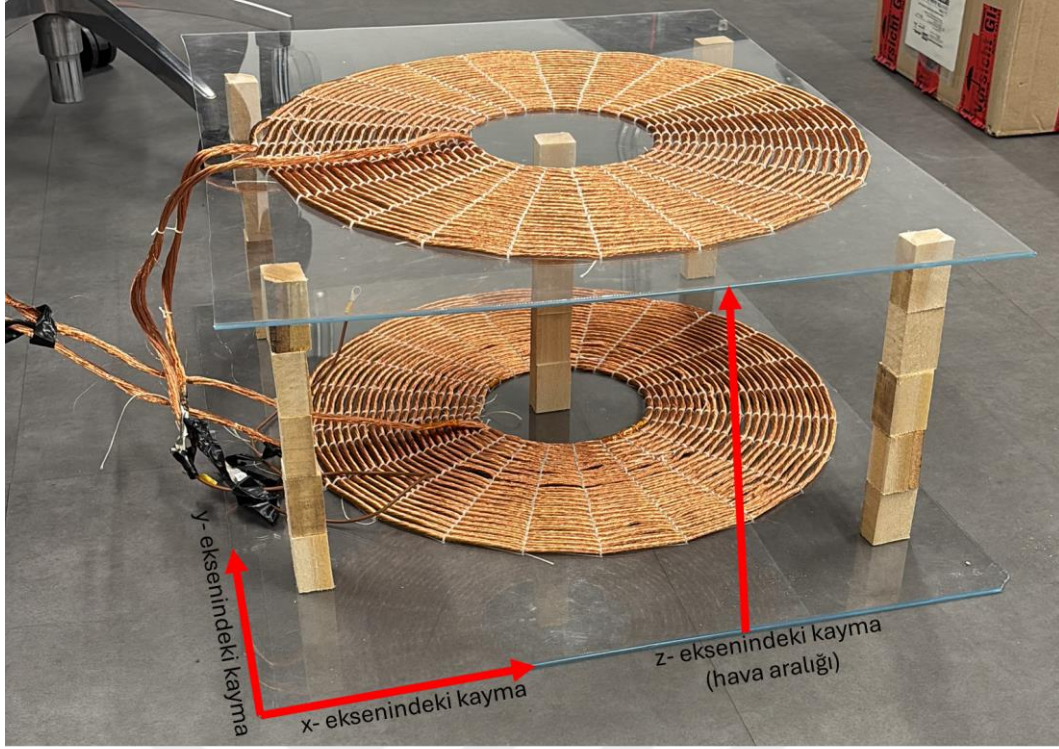
Tablo 4.5 Nüvesiz sargıların farklı hizalanma koşullarındaki kuplaj katsayılarının ölçümü

Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)	Ortak Endüktans (μH)	Kuplaj Katsayısı (k)
0	0	140	50.43	0.297
0	0	175	38.67	0.228
0	0	210	31.7	0.187
0	100	140	36.67	0.216
0	100	175	25.39	0.15
0	100	210	26.95	0.147
75	0	140	39.26	0.231
75	0	175	33.06	0.195
75	0	210	28.12	0.166
75	100	140	34.06	0.201
75	100	170	29.73	0.175
75	100	210	25	0.134

Tablo 4.6 Nüveli sargıların farklı hizalanma koşullarındaki kuplaj katsayılarının ölçümü

Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)	Ortak Endüktans (μH)	Kuplaj Katsayısı (k)
0	0	140	93.28	0.366
0	0	175	71.17	0.279
0	0	210	52.07	0.204
0	100	140	70.2	0.275
0	100	175	53.24	0.208
0	100	210	40.19	0.157
75	0	140	76.49	0.3
75	0	175	58.72	0.23
75	0	210	45.29	0.177
75	100	140	61.13	0.239
75	100	170	47.68	0.187
75	100	210	36.19	0.142

Δx , Δy ve Δz sırasıyla x, y ve z eksenlerinde sargıların eş merkezlilik durumundan ne kadar kaydığını ifade etmektedir. En iyi koşul, x ve y ekseninde hiçbir kayma olmadığı ve sargılar arasındaki hava aralığının en küçük olduğu koşuldur. En yüksek kuplaj katsayısına da bu durumda ulaşılmıştır. Sargılara nüve eklenmesi ile birlikte en iyi koşulda kuplaj katsayısındaki artış yaklaşık %23 olmuştur. En kötü koşulda ise bu artış yaklaşık %6 kadar olmuştur.



Şekil 4.8 x, y ve z eksenlerinde sargıların hizalanması

4.4 Rezonans Kapasitörler

Seri-seri rezonans topolojisi için primer ve sekonder sargıları 85 kHz anahtarlama frekansında kompanse edecek kapasitör değeri Tablo 2.2’de verilen eşitlikler yardımıyla sırasıyla 14nF olarak bulunmuştur.

Rezonans dönüştürücülerde sistemin rezonans frekansının sabit olması istenir. Ortam sıcaklığı gibi etkenler kapasitörlerin kapasitansında değişiklik göstermesine neden olur ve bu durum sistemin stabil çalışmasını olumsuz etkileyebilir. Kullanılacak kapasitör seçiminde bu husus dikkate alınmıştır. Film veya seramik kapasitörler kullanılabilir. Film kapasitörler maliyet açısından avantajlı olmakla birlikte boyut açısından dezavantajlıdır. Seramik kapasitörler ise boyut açısından avantajlı olmakla birlikte maliyet açısından dezavantajlıdır.

Ayrıca rezonans kapasitörlerin uçlarındaki gerilim oldukça yüksek değerler alabilmektedir. Bu gerilim değeri rezonans tankının kalite faktörüne bağlıdır. Rezonans kapasitörlerinin akım ve gerilim dayanımını sağlayabilmek için bir kapasitör bankası oluşturulmuştur. Primer için her biri 18 nF’tan oluşan 9 adet seri ve 7 adet paralel kapasitör kullanılmıştır. Sekonder için 6 adet seri 3 adet paralel 18

nF kapasitör ve 6 adet seri 3 adet paralel 10nF kapasitör kullanılmıştır. Sekonder rezonans kapasitörlerin gerilim stresi, primere göre daha düşük olduğu için seri kapasitör sayısı daha düşük tutulmuştur. C1210C183JDGACAUTO parça numarasına sahip C0G/NP0 kapasitör kullanılmıştır.

4.5 Yarı İletken Anahtar Seçimi

Tasarlanan KET sisteminin maksimum giriş gerilimi 400V'tur. Primer sargısını sürmek için tam-köprü dönüştürücü yapısı kullanılmıştır. Bu yapıda bulunan dört adet yarı iletken anahtarın her birinin gerilim stresi giriş gerilimi kadardır. Ancak yarı iletken anahtar uçlarında parazitik endüktanslar nedeniyle anahtarlama esnasında ani pik gerilimler oluşmaktadır. Bu nedenle 650V etiket değerine sahip SIHG050N60E-GE3 N-kanal silikon mosfetler kullanılmıştır. Ayrıca istenmeyen ani gerilim sıçramalarından koruma amacıyla RCD bastırma devresi kullanılmıştır.

4.6 Elektronik Kart Tasarımı

Deneyisel çalışma kapsamında iki adet elektronik kart tasarımı gerçekleştirilmiştir. Birinci kart, primer sargısını istenilen frekansta sürmek için gerekli rezonans inverter ve primer kompanzasyon kapasitörlerini içermektedir. İkinci kart ise sekonder sargının kompanzasyon kapasitörlerini ve doğrultucu yapısını içermektedir.

Primerde yer alan tam-köprü mosfetlerin sürülmesi için gerekli PWM sinyallerinin üretilmesi için STM32F3 serisine ait STM32F301C8T6 mikrodnetleyici kullanılmıştır.

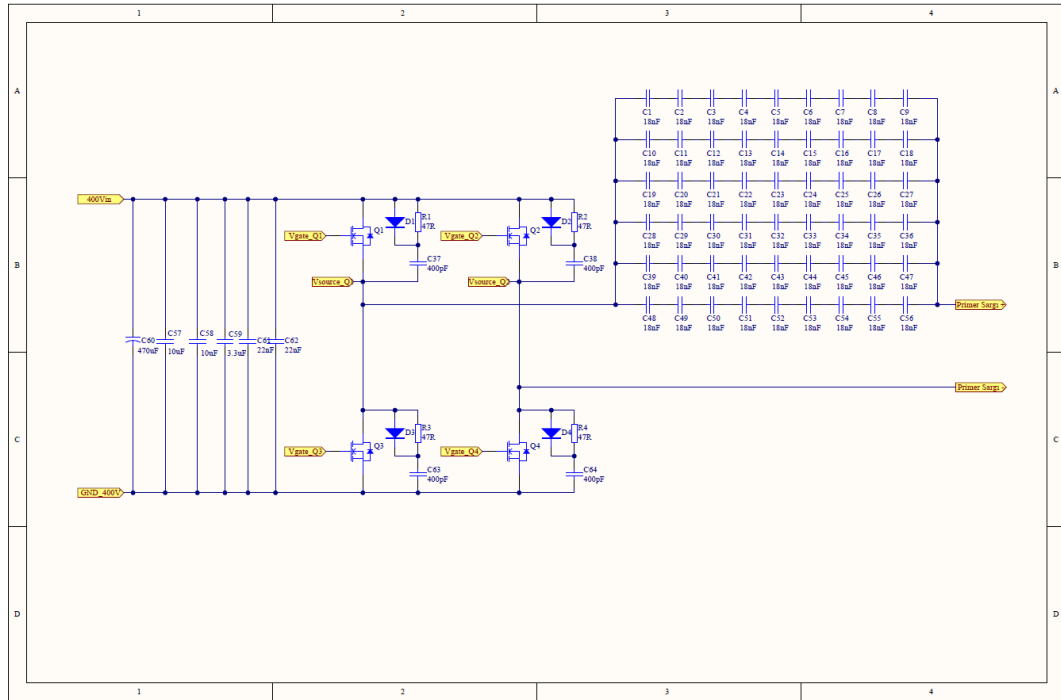
STM32F301C8T6 mikrodnetleyicisi, 72 MHz saat frekansında çalışan 32 bit ARM Cortex-M4F çekirdeğine sahiptir. Bu mikrodnetleyici, entegre Floating Point Unit (FPU) desteği sayesinde, ondalıklı işlemleri yüksek doğrulukla gerçekleştirebilmektedir. Bu özellik, özellikle sinyal işleme ve yoğun matematiksel hesaplamalar gerektiren uygulamalar için avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, düşük güç tüketimi ve geniş çevresel donanım desteği sayesinde gömülü sistemler ve güç elektroniği uygulamaları için uygun bir çözüm sunmaktadır.

Sistemde MOSFET'lerin kontrol edilmesi amacıyla complementary 16-bit PWM kullanılmıştır. Bu bağlamda, TIM1 ve TIM15 zamanlayıcıları seçilmiş ve her biri

iki kanal PWM üretmek üzere yapılandırılmıştır. STM32F301C8T6 mikrodnetleyicisi, toplamda 6 adet 16-bit PWM kanalı, 3 adet 16-bit zamanlayıcı (Timer) ve 1 adet yüksek çözünürlüklü zamanlayıcı (HRTIM) içermektedir.

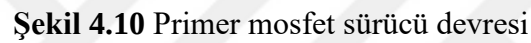
STM32F301C8T6 mikrodnetleyicisinin gelişmiş zamanlayıcı birimleri, işlemci müdahalesi olmadan donanımsal olarak birbirlerini tetikleyerek complementary PWM sinyali üretme yeteneğine sahiptir. Bu sayede, yazılımsal hataların önüne geçilmiş ve sistemin güvenilirliği artırılmıştır. Ayrıca, ölü zaman süresi de bu çevresel birimler konfigüre edilerek donanımsal olarak belirlenmiştir.

Primer sargısının sürme devresi Şekil 4.9’da verilmiştir. Sürme devresi temel olarak tam köprü mosfet anahtarlar ve primer rezonans kapasitörlerden oluşmaktadır.



Şekil 4.9 Primer sargısı sürme devresi şematiği

Her bir mosfet için STGAP2HSCMTR sürücü entegresi kullanılmıştır. Sürücü entegresi tek çıkışa sahiptir ve içerisinde kapasitif izolasyon mevcuttur. Her bir sürücü izoleli bir DC-DC dönüştürücü modülü ile beslenmiştir. Anahtarların sürme gerilimi 12V/0V olarak belirlenmiştir.



The diagram shows a 4x4 matrix keypad with a 4x4 array of switches. The keypad is connected to a 4x4 array of LEDs, which is connected to a 4x4 array of relays. The relays are connected to a 4x4 array of LEDs, which is connected to a 4x4 array of relays. The relays are connected to a 4x4 array of LEDs, which is connected to a 4x4 array of relays.

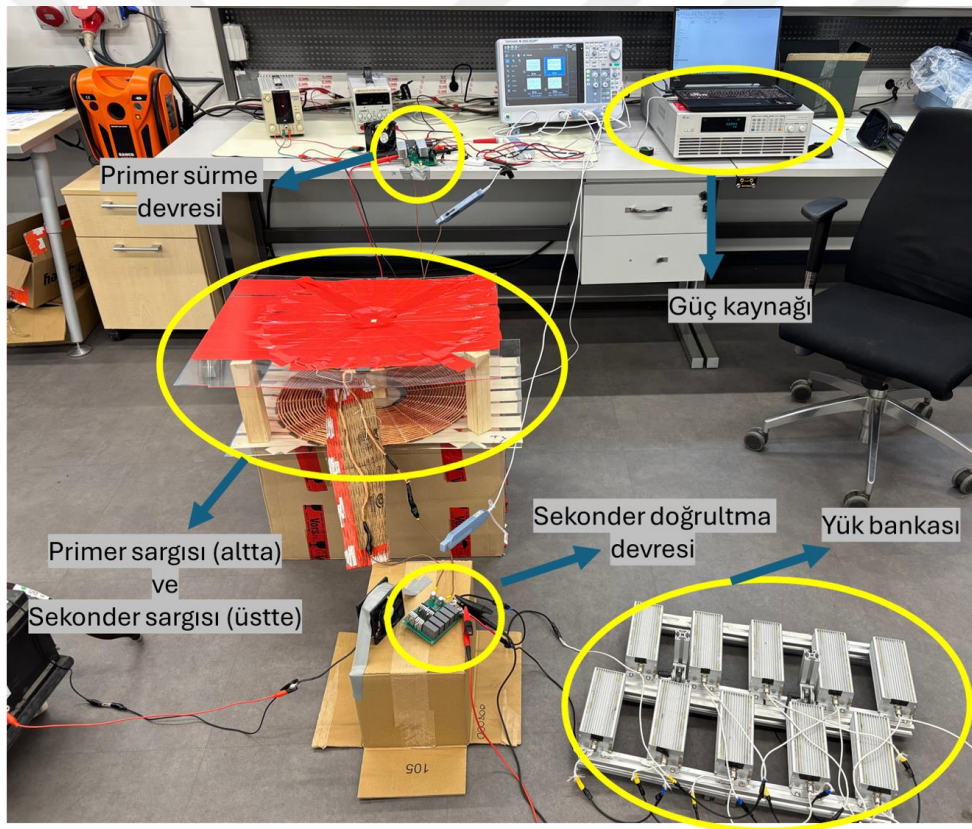
Şekil 4.11 Sekonder köprü doğrultucu devre şematiği

4.7 Çalışma Koşulları

KET sistemlerinde primer ve sekonder sargıların yerleşimi her zaman istenilen şekilde gerçekleşemez. Yatay ve dikey hizalanma için farklı koşullar gerçekleştirilmektedir. Elektrikli araçlar için SAE J2954 standardında belirtilen yatay ve dikey hizalanma koşulları için farklı güç seviyelerinde güç transferi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.10’da verildiği üzere, üç eksendeki hizalanma durumlarına göre 500W, 1000W ve 1500W olmak üzere üç farklı güç seviyesinde sistem test edilmiştir.

Testlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil 4.12’de verilmiştir. Güç kaynağı olarak Chroma 62150H-600 kullanılmıştır.

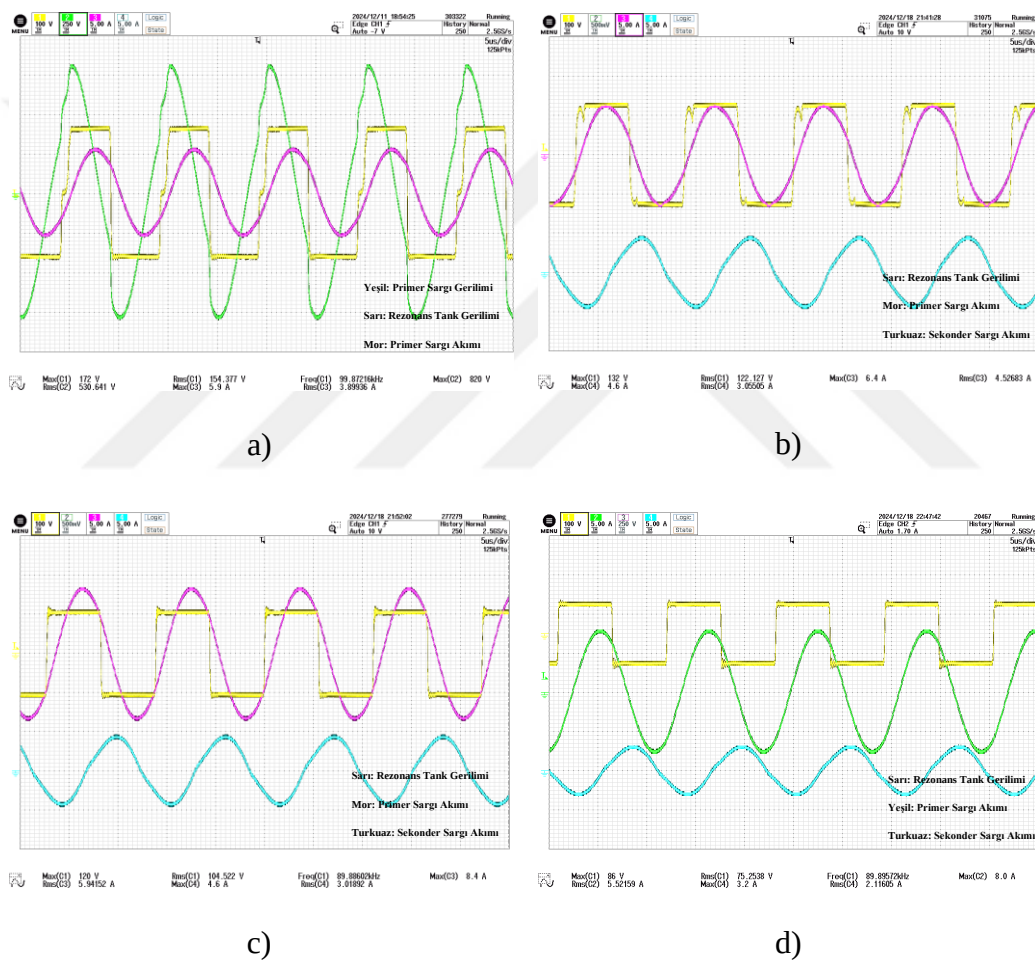


Şekil 4.12 Kablosuz enerji transferi deney düzeneği

4.7.1 500W Çalışma

Sistem çıkışında bulunan 47.25Ω sabit yük altında farklı hizalanma koşullarında 500W güç transferi gerçekleştirilmiştir.

Primer rezonans tank gerilimi ve sargı akımları Şekil 4.13'te verilmiştir. Bütün koşullar için rezonans tank gerilimi ile primer sargı akımı dalga şekilleri incelendiğinde, sistemin endüktif yapıda olduğu görülmektedir. Çünkü gerilim akımdan öndedir. Bu sayede primerde bulunan anahtarlar sıfır gerilim altında ilettime girmekte ve dolayısıyla yumuşak anahtarlama sağlanmaktadır.



Şekil 4.13 500W çıkış gücü için rezonans tank gerilimi ve primer sekonder sargı akımları a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4

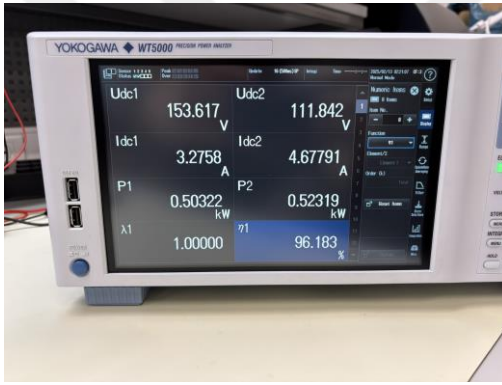
Girişten çekilen akım, gerilim ve güç ile yüke aktarılan gerilim, akım ve güç değerleri Şekil 4.14'te verilmiştir.



a)



b)



c)



d)

Şekil 4.14 500W çıkış gücü için giriş ve çıkış akım ve gerilimleri a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4

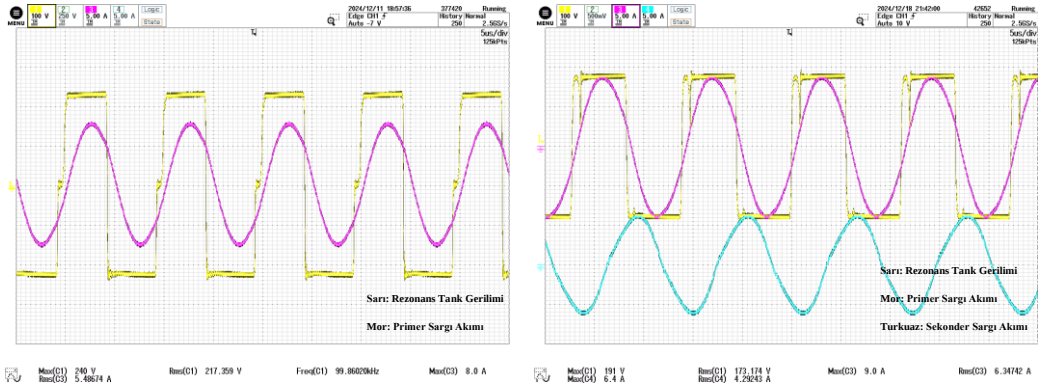
Elde edilen sonuçlara göre en yüksek verim %96.47 ile Çalışma #1'de, en düşük verim %95.82 ile Çalışma #4'te elde edilmiştir.

4.7.2 1000W Çalışma

Sistem çıkışında bulunan 47.25Ω sabit yük altında farklı hizalanma koşullarında 1000W güç transferi gerçekleştirilmiştir.

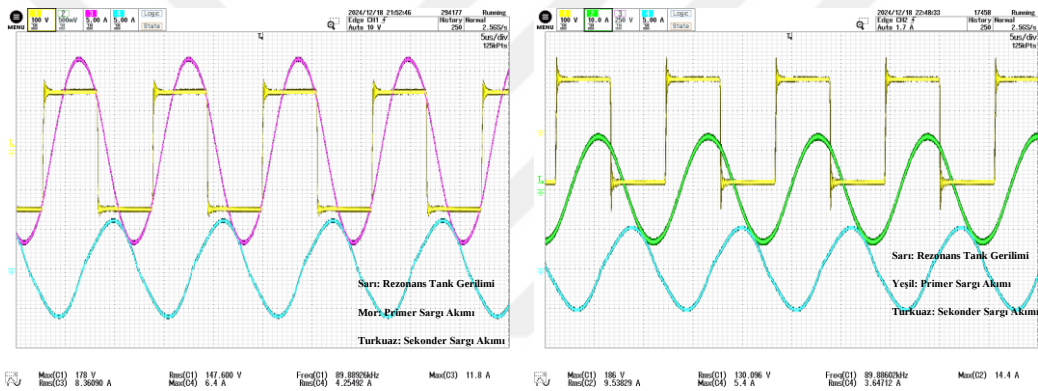
Primer rezonans tank gerilimi ve sargı akımları Şekil 4.15'te verilmiştir. Bütün koşullar için rezonans tank gerilimi ile primer sargı akımı dalga şekilleri incelendiğinde, sistemin endüktif yapıda olduğu görülmektedir. Çünkü gerilim

akımdan öndedir. Bu sayede primerde bulunan anahtarlar sıfır gerilim altında ilettime girmekte ve dolayısıyla yumuşak anahtarlama sağlanmaktadır.



a)

b)

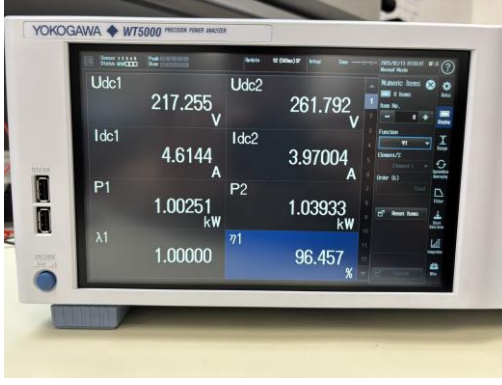


c)

d)

Şekil 4.15 1000W çıkış gücü için rezonans tank gerilimi ve primer sekonder sargı akımları a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4

Girişten çekilen akım, gerilim ve güç ile yüke aktarılan gerilim, akım ve güç değerleri Şekil 4.16’da verilmiştir.



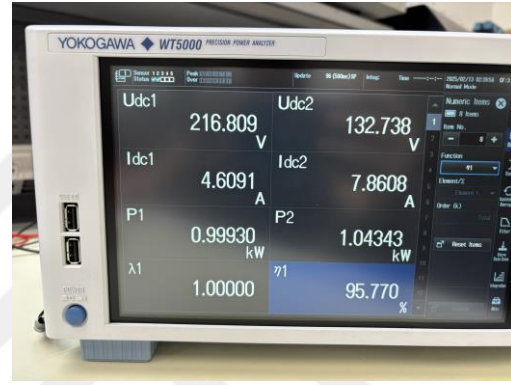
a)



b)



c)



d)

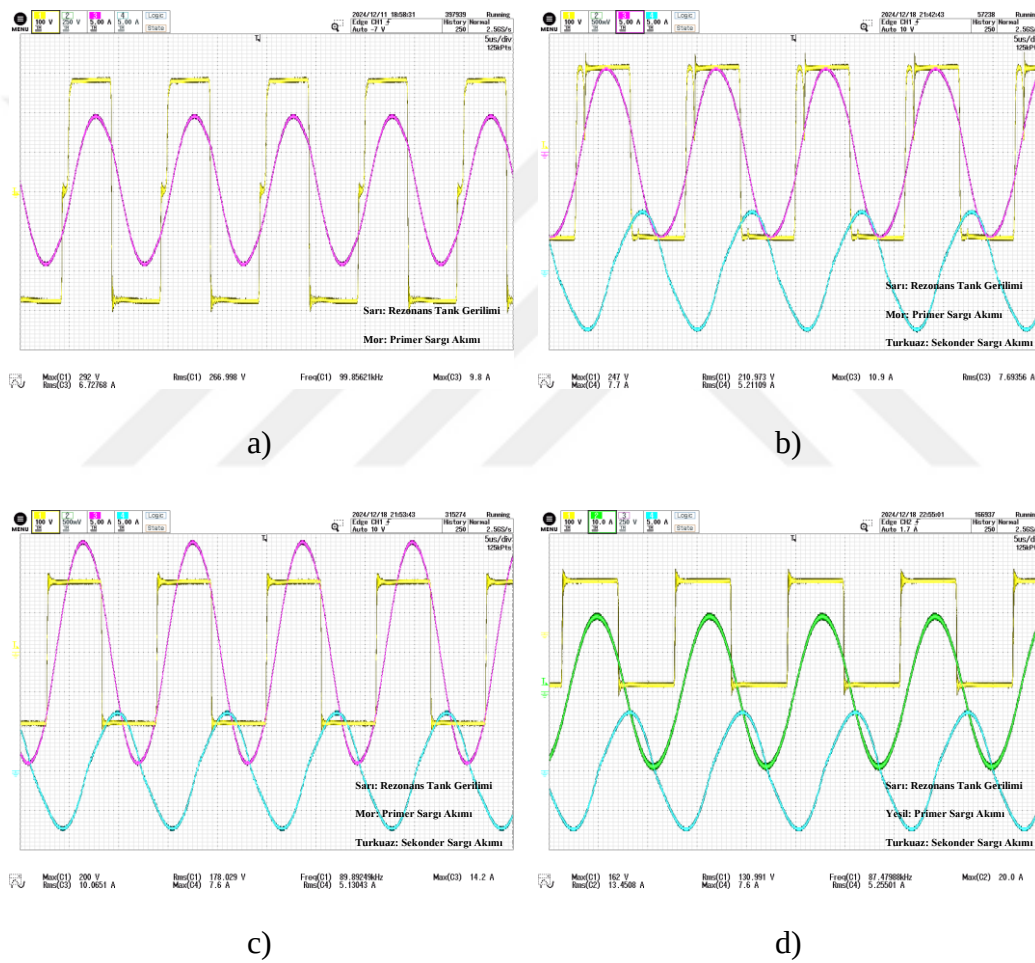
Şekil 4.16 1000W çıkış gücü için giriş ve çıkış akım ve gerilimleri a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek verim %97 ile Çalışma #2’de, en düşük verim %95.77 ile Çalışma #4’te elde edilmiştir.

4.7.3 1500W Çalışma

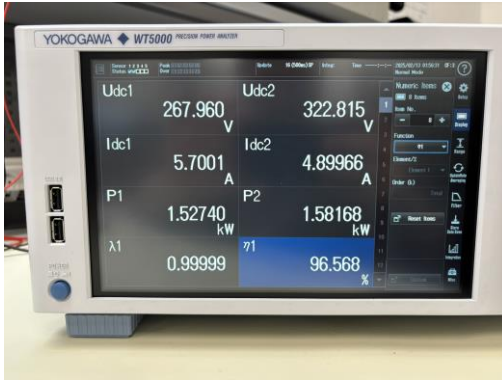
Sistem çıkışında bulunan 47.25Ω sabit yük altında farklı hizalanma koşullarında 1500W güç transferi gerçekleştirilmiştir.

Primer rezonans tank gerilimi ve sargı akımları Şekil 4.17’de verilmiştir. Bütün koşullar için rezonans tank gerilimi ile primer sargı akımı dalga şekilleri incelendiğinde, sistemin endüktif yapıda olduğu görülmektedir. Çünkü gerilim akımdan öndedir. Bu sayede primerde bulunan anahtarlar sıfır gerilim altında ilettime girmekte ve dolayısıyla yumuşak anahtarlama sağlanmaktadır.



Şekil 4.17 1500W çıkış gücü için rezonans tank gerilimi ve primer sekonder sargı akımları a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4

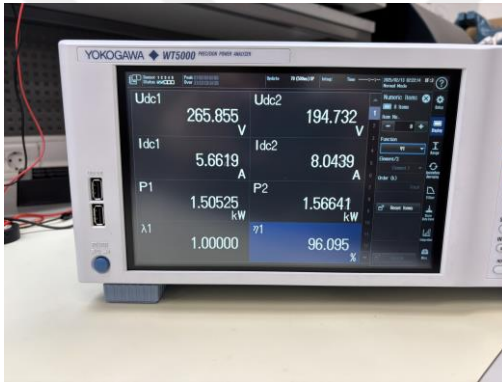
Girişten çekilen akım, gerilim ve güç ile yüke aktarılan gerilim, akım ve güç değerleri Şekil 4.18’de verilmiştir.



a)



b)



c)



d)

Şekil 4.18 1500W çıkış gücü için giriş ve çıkış akım ve gerilimleri a) Çalışma #1, b) Çalışma #2, c) Çalışma #3, d) Çalışma #4

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek verim %96.97 ile Çalışma #2’de, en düşük verim %95.75 ile Çalışma #4’te elde edilmiştir.

5 SONUÇ

Elektrikli araç teknolojilerinin en önemli bileşenlerinden biri olan şarj sistemleri, her geçen gün daha iyi performans sunacak şekilde gelişmektedir. Günümüzde her ne kadar kablolu şarj sistemleri yaygın olarak kullanılsa da bu çalışmada değinilen nedenlerden dolayı kablosuz şarj sistemlerinin yaygınlaşması yakın bir gelecekte mümkündür. Bunun için yüksek performansa sahip, uygun maliyetli kablosuz şarj sistemi çözümleri büyük önem arz etmektedir.

Kablosuz şarj sistemlerinin en önemli bileşenleri olan sargılar ve kompanzasyon topolojileri, tasarımcı tarafından detaylı bir şekilde ele alınmalı ve sistem gereksinimlerine göre modifiye edilmelidir.

Bu çalışma kapsamında elektrikli araç kablosuz şarj sistemlerinde kullanılabilecek 1.5 kW çıkış gücüne sahip dairesel sargılardan oluşan ve seri-seri kompanzasyon topolojisine sahip bir KET sistemi tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem performansı Ansys Maxwell 3D ve PSIM programları ile simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, teorik çalışmalarda elde edilen bulgular ile uyumludur. Tam yük altında yapılan simülasyon çalışmasına göre, en kötü hizalanma durumunda, 0.137 kuplaj katsayısı ve %92.4 verim elde edilmiştir. Diğer taraftan sargıların en iyi hizalandığı koşulda kuplaj katsayısı 0.349 değerine ulaşmış ve bu noktada %96.3 verim elde edilmiştir.

Simülasyon çalışması gerçekleştirilen sistemin deneysel çalışma kapsamında prototipi oluşturulmuş ve test edilmiştir. Fiziksel ölçümlerde sargılar arasındaki kuplaj katsayısında daha yüksek değerler elde edilmiştir. Yapılan güç testlerinde, sargıların kuplajının sistem verimini doğrudan etkilediği görülmektedir. En yüksek verime, kuplajın maksimum olduğu eş merkezlilik durumunda ulaşılmıştır. Kuplajın düşmesi ile birlikte sistem verimi de düşüş göstermiştir.

SAE J2954'te belirtilen hizalanma koşulları ışığında yapılan testlerde en kötü koşulda 1.5kW güç transferi %95.75 verim ile aktarılmıştır. En iyi koşulda ise 1.5kW güç transferi %96.57 verim ile aktarılmıştır. Bununla birlikte 1500W güç transferinde ulaşılan en yüksek verim değeri Çalışma #2'de gerçekleşmiştir ve %96.97 verim elde edilmiştir.

Tasarlanan sistem ile hedeflenen güç transferi yüksek verimlilikle aktarılabilmektedir. Bu durum KET sistemlerinin kablolu sistemler ile verim açısından yarışabilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte tasarlanan sistemin maliyet ve boyut açısından optimizasyonunun yapılması önemlidir.



- [1] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544–554, Feb. 2011, doi: 10.1109/tie.2010.2046002.
- [2] W. Zhang and C. C. Mi, "Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4768–4778, Jun. 2016, doi: 10.1109/tvt.2015.2454292.
- [3] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and C.-Y. Huang, "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 318–328, Jan. 2013, doi: 10.1109/tie.2011.2179274.
- [4] A. Zaheer, G. A. Covic, and D. Kacprzak, "A Bipolar Pad in a 10-kHz 300-W Distributed IPT System for AGV Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 7, pp. 3288–3301, Jul. 2014, doi: 10.1109/tie.2013.2281167.
- [5] S. Kim, A. Zaheer, G. Covic, and J. Boys, "Tripolar pad for inductive power transfer systems," in *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, Oct. 2014. Accessed: Feb. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/iecon.2014.7048947>
- [6] M. Budhia, G. Covic, and J. Boys, "A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, Nov. 2010, pp. 2487–2492. Accessed: Feb. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/iecon.2010.5675350>
- [7] T. Kan, T.-D. Nguyen, J. C. White, R. K. Malhan, and C. C. Mi, "A New Integration Method for an Electric Vehicle Wireless Charging System Using LCC Compensation Topology: Analysis and Design," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1638–1650, Feb. 2017, doi: 10.1109/tpel.2016.2552060.
- [8] O. H. Stielau and G. A. Covic, "Design of loosely coupled inductive power transfer systems," in *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)*, IEEE, pp. 85–90. Accessed: Feb. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/icpst.2000.900036>
- [9] S. Chopra and P. Bauer, "Analysis and design considerations for a contactless power transfer system," in *2011 IEEE 33rd International Telecommunications*

- Energy Conference (INTELEC)*, IEEE, Oct. 2011, pp. 1–6. Accessed: Feb. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/intlec.2011.6099774>
- [10] C.-S. Wang, O. H. Stielau, and G. A. Covic, “Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 5, pp. 1308–1314, Oct. 2005, doi: 10.1109/tie.2005.855672.
- [11] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, “Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544–554, Feb. 2011, doi: 10.1109/tie.2010.2046002.
- [12] A. Agcal, “Yeni Bir Kapalı Çevrim Algoritmali Yüksek Verimli Kablosuz Enerji Transferi Sistemi Tasarımı Ve Uygulaması,” 2017.
- [13] Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, S. Abe, and T. Yasuda, “Compact contactless power transfer system for electric vehicles,” in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -, IEEE, Jun. 2010. Accessed: Feb. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ipecc.2010.5543313>
- [14] A. Pevere, R. Petrella, C. C. Mi, and Shijie Zhou, “Design of a high efficiency 22 kW wireless power transfer system for EVs fast contactless charging stations,” in *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, IEEE, Dec. 2014, pp. 1–7. Accessed: Feb. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ievc.2014.7056221>
- [15] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, “Design and optimisation of magnetic structures for lumped Inductive Power Transfer systems,” in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, IEEE, Sep. 2009, pp. 2081–2088. Accessed: Feb. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ecce.2009.5316197>
- [16] D. H. Tran, V. B. Vu, and W. Choi, “Design of a High-Efficiency Wireless Power Transfer System With Intermediate Coils for the On-Board Chargers of Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 1, pp. 175–187, Jan. 2018, doi: 10.1109/tpel.2017.2662067.
- [17] Y. H. Sohn, B. H. Choi, E. S. Lee, G. C. Lim, G.-H. Cho, and C. T. Rim, “General Unified Analyses of Two-Capacitor Inductive Power Transfer Systems: Equivalence of Current-Source SS and SP Compensations,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6030–6045, Nov. 2015, doi: 10.1109/tpel.2015.2409734.
- [18] M. Yilmaz and P. T. Krein, “Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2151–2169, May 2013, doi: 10.1109/tpel.2012.2212917.
- [19] S. Lukic and Z. Pantic, “Cutting the Cord: Static and Dynamic Inductive Wireless Charging of Electric Vehicles,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 57–64, Sep. 2013, doi: 10.1109/mele.2013.2273228.
- [20] M. Safayatullah, M. T. Elrais, S. Ghosh, R. Rezaii, and I. Batarseh, “A Comprehensive Review of Power Converter Topologies and Control Methods

- for Electric Vehicle Fast Charging Applications,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 40753–40793, 2022, doi: 10.1109/access.2022.3166935.
- [21] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis, and C. Cecati, “Wireless Power Transfer—An Overview,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1044–1058, Feb. 2019, doi: 10.1109/tie.2018.2835378.
- [22] Siqi Li and C. C. Mi, “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4–17, Mar. 2015, doi: 10.1109/jestpe.2014.2319453.
- [23] A. Ahmad, M. S. Alam, and R. Chabaan, “A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 38–63, Mar. 2018, doi: 10.1109/tte.2017.2771619.
- [24] J. T. Boys, G. A. Covic, and A. W. Green, “Stability and control of inductively coupled power transfer systems,” *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 147, no. 1, p. 37, 2000, doi: 10.1049/ip-epa:20000017.
- [25] G. A. Covic and J. T. Boys, “Inductive Power Transfer,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289, Jun. 2013, doi: 10.1109/jproc.2013.2244536.
- [26] S. Y. R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee, “A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4500–4511, Sep. 2014, doi: 10.1109/tpel.2013.2249670.
- [27] A. Pashaei, E. Aydın, M. Polat, E. Yıldırım, and M. Aydemir, “Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri,” *EMO Bilimsel Dergi*, vol. 6, no. 11, pp. 1–11, Jun. 2016.
- [28] C.-S. Wang, G. A. Covic, and O. H. Stielau, “Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 148–157, Feb. 2004, doi: 10.1109/tie.2003.822038.
- [29] J. Bing, T. Longzhao, Y. Zihao, W. Lieyue, and L. Guorong, “A Novel Distance Measurement Method Based on Reflected Impedance for Resonant Wireless Power Transmission System,” in *2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*, IEEE, May 2020, pp. 1–5. Accessed: Feb. 19, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/aeees48850.2020.9121404>
- [30] M. Kazmierkowski and A. Moradewicz, “Unplugged But Connected: Review of Contactless Energy Transfer Systems,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 47–55, Dec. 2012, doi: 10.1109/mie.2012.2220869.
- [31] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, and P. T. Balsara, “Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 3–37, Mar. 2018, doi: 10.1109/tte.2017.2780627.
- [32] S. L. Ho, J. Wang, W. N. Fu, and M. Sun, “A Comparative Study Between

- Novel Witricity and Traditional Inductive Magnetic Coupling in Wireless Charging,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 5, pp. 1522–1525, May 2011, doi: 10.1109/tmag.2010.2091495.
- [33] W. Zhong, D. Xu, and R. S. Y. Hui, *Wireless Power Transfer: Between Distance and Efficiency*. Springer Nature, 2020.
- [34] H. L. Li, A. P. Hu, G. A. Covic, and C. S. Tang, “Optimal coupling condition of IPT system for achieving maximum power transfer,” *Electronics Letters*, vol. 45, no. 1, pp. 76–77, Jan. 2009, doi: 10.1049/el:20091886.
- [35] A. Berger, M. Agostinelli, S. Vesti, J. A. Oliver, J. A. Cobos, and M. Huemer, “A Wireless Charging System Applying Phase-Shift and Amplitude Control to Maximize Efficiency and Extractable Power,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6338–6348, Nov. 2015, doi: 10.1109/tpel.2015.2410216.
- [36] Chih-Jung Chen, Tah-Hsiung Chu, Chih-Lung Lin, and Zeui-Chown Jou, “A Study of Loosely Coupled Coils for Wireless Power Transfer,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 57, no. 7, pp. 536–540, Jul. 2010, doi: 10.1109/tcsii.2010.2048403.
- [37] A. W. Green, “10 kHz inductively coupled power transfer - concept and control,” in *Proceedings of 5th International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives*, IEE, 1994, pp. 694–699. Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp:19941049>
- [38] SAE (Society of Automotive Engineers), “J2954 Standard is a Constantly Updated Standard for Electric Vehicles and Plug-In Hybrid Electric Vehicles in the Power Ranges from 3.7 kW to 22 kW.” SAE: Atlanta, GA, USA, 2020.
- [39] I. Villar, “Multiphysical Characterization of Medium-Frequency Power Electronic Transformers,” Lausanne, EPFL, 2010.
- [40] B. Fincan, “Elektrikli Araçlar için Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [41] P. L. Dowell, “Effects of eddy currents in transformer windings,” *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 113, no. 8, p. 1387, 1966, doi: 10.1049/piee.1966.0236.
- [42] M. Bartoli, N. Noferi, A. Reatti, and M. K. Kazimierczuk, “Modeling Litz-wire winding losses in high-frequency power inductors,” in *PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, IEEE, pp. 1690–1696. Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/pesc.1996.548808>
- [43] R. P. Wojda and M. K. Kazimierczuk, “Winding resistance of litz-wire and multi-strand inductors,” *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 257–268, Feb. 2012, doi: 10.1049/iet-pel.2010.0359.
- [44] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [45] S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen, and C. C. Mi, “A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 6, pp. 2261–2273, Jun. 2015, doi: 10.1109/tvt.2014.2347006.

- [46] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, Jul. 2007, doi: 10.1126/science.1143254.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. İ. Aslan ve A. H. Obdan “Elektrikli Araçlar İçin Kablolu ve Kablosuz Şarj Sistemlerinin Karşılaştırılması,” 7. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi, İstanbul, Türkiye, 25-26 Mayıs, 2024, pp. 252-259.

Makaleler

1. Aslan, I., & Hulya Obdan, A. (2024). Design Optimization of Circular Coils in Wireless Electric Vehicle Charging Systems. In Journal of Magnetism (Vol. 29, Issue 4, pp. 358–368). The Korean Magnetism Society. <https://doi.org/10.4283/jmag.2024.29.4.358>