



Elektrikli Araçların Kablosuz Güç İletimi ile Şarj Edilmesi

Charging of Electric Vehicles with Wireless Power Transmission

Ömer Faruk TEL^{1*}, Şule KUŞDOĞAN²

¹Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği, Kocaeli, 41380, Türkiye, **Orcid Id:** 0000-0003-0041-3596

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, 41380, Türkiye, **Orcid Id:** 0000-0003-0586-4142

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 04/02/2019

Kabul Tarihi : 16/04/2019

Anahtar Kelimeler

Bobin Tasarımı ve Kriterleri
Devre Analizi
Elektrikli Araçlar
Kablosuz Şarj
Rezonans Devre

Özet

Teknolojinin hızla ilerlemesi elektrikli araçların hayatımıza girmesinde önemli rol oynamaktadır. Kablosuz güç iletim sistemlerinin son zamanlarda yaygınlaşması, elektrikli araçların kablosuz şarj edilmesinin önemini arttırmaktadır. Elektrikli araçların kablosuz güç iletimi ile şarj edilmesi çalışmada, bobinlerin bağlantı faktörünü artırarak yüksek verimli rezonans devre yapısının oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmada, bobinlerin bağlantı faktörünü etkileyen parametreler ve bakır kayıpları incelenerek uygun bobin seçimi yapılmıştır. Kablosuz güç iletim sistemi için basitleştirilmiş yapı oluşturularak, seçilen bobin yapısının simülasyonu Ansys Maxwell programı ile yapılmıştır. Ansys Maxwell Simplorer programında oluşturulan sistemin simülasyonu, 15 cm mesafede % 86,53 verim elde edilerek gerçekleştirilmiştir.

Research Paper

Received Date : 04/02/2019

Accepted Date : 16/04/2019

Keywords

Circuit Analysis
Electric Vehicles
Inductance Design and Criteria
Resonance Circuit
Wireless Charging

Abstract

The rapid advance of technology plays an important role in the entry of electric vehicles into our lives. The recent expansion of wireless power transmission systems increases the importance of wireless charging of electric vehicles. In the operation of charging electric vehicles with wireless power transmission, it is aimed to create a high efficiency resonance circuit structure by increasing the connection factor of the coils. In this study, the parameters affecting the connecting factor of the coils and copper losses were examined and the appropriate coil selection was made. Simplified structure for the wireless power transmission system was created and the selected coil structure was simulated by Ansys Maxwell program. The simulation of the system created in the Ansys Maxwell Simplorer program was achieved with a yield of 86.53% at a distance of 15 cm.

1. Giriş

Özellikle 2000'li yılların başlarına doğru çok büyük ilgi odağı haline gelen kablosuz güç iletimi, günümüzde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Kablosuz güç iletiminin temelleri uzun yıllar önce Nikola Tesla tarafından atılmıştır. Nikola Tesla'nın yıllar önce yaptığı çalışmalar, günümüzde kullanılan bütün kablosuz güç iletimi çalışmalarına öncülük etmiştir. Son yıllarda telefon firmalarının üzerinde durduğu kablosuz güç iletimi, günümüzde kullanılan elektrikli araçların şarj edilmesinin

de altyapısını oluşturmaktadır. Kablosuz güç iletimi günlük hayatta kullanılan birçok elektronik aletin şarj edilmesi için kullanılmıştır [1]. Piyasada kullanılan ürünlerin yanı sıra dizüstü bilgisayar, cep telefonu ve tıraş makineleri gibi küçük boyutlu elektronik ürünlerde kablosuz güç iletimi ile şarj sağlanmaktadır [2]. Günümüzde ve ileri zamanlarda güç elektroniğinin ve batarya teknolojisinin daha ileri seviyelere gelmesi, yaşamımızda kablosuz şarjın çok sık görülmesini sağlayacaktır.

Elektrikli araçlar ile içten yanmalı motora sahip araçların verimlilikleri karşılaştırılırsa, elektrikli araçların verimi çok daha fazladır. Son yıllarda elektrikli araçlara olan ilginin bu kadar hızlı artış göstermesinin başlıca

* Sorumlu Yazar (Correspondin Author): omerfaruktel61@gmail.com



sebebi verimlilik olsa da, bu elektrikli araçların enerji ve şarj problemlerinin fazla olması kullanımını zorlaştırmaktadır. Elektrikli araçların bataryalarının yapısı ile yol alacağı mesafe doğrudan ilişkili olduğundan uygun batarya seçimi çok fazla önem arz etmektedir. Elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme özelliği sayesinde frenlenme anında bataryaların şarj edilmesi sağlanabilmektedir. Bu yöntem sayesinde bataryaların yolculuk boyunca daha verimli çalışmasına katkı sağlanmaktadır. Elektrikli araçlar dünyanın farklı yerlerinde farklı standartlarda şarj edilmektedir. Avrupa ve Çin’de kullanılan IEC 61851 standartının akım, gerilim ve faz değerleri Tablo 1’de verilmektedir [3]. Türkiye de Avrupa ile aynı standartları kullanmaktadır.

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya türlerinin arasında ilk tercih edilen lityum iyon bataryalardır. Bu bataryaların tercih edilme sebeplerinin başında enerji yoğunluğu ve çevrim ömrü gelmektedir. Diğer batarya türleri ile kıyaslandığında lityum iyon batarya daha verimli performans verdiği için elektrikli araçlarda tercih edilmektedir. Kablosuz güç iletim sistemi modelinde birinci bobin uçlarından geçen akımın oluşturduğu manyetik alan çizgileri, alıcı kısımda yer alan ikinci bobinden geçmektedir. Birinci bobin uçlarından geçen akımın alternatif akım olması manyetik alanın değişken olmasını sağlamaktadır. Değişken manyetik alanda meydana gelen akı ikinci bobin uçlarında gerilim oluşturmaktadır. Kablosuz güç iletiminde karşılaşılan en önemli problem sistem verimliliğinin düşük olmasıdır. Tasarlanan bobinlerin kaliteleri sistem verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Kablosuz güç iletim sisteminde bulunan devre topolojileri besleme kaynaklarının çeşidine göre farklılık göstermektedir. Bataryaların şarj edilmesi için gerekli olan gerilim DA dönüştürücü devresi yardımıyla sabit değerde tutulur. Burada bir kaç farklı metot kullanılmaktadır. Sıradan DA çeviricilerin dışında kontrol algoritması bulunan çevirici modellerinde, rezonans devresindeki gerilim değişimleri PI denetleyicinin DA dönüştürücünün doluluk oranını kontrol etmesiyle sabitlenebilmektedir.

2. Teorik Metot

Elektrikli araçların kablosuz şarj edilmesinde besleme kaynağı alternatif akım ise doğrultma devresinden doğru gerilim elde edilir. Giriş geriliminin maksimum değeri V_{max} , etkin değeri V_{etkin} ve doğrultulan gerilimin DA değeri V_{da} olduğunda tam dalga doğrultucu çıkışındaki gerilim Eşitlik (1) ile elde edilir [4].

$$V_{da} = \frac{2 \cdot V_{max}}{\pi} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{etkin}}{\pi} \quad (1)$$

Şekil 1’de kablosuz şarj sisteminin genel yapısı verilmektedir. Doğru gerilim, evirici yapısı kullanılarak kare dalga formunda alternatif gerilime dönüştürülür. Böylece rezonans devresinde bobinlerin iletim sağlayabilmesi için gerekli olan gerilim elde edilir. Seri rezonans devresinin yapısı $X_L = X_C$ eşitliği sağlanarak sistemin rezonans frekansı Eşitlik (2) kullanılarak belirlenebilmektedir [5].

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (2)$$

Rezonans devre frekansı kablosuz şarj sistemlerinde kullanılan güç iletim yöntemine göre farklılık gösterilmektedir. Kablosuz şarj yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 2’de verilmektedir [6].



Şekil 1. Kablosuz şarj sistemi.

Tablo 1. IEC61851 standartının elektriksel büyüklükleri [3].

	Şarj Yöntemi	Faz Sayısı	Anma Gerilimi (V)	Maksimum Akım (A)
AC	Mod 1	1	≤ 250	≤ 16
		3	≤ 480	
	Mod 2	1	≤ 250	≤ 32
		3	≤ 480	
	Mod 3	1	≤ 250	≤ 250
		3	≤ 480	
DC	Mod 4	-	≤ 1000	≤ 400

Tablo 2. Kablosuz şarj yöntemlerinin karşılaştırılması [6] (EMI: Elektromanyetik girişim).

Güç İletimi	Performans			Maliyet	Boyut / Hacim	Sistem Zorluğu	Güç Seviyesi
	Verim	EMI	Frekans				
Endüktif	Orta	Orta	10 - 50 kHz	Orta	Orta	Orta	Orta / Yüksek
Kapatif	Düşük	Orta	100 - 500 kHz	Düşük	Düşük	Orta	Düşük
Sürekli Miknatıslı	Düşük	Yüksek	100 - 500 Hz	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta / Düşük
Rezonans Endüktif	Orta	Düşük	1 - 20 MHz	Orta	Orta	Orta	Orta / Düşük
Çevrimiçi Endüktif	Orta	Orta	10 - 50 kHz	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek
Rezonans Antenler	Orta	Orta	100 - 500 kHz	Orta	Orta	Orta	Orta / Düşük

2.1. Rezonans Devre Kriterleri

Rezonans devrelerde 2 tane çok önemli faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerden ilki ortak endüktans değeridir. Ortak endüktans ifadesindeki k , bağlantı faktörünün değeridir ve sistem verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Ortak endüktans ifadesinin değeri arttıkça alıcı rezonans devresinde elde edilen gerilim değeri de artmaktadır. Ortak endüktansın bağlantı faktörü ile olan ilişkisi Eşitlik (3)'te verilmektedir [5].

$$M=k*\sqrt{L_1*L_2} \quad (3)$$

İkinci bobin üzerinde birikecek olan gerilimin bağlantı faktörü ile ilişkisi Eşitlik (4)'te verilmektedir [5].

$$V_2=V_1*k*\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (4)$$

Bağlantı faktörünün hesaplanmasında Ansys Maxwell programı kullanılmıştır. Bağlantı faktörünü bulmanın diğer yöntemi, bobinler arası mesafenin bobinlerin yarıçaplarına

oranlanmasıyla hesaplanmaktadır [7]. Rezonans devrenin diğer önemli kısmı kalite faktörüdür. Bobinlerin yüksek kalitede olması güç iletiminde verimin yüksek değerlere çıkmasını sağlamaktadır. Bobinlerin kalitesinin artırılmasının getirdiği dezavantajları da vardır. Kalite faktörünün ifadesi Eşitlik (5)'te verilmektedir [5].

$$Q=\frac{w*L}{R} \quad (5)$$

Yüksek kalite faktörü beraberinde yüksek kondansatör gerilimini oluşturmaktadır. Bu yüzden çok yüksek kalite faktörlerine çıkıldığında rezonans kondansatörün gerilimini de büyümek gerekir. Yapılan çalışmalara göre kablosuz güç iletim sistemlerinde frekansın elektrikli araç uygulamaları için 10-150 kHz arasında seçilmesinin daha verimli olduğu görülmektedir [8], [9].

2.2. Bobin Tasarımında Nüvenin Etkisi

Kablosuz güç iletiminde simülasyonu gerçekleştirilen nüve yapılarının bağlantı faktörüne etkileri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Nüve yapısının parametrelere etkisi.

Parametreler	Nüvesiz Sistem	Kare Nüve	Kare Nüve	Gözlü Nüve	Çubuk Nüve
Mesafe (mm)	150	150	150	150	150
Nüve Kalınlığı (mm)	-	10	20	10	10
Sarım Sayısı	13	13	13	13	12
Alüminyum Kalınlığı (mm)	10	10	10	10	10
L_{Tx} (μ H)	167,072	411,5033	415,6927	372,3722	34.622602
M (μ H)	19,14708	55,78301	57,25627	76,29138	7.698559
L_{Rx} (μ H)	212,7175	149,2033	150,5418	376,4344	34.417402
k Sabiti	0,101566	0,225126	0,22888	0,203771	0.223018

Tablo 3'te verilen L_{Tx} verici bobin endüktansı, L_{Rx} alıcı bobin endüktansı ve M ortak endüktansı göstermektedir. Tablo 3'te yer alan 5 adet farklı özelliklerdeki nüve yapıları incelendiğinde, nüvenin sisteme eklenmesi bağlantı faktörünü büyük miktarda

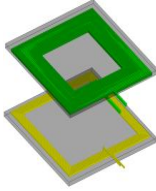
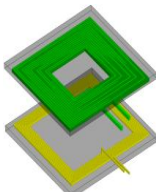
arttırmaktadır. Ayrıca bobin kalınlığının artması endüktansın artmasına ve bağlantı faktörünün artmasına katkı sağlamaktadır. 2 ve 4 numaralı bobin yapılarının karşılaştırılması yapılsa, tam nüve yapısı gözlü nüve yapısına göre daha yüksek bağlantı faktörüne ve ağırlığa

sahiptir. Ağırlığın daha önemli olduğu yerlerde çubuk nüve yapısı tercih edilmelidir. Yapılacak tasarımda çubuk nüve yapısı kullanılmaktadır. Ansys Maxwell programında simülasyonu yapılan sistemlerde kullanılan nüve yapısının manyetik geçirgenliği 1000, iletkenlik değeri ise 0,01 siemens/m verilmektedir.

2.3. Bobin Tasarımında Boyut Seçimi

Elektrikli araçlardaki kablosuz şarj cihazının tasarımı yapılırken, devrenin ikinci kısmının araç üzerinde yer alması modelin tasarımında boyut kısıtlamasına yol açmaktadır. Bu nedenle uygun bobin seçimi yapılırken endüktans, kesit, bakır uzunluğunun yanında bobin boyutları da dikkate alınmalıdır. Aynı sarım sayısı için bobinlerin boyutlarının azalması bobinlerin endüktans değerlerini azaltmaktadır. Ayrıca bobinler için gereken bakır uzunluğu ve direnci de azalırken, sistem verimliliğini etkileyen k sabiti de azalmaktadır. Tablo 4’te aynı yapıdaki iki sistemin, boyutlarındaki değişimin endüktans ve bağlantı faktörüne etkisi verilmektedir. Tablo 4’te verilen r_{Tx} verici bobin yarıçapını, r_{Rx} ise alıcı bobin yarıçapını belirtmektedir.

Tablo 4. Bobin boyutlarının parametrelere etkisi.

Sistem Özellikleri			
$r_{Tx}=4$ mm	$r_{Rx}=4$ mm	$N_{Tx}=8$	$N_{Rx}=13$
Sarımlar Arası Mesafe 0.5 mm		Nüve Kalınlığı 10 mm	
1. Sistem Bobinlerin Boyutları (400 mm * 400 mm)			
	Mesafe	30 mm	60 mm
	L_{Tx} (μ H)	213,0116	167,4246
	M (μ H)	176,5803	95,36981
	L_{Rx} (μ H)	263,5638	186,5146
	k Sabiti	0,745243	0,539691
2. Sistem Bobinlerin Boyutları (300 mm * 300 mm)			
	Mesafe	30 mm	60 mm
	L_{Tx} (μ H)	138,5771	110,2778
	M (μ H)	101,0274	52,27142
	L_{Rx} (μ H)	142,9192	103,8257
	k Sabiti	0,717874	0,488504

Tablo 5’te eni 400 mm olan bobinlerin, boyutlarındaki değişimin bağlantı faktörüne etkisi simülasyon sonuçları ile verilmektedir. Tablo 5’te verilen sonuçlara göre bobin boyutlarının artması k sabitini arttırmaktadır.

Tablo 5. Bobin boyunun değişiminin parametrelere etkisi.

Boy (mm)	350	370	390	410	430	450	470
k sabiti	0,275770	0,287575	0,298076	0,307006	0,315195	0,322142	0,328723
Boy (mm)	490	510	530	550	570	590	600
k sabiti	0,334122	0,338453	0,342859	0,346912	0,350826	0,353428	0,354676

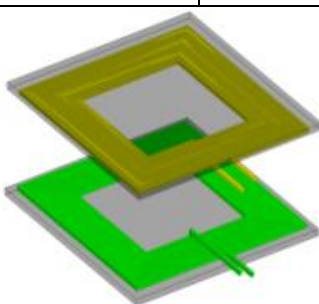
2.4. Bobin Tasarımında Kesit Seçimi

Kablosuz güç iletim sistemlerinde kablo kalınlığı bobin tasarımını önemli ölçüde etkilemektedir. Bobinlerin elektriksel dirençlerine bakıldığında bobin kesitinin artması, bobinin direncinin azalmasını sağlar. Bobin kesitinin değişimi endüktans ile ters orantılı, k sabiti ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bobin kalınlığı arttıkça üretilecek sistemin maliyeti de artacaktır. Bu yüzden uygun bir bobin kalınlığı belirlenmelidir. Bobinlerde yüksek frekanstan oluşan deri etkisini azaltmak için, belirlenen bobin kalınlığını sağlayacak litz teller kullanılmalıdır. Tablo 6’da sabit sarım sayısına sahip bobinlerin, farklı kesitlerdeki parametre değerleri yapılan simülasyonda verilmektedir.

2.5. Sarımlar Arası Mesafenin Etkisi

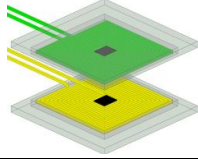
Bobin sarımlarını arasındaki mesafeyi çok fazla çoğaltmak sistemi olumsuz etkiler. Bu nedenle sarımlar arası mesafeyi kısa tutarak bobin boyutlarının ufak olması sağlanır.

Tablo 6. Bobin kesitlerinin parametrelere etkisi.

Sistem Özellikleri				
Nüve Kalınlığı 10 mm			$N_{Tx}=13$	
Sarımlar Arası Mesafe 0,5 mm			$N_{Rx}=13$	
				
Kesit	$r_{Tx}=3$ mm		$r_{Rx}=4$ mm	
Mesafe	30 mm	60 mm	30 mm	60 mm
L_{Tx} (μ H)	256,2049	184,6055	204,7794	146,6571
M (μ H)	218,7413	117,6299	178,4999	98,0429
L_{Rx} (μ H)	256,0911	184,0892	204,6909	146,2953
k Sabiti	0,853965	0,638089	0,871858	0,669344

Tablo 7’de sabit sarım sayısına sahip bobinlerin, sarımları arasındaki mesafenin değiştirilmesinin bağlantı faktörünü nasıl etkilediği simülasyon sonuçları ile verilmektedir. Tablo 7’de verilen simülasyon sonuçlarına göre sarım sayıları arasındaki mesafenin artması bağlantı faktörünü azaltmaktadır.

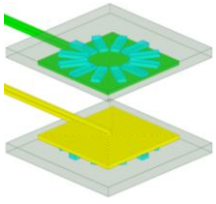
Tablo 7. Sarımlar arası mesafenin etkileri.

Sistem Özellikleri		
Nüve Kalınlığı 10 mm	$N_{Tx}=21$	$r_{Tx}=4$ mm
Alüminyum Kalınlığı 20 mm	$N_{Rx}=21$	$r_{Rx}=4$ mm
		
Sarımlar Arası Mesafe (mm)	Bağlantı Faktörü (k sabiti)	
1	0,275735	
2	0,276756	
3	0,275739	
4	0,273140	
5	0,269715	

2.6. Sarım Sayısının Bobin Tasarımına Etkisi

Bobin tasarımında en önemli kısımlardan birisi de bobinlerin sarım sayılarıdır. Sarım sayısının fazla olması endüktans değerini ve bobin direncini artırır. Tablo 8’de simülasyonu yapılan aynı yapıdaki bobinlerin, sarım sayılarının değişiminin parametrelere etkisi verilmektedir.

Tablo 8. Sarım sayısının parametrelere etkisi.

Çubuk Nüve Yapılı Sistem				
				
$r_{Tx}=r_{Rx}=4$ mm				
Alüminyum kalınlığı 20 mm				
Nüve Yapısı				
En 30 mm				
Yükseklik 10 mm				
Mesafe 150 mm				
Sarım Sayısı	L_{Tx} (µH)	M (µH)	L_{Rx} (µH)	k sabiti
6	3,904	0,223	3,862	0,057
8	9,591	1,021	9,525	0,106
10	19,517	3,186	19,383	0,163
12	34,622	7,698	34,417	0,223
14	55,901	15,628	55,631	0,280
16	84,621	28,170	84,280	0,333

Tablo 8’deki verilere göre sarım sayılarının artması bağlantı faktörünü çok büyük miktarda arttırmaktadır.

Tablo 8’de verilen sistemin Eddy Current analizi yapılarak direnç değeri ve bakır kaybı Tablo 9’da verilmektedir.

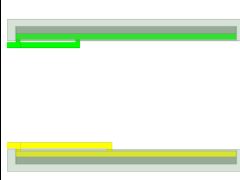
Tablo 9. Sarım sayısının bakır kaybına ve dirence etkisi.

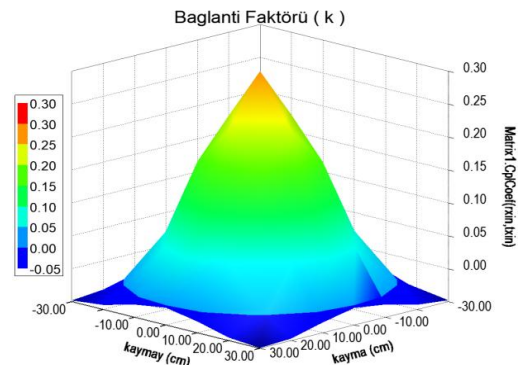
Sarım Sayısı	N = 14	N = 16
R_{Tx} (Ω)	0,02597	0,04265
R_{Rx} (Ω)	0,40927	0,06663
$P_{Bakır}$ (W)	61,981	104,23
k sabiti	0,280248	0,333567

2.7. Hizalanmasının Etkisi

Bobinlerin hizalanmasında kaymaların oluşması, bağlantı faktörüne çok ciddi etki etmektedir [10]. Bobinlerin doğru hizalanmamasının sonucunda bağlantı faktörü çok fazla azalarak alıcı kısımda elde edilen gerilimi düşürmektedir. Bu nedenle bobinlerin merkezleri tam olarak üst üste gelmesi gerekir. Hizalamada meydana gelen kaymaların matematiksel olarak sisteme etkileri denklemlerle bulunabilmektedir [11]. Hizalanmanın tam olarak yapılmaması durumunda, simülasyonu yapılan sistemde boyutları 400 mm * 400 mm olarak ayarlanan bobinlerdeki kaymanın ortak endüktans ve bağlantı faktörünü nasıl etkilediği Tablo 10’da verilmektedir.

Tablo 10. Kaymanın sistem parametrelerine etkisi.

Sistem Özellikleri			
			
Nüve Kalınlığı 10 mm			
Alüminyum Kalınlığı 10 mm			
Boyut 400 mm * 400 mm			
$r_{Tx}=r_{Rx}=4$ mm			
Mesafe 150 mm			
Kayma	-300 mm	0 mm	300 mm
L_{Tx} (µH)	158,074	159,246	158,028
M (µH)	-0,271	34,307	-0,325
L_{Rx} (µH)	116,733	117,538	116,674
k sabiti	-0,002	0,250	-0,002



Şekil 2. Hizalamının bağlantı faktörüne etkisi.

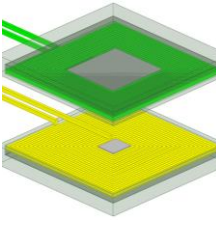
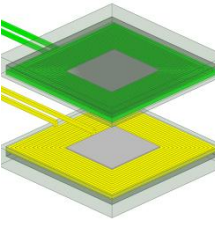
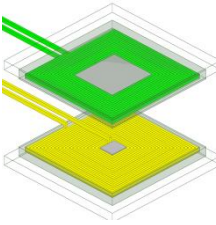
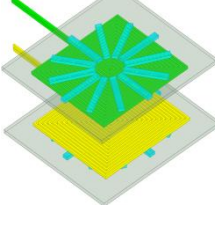
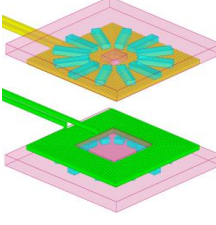
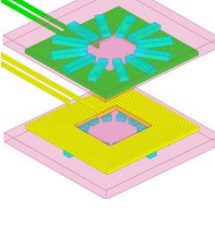
2.8. Maxwell Tasarımı İçin Bobin Seçimi

Kablosuz güç iletim sistemlerinde bobinlerin seçimi yapılırken kayıpların az olduğu sistemler tercih edilmektedir. Tercih edilen bobin tasarımında bakır kayıplarının düşük olması sistemin verimini arttırmaktadır. Tasarlanan sistemin yapısına göre bobinlerin direnç değerleri farklılık göstermektedir. Bobin tasarımında alüminyumun kalınlığına, alüminyum boyutuna, nüve yapısına, sarım sayısına, bobin çapına ve bobin uzunluğuna

dikkat edilmektedir. Ansys Maxwell programında oluşturulan 6 farklı sistemin Eddy Current analizi yapılarak direnç değerleri ve bakır kayıpları Tablo 11’de verilmektedir. Eddy Current analizi sonucunda bakır kaybı en az olan yapı dördüncü sistem olarak belirlenmektedir.

Tablo 10’daki verilere göre bobinlerin hizalarındaki kayma bağlantı faktörünü ve ortak endüktansı azaltmaktadır. Şekil 2’de verilen grafikte, Tablo 10’da kullanılan sistemin x ve y eksenlerindeki kaymasının etkileri verilmektedir.

Tablo 11. Bakır kayıplarının bobin seçimine etkisi (R_{Tx} : verici bobin direnci, R_{Rx} : alıcı bobin direnci, $P_{Bakır}$: bakır kaybı).

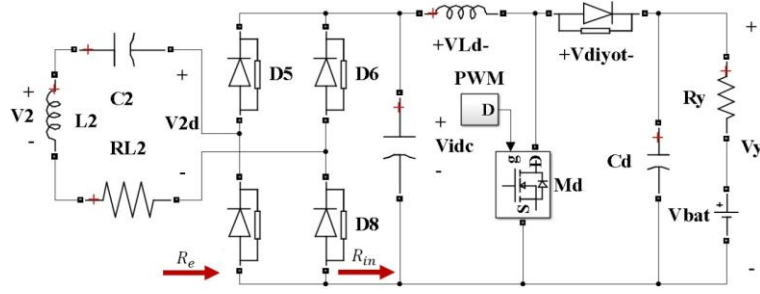
Bobin Tasarımı							
1. Sistem				2. Sistem			
	R_{Tx} (Ω)	N_{Tx}	Mesafe		R_{Tx} (Ω)	N_{Tx}	Mesafe
	0,43215	20	150 mm		0,21087	13	150 mm
	R_{Rx} (Ω)	N_{Rx}	$r_{Tx}=r_{Rx}$		R_{Rx} (Ω)	N_{Rx}	$r_{Tx}=r_{Rx}$
	0,70027	13	4 mm		0,57643	13	4 mm
	Alüminyum Kalınlığı	$P_{Bakır}$ (W)			Alüminyum Kalınlığı	$P_{Bakır}$ (W)	
	20 mm	1012,5			20 mm	789,8	
	Kare Nüve Kalınlığı	Boyut			Kare Nüve Kalınlığı	Boyut	
10 mm	40 cm * 40 cm		10 mm	40 cm * 40 cm			
Sarımlar Arası Mesafe 0,5 mm			Sarımlar Arası Mesafe 0,5 mm				
Alüminyum 44 cm * 44 cm			Alüminyum 44 cm * 44 cm				
3. Sistem				4. Sistem			
	R_{Tx} (Ω)	N_{Tx}	Mesafe		R_{Tx} (Ω)	N_{Tx}	Mesafe
	0,1843	20	150 mm		0,04265	16	150 mm
	R_{Rx} (Ω)	N_{Rx}	$r_{Tx}=r_{Rx}$		R_{Rx} (Ω)	N_{Rx}	$r_{Tx}=r_{Rx}$
	0,088415	13	4 mm		0,066634	16	4 mm
	Alüminyum Kalınlığı	$P_{Bakır}$ (W)			Alüminyum Kalınlığı	$P_{Bakır}$ (W)	
	20 mm	167,63			10 mm	104,23	
	Kare Nüve Kalınlığı	Boyut			Çubuk Nüve Boyutları	Boyut	
10 mm	40 cm * 40 cm		22 cm * 3 cm * 1 cm	58 cm * 58 cm			
Sarımlar Arası Mesafe 0,5 mm			Sarımlar Arası Mesafe 8 mm				
Alüminyum 64 cm * 64 cm			Alüminyum 71,8 cm * 71,8 cm				
5. Sistem				6. Sistem			
	R_{Tx} (Ω)	N_{Tx}	Mesafe		R_{Tx} (Ω)	N_{Tx}	Mesafe
	0,16785	13	150 mm		0,15631	13	150 mm
	R_{Rx} (Ω)	N_{Rx}	$r_{Tx}=r_{Rx}$		R_{Rx} (Ω)	N_{Rx}	$r_{Tx}=r_{Rx}$
	0,62602	20	4 mm		0,17891	13	4 mm
	Alüminyum Kalınlığı	$P_{Bakır}$ (W)			Alüminyum Kalınlığı	$P_{Bakır}$ (W)	
	20 mm	844			20 mm	262,77	
	Çubuk Nüve Boyutları	Boyut			Çubuk Nüve Boyutları	Boyut	
12 cm * 3 cm * 1 cm	40 cm * 40 cm		12 cm * 3 cm * 1 cm	40 cm * 40 cm			
Sarımlar Arası Mesafe 0,5 mm			Sarımlar Arası Mesafe 0,5 mm				
Alüminyum 50 cm * 50 cm			Alüminyum 50 cm * 50 cm				

2.9. Alıcı Devresinin Analizi

Kablosuz güç iletimi devresinde ikinci kısımda rezonans devresi, doğrultucu ve arttıran DA dönüştürücü devreleri bulunmaktadır. Şekil 3’te alıcı devresinin yapısı verilmektedir. Şekil 3’teki modelde verilen DA dönüştürücü modeli sistem tasarımına göre değişmektedir.

Arttıran DA dönüştürücü modelinin kablosuz güç iletim sistemlerinde kullanılması, bobinlerin hizalarının kayması gibi durumlarda çıkış gerilimini istenilen değerlerin üzerine çıkarmaktadır. Bu nedenle DA çevirici yapısında PI denetleyici kullanılarak, bobinler arası bağlantı faktörünün değişmesinden kaynaklanan çıkış

gerilimindeki değişimler engellenebilmektedir. Şekil 3'te alıcı devresine ait şema verilmektedir.



Şekil 3. Alıcı devre modeli.

Arttıran DA dönüştürücünün devre denklemlerine göre giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki bağlantı Eşitlik (6)'da verilmektedir [12]. Eşitlik (6)'da V_{idc} giriş gerilimi, V_y çıkış gerilimi, D ise doluluk oranını vermektedir.

$$\frac{V_y}{V_{idc}} = \frac{1}{1-D} \quad (6)$$

Devrenin yapısı gereği dönüştürücü bobininin değeri yüksek seçilerek bobindeki dalgalanmalar en az seviyeye indirilir. Endüktans değerinin en az değeri Eşitlik (7)'de elde edilmektedir [12].

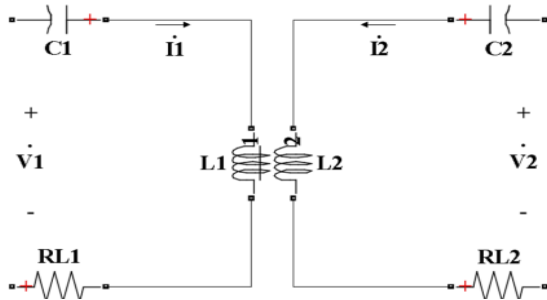
$$L_{min} = \frac{R \cdot D \cdot (1-D)^2}{2 \cdot f} \quad (7)$$

Dönüştürücünün çıkışında dalgalanmanın az olması için kondansatör değeri yüksek seçilmelidir. Kararlı bir çıkış elde edebilmek için seçilmesi gereken en düşük kondansatör değeri Eşitlik (8)'de verilmektedir [12].

$$C_{min} = \frac{D \cdot V_y}{\Delta V_{ripple} \cdot R_y \cdot f} \quad (8)$$

2.10. Sistem Modeli

Devre modelinin birinci kısmına ait gerilim ifadeleri daha önceki bölümlerde verilmektedir. Rezonans devresinin yapısı Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4. Rezonans devre modeli.

Şekil 4'te verilen V_1 ifadesi $V_1 = (2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{dc}) / \pi$, V_2 ifadesi ise $V_2 = (2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{idc}) / \pi$ olmaktadır. Rezonans devresinin analizi Eşitlik (9-12) kullanılarak Şekil 4'e göre elde edilmektedir.

$$0 = I_2 \cdot \left(R_2 + R_e + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) + j\omega M \cdot I_1 \quad (9)$$

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{j\omega M}{R_2 + R_e + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} \quad (10)$$

$$I_1 = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{dc}}{\pi} \cdot \frac{R_2 + R_e}{R_1 \cdot (R_2 + R_e) + (\omega M)^2} \quad (11)$$

$$I_2 = j \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{dc}}{\pi} \cdot \frac{\omega \cdot M}{R_1 \cdot (R_2 + R_e) + (\omega \cdot M)^2} \quad (12)$$

Eşitlik (9-12)'de verilen I_1 verici bobin akımı, I_2 alıcı bobin akımı, R_1 verici bobin direnci, R_2 alıcı bobin direnci, R_y yük direnci ve R_e DA dönüştürücünün giriş kısmından görülen direnç değeridir. Direncin hesaplanması Eşitlik (13) kullanılarak bulunur [13].

$$R_e = R_y \cdot (1-D)^2 \quad (13)$$

Bataryanın elektriksel devre modeli bir batarya ve direnç ile ifade edilmektedir. Sabit çıkış gerilimi ile bataryanın şarj edilebilmesi için PI denetleyici tasarımında kullanılacak olan transfer fonksiyonunun bulunması gerekmektedir. DA dönüştürücü denklemlerinden transfer fonksiyonu bulunurken anahtarın iletim ve kesim durumlarındaki devre çözümleri yapılır. Anahtarın kesimde olduğu durumlar Eşitlik (14, 15)'den elde edilmektedir.

$$V_L = V_{idc} - V_y = L \cdot \frac{dI_{Ld}}{dt} \quad (14)$$

$$C_d * \frac{dV_y}{dt} = I_{Ld} - \frac{V_y}{R_y} \quad (15)$$

Anahtarın iletimde olduğu durumlar Eşitlik (16, 17)'de verilmektedir.

$$V_L = V_{idc} = L * \frac{dI_{Ld}}{dt} \quad (16)$$

$$C_d * \frac{dV_y}{dt} = -\frac{V_y}{R_y} \quad (17)$$

Transfer fonksiyonu için ΔI_{Ld} ve ΔV_y ifadelerini bulmak gerekir. Eşitlik (16, 17)'deki denklemler anahtarın iletimde olduğu zaman D, kesimde olduğu zaman (1-D) ile çarpılarak düzenlenirse Eşitlik (18, 19) elde edilir.

$$V_L = V_{idc} + V_y * (D-1) \quad (18)$$

$$C_d * \frac{dV_y}{dt} = I_{Ld} * (1-D) - \frac{V_y}{R_y} \quad (19)$$

Eşitlik (18, 19)'dan faydalanarak ΔI_{Ld} ve ΔV_y ifadeleri Eşitlik (20, 21)'deki gibi elde edilir.

$$\frac{dI_{Ld}}{dt} = \frac{V_{idc}}{L} + \frac{V_y * (D-1)}{L} \quad (20)$$

$$\frac{dV_y}{dt} = \frac{I_{Ld} * (1-D)}{C_d} - \frac{V_y}{C_d * R_y} \quad (21)$$

Eşitlik (21)'den çıkış geriliminin türevi kullanılarak Eşitlik (20)'de ΔI_{Ld} ifadesinin yerine yazılır. Böylece ΔI_{Ld} ifadesinin çıkış gerilimi cinsinden ifadesi Eşitlik (22)'de verildiği gibi olmaktadır.

$$\frac{dI_{Ld}}{dt} = \frac{d^2 V_y}{dt^2} * \frac{C_d}{(1-D)} + \frac{dV_y}{dt} * \frac{1}{(1-D) * R_y} \quad (22)$$

Akımın türevi olan denklem ile elde edilen denklem eşitlenir.

$$\frac{V_{idc} + (V_y * (D-1))}{L} = \frac{d^2 V_y}{dt^2} * \frac{C_d}{(1-D)} + \frac{dV_y}{dt} * \frac{1}{(1-D) * R_y} \quad (23)$$

Gerilimin türevli ifadesini Eşitlik (23)'ten faydalanarak Eşitlik (24)'teki gibi elde edilir.

$$V_{idc} = \frac{d^2 V_y}{dt^2} * \frac{C_d * L}{(1-D)} + \frac{dV_y}{dt} * \frac{L}{(1-D) * R_y} + V_y * (1-D) \quad (24)$$

Laplace denklemi ve gerilim ifadesinden faydalanarak gerilim ifadesi Eşitlik (25)'deki gibi elde edilir.

$$V_{idc}(s) = s^2 * V_y(s) * \frac{C_d * L}{(1-D)} + s * V_y(s) * \frac{L}{(1-D) * R_y} + V_y(s) * (1-D) \quad (25)$$

Transfer fonksiyonunun hesaplanmasında giriş ve çıkış gerilimleri kullanılmaktadır. Eşitlik (25) kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonu Eşitlik (26)'da verilmektedir.

$$T(s) = \frac{1}{s^2 * \left(\frac{C_d * L}{1-D} \right) + s * \frac{L}{(1-D) * R_y} + (1-D)} \quad (26)$$

DA dönüştürücü modelinin analiz edilmesiyle PI denetleyici için transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

3. Simülasyon Sonuçları

Kablosuz güç iletim sisteminde bobin tasarımı yaparken dikkate edilmesi gereken kısımlar daha önceki kısımlarda incelenmektedir. Simülasyon çalışmasında tasarımı yapılan bobin, nüve ve alüminyum yapısının yüksek verimlilik ile çalışması sağlanmaktadır. Simülasyonda, manyetostatik ve elektrostatik analizlerin sonucunda en yüksek bağlantı faktörüne sahip model kullanılmaktadır.

Tablo 12. Simülasyonda kullanılan bobinin özellikleri.

Bobin Özellikleri	
Nüve Eni 30 mm	Nüve Boyu 220 mm
Nüve Yüksekliği 8 mm	Çubuk Nüve Sayısı 12
Bobin Eni 520 mm	Bobin Boyu 520 mm
Bobin Çapı 8 mm	Sarım Sayısı 16
Alüminyum Eni 718 mm	Alüminyum Boyu 718 mm
Alüminyum Kalınlığı 10 mm	
Bobin Yarıçapı 4 mm	

Simülasyon çalışmasında kullanılan rezonans yapısına ait fiziksel veriler Tablo 12’de verilmektedir.

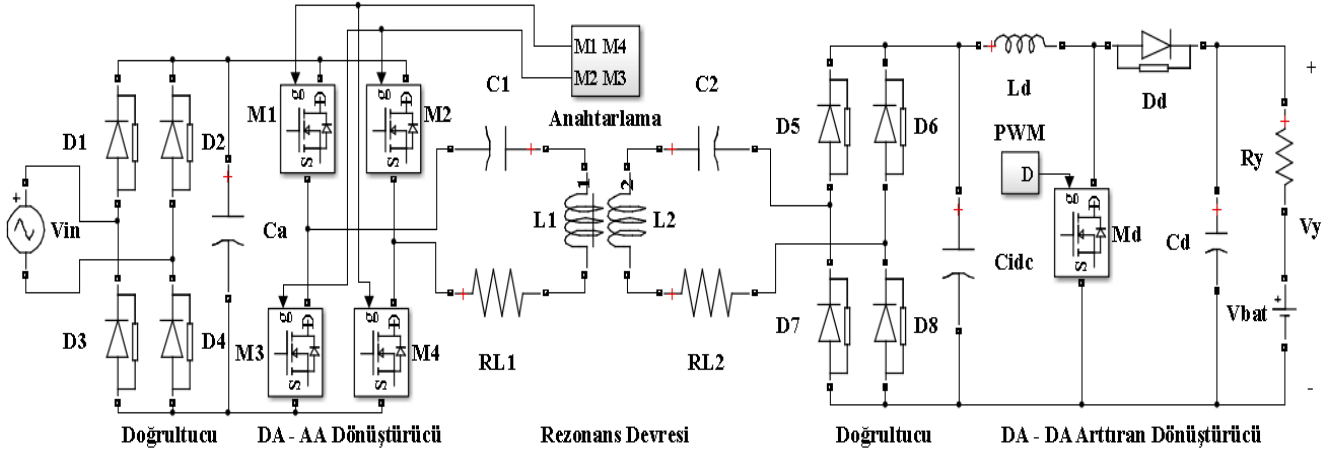
Tablo 12’de verilen modele ait geçici ve elektrostatik analizlerin sonuçları Tablo 13’te verilmektedir.

Tablo 13. Geçici ve elektrostatik analiz sonuçları.

Geçici Analiz Sonuçları		Elektrostatik Analiz Sonuçları
L_{Tx} (μ H)	L_{Rx} (μ H)	R_{Tx} (Ω)
105,361242	102,688838	0,04265
N_{Tx}	N_{Rx}	R_{Rx} (Ω)
16	16	0,0666
M (μ H)	k sabiti	$P_{Bakır}$ (W)
38,884495	0,37383	104,23

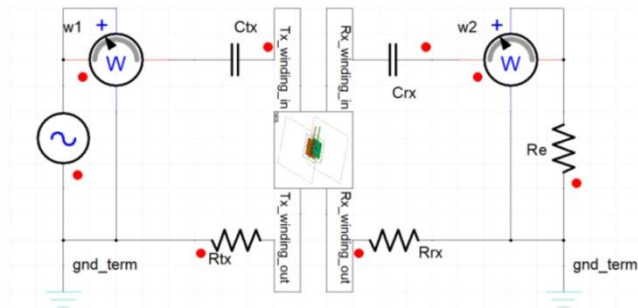
Tablo 12’de verilen modelde her iki bobin yapısı da fiziksel olarak aynı özelliklere sahiptir. Şekil 5’te kablosuz şarj sisteminin genel yapısı verilmektedir. Şekil 5’teki verilen DA dönüştürücü yapısı, çıkışta kullanılan batarya yapısına göre azaltan veya arttıran DA dönüştürücü yapısı

olarak seçilmektedir. Şekil 5’te alıcı kısımdan görülen direnç değeri Eşitlik (12, 13)’deki akımları azalttığı için çok yüksek olmaması gerekmektedir. Çıkış direncinin değişimi alıcı kısımdaki akımı değiştirdiği için verimi de etkilemektedir.



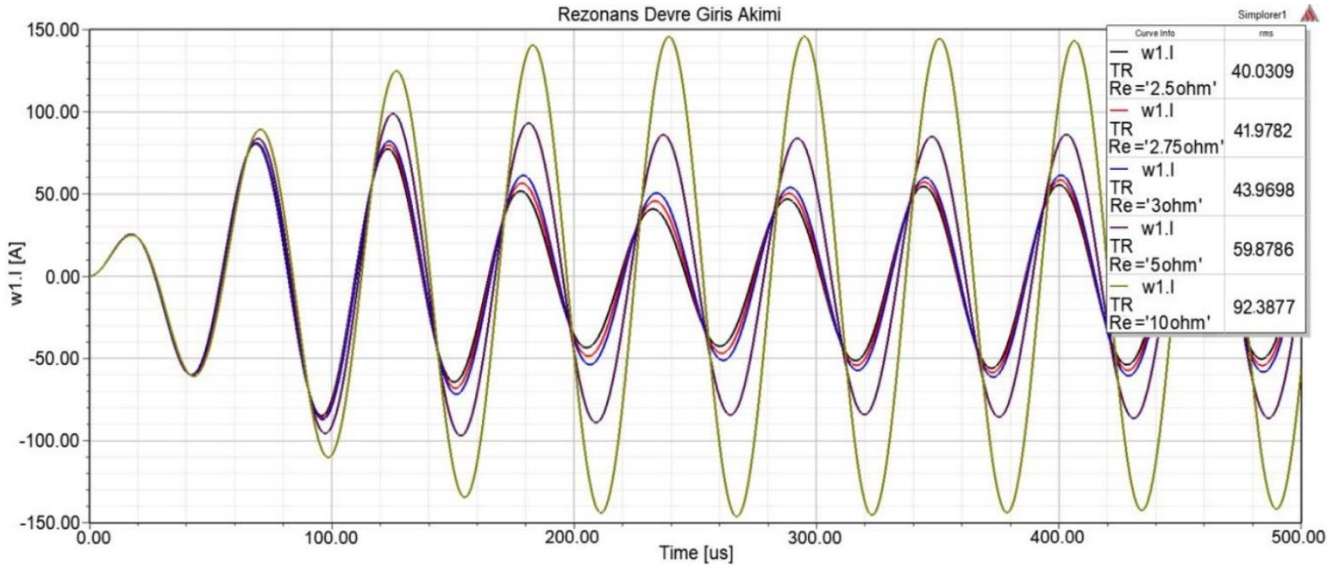
Şekil 5. Kablosuz şarj sisteminin genel yapısı.

Şekil 6’da simülasyon için kullanılan kablosuz güç iletim sisteminin basit yapısı verilmektedir. Rezonans devresinin girişinden görünen direnç (R_e) sistemin verimliliğini etkilemektedir.

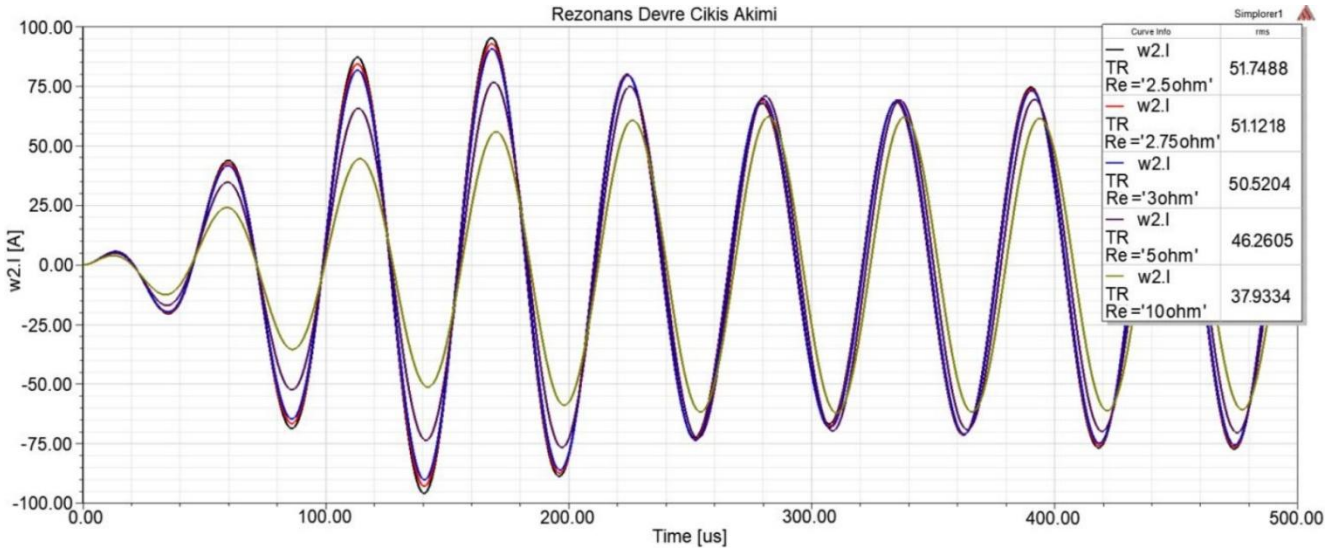


Şekil 6. Basitleştirilmiş kablosuz güç iletim sisteminin simülasyon devresi.

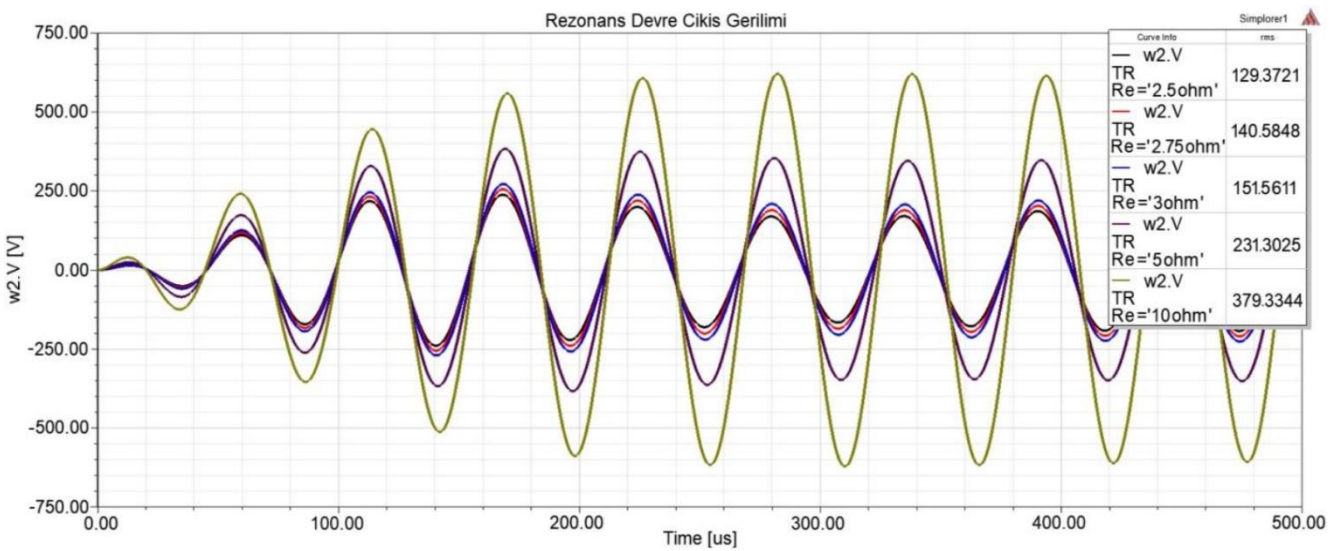
Şekil 7’de R_e ifadesindeki değişiminin, rezonans devresinin giriş akımına etkisi simülasyon sonucu ile verilmektedir. Şekil 7’deki akım değerleri R_e direncinin artması ile artmaktadır. Şekil 8’de R_e direncinin artmasının alıcı kısımda elde edilen akımına etkisi simülasyon sonucu ile verilmektedir. Şekil 8’de R_e direncinin artması rezonans devresinin çıkış akımını azaltmaktadır. Şekil 9’da R_e direncinin artmasının çıkış gerilimini nasıl etkilediği simülasyon sonuçları ile verilmektedir. Şekil 9’daki grafiğe göre R_e direncini arttırınca rezonans devresinin çıkış gerilimi de artmaktadır. Tablo 14’te R_e direncindeki değişimin, rezonans devre verimine etkisi simülasyon sonuçları ile verilmektedir. Tablo 14’e göre R_e direncinin artması belli bir seviyeden sonra verimi azaltmaktadır. Şekil 7, 8 ve 9’da verilen grafik verileri Tablo 14’te gösterilmektedir.



Şekil 7. R_e direncinin rezonans devre giriş akıma etkisi.



Şekil 8. R_e direncinin rezonans devre çıkış akımına etkisi.



Şekil 9. R_e direncinin rezonans devre çıkış gerilimine etkisi.

Tablo 14. Simülasyon sonuçlarının etkin değerleri.

R_e Direnci (Ω)	2,5 Ω	2,75 Ω	3 Ω	5 Ω	10 Ω
Giriş gerilimi (Rms)	220 V	220 V	220 V	220 V	220 V
Giriş akımı (Rms)	40,0309 A	41,9782 A	43,9698 A	59,8786 A	92,3877 A
Çıkış gerilimi (Rms)	129,3721 V	140,5848 V	151,5611 V	231,3025 V	379,3344 V
Çıkış akımı (Rms)	51,7488 A	51,1218 A	50,5204 A	46,2605 A	37,9334 A
Giriş gücü (Rms)	8806,798 W	9235,204 W	9673,356 W	13173,292 W	20325,294 W
Çıkış gücü (Rms)	6694,85 W	7186,948 W	7656,927 W	10700,169 W	14389,4435 W
Verim	% 76	% 77,82	% 79,15	% 81,22	% 70,79

Tablo 15'deki basitleştirilmiş devre modelinde kullanılan elektriksel parametreler verilmektedir. Tablo

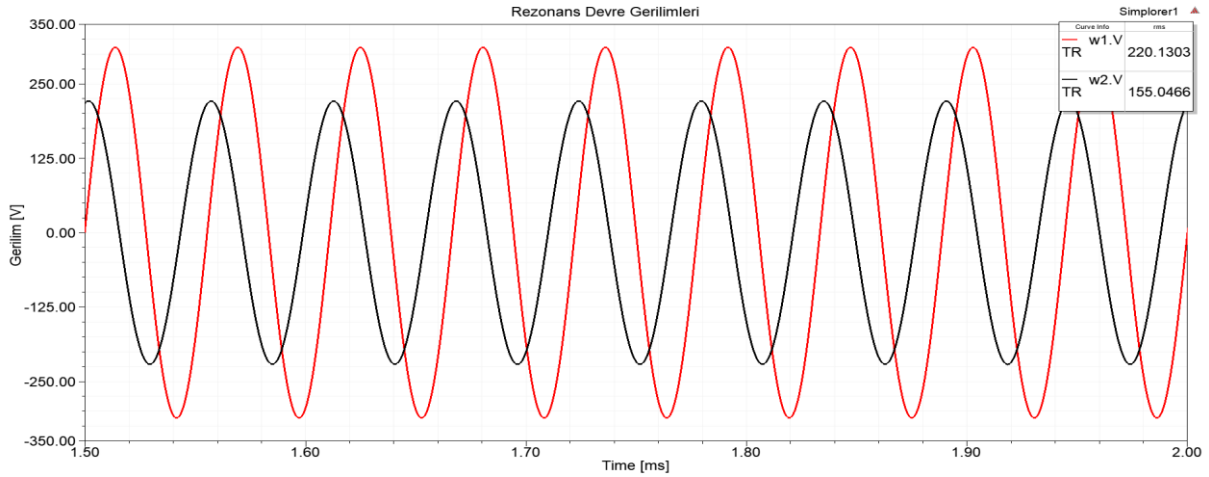
15'deki parametrelerin kullanılması ile yapılan simülasyonun sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 15. Sistemde kullanılan elektriksel parametreler.

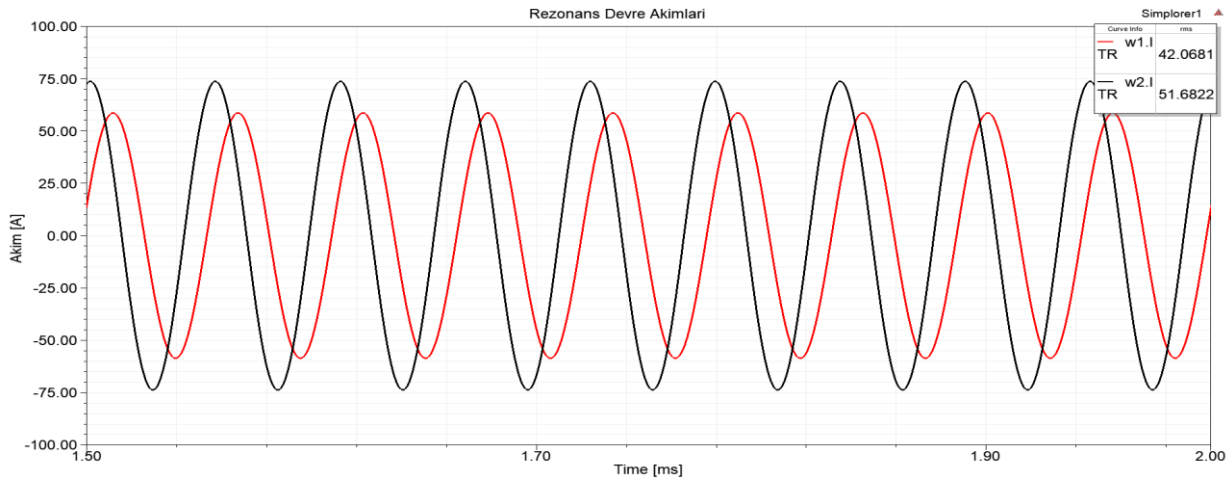
Devrenin Parametreleri				
Anahtarlama Frekansı	Giriş Gerilimi (Rms)	C_t	C_r	Çıkış Direnci
18 kHz	220 V	842,723 nF	864,654 nF	3 Ω

Şekil 10'da rezonans devresinin giriş ve çıkış gerilimlerinin grafikleri (\dot{V}_1 , \dot{V}_2), Şekil 11'de ise rezonans

devresinin giriş ve çıkış akımlarının grafikleri (\dot{I}_1 , \dot{I}_2), verilmektedir.



Şekil 10. Rezonans devresinin gerilim grafikleri.



Şekil 11. Rezonans devresinin akım grafikleri.

Şekil 10'da ve Şekil 11'de elde edilen veriler Tablo 16'da verilmektedir. Tablo 16'daki verilere göre verim % 86,53 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 16. Simülasyon sonuçlarının etkin değerleri.

Giriş (Etkin Değer)			Çıkış (Etkin Değer)			Verim
Gerilim (V)	Akım (A)	Güç (W)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç (W)	%
220,1303	42,0681	9260,463	155,0466	51,6822	8013,149	86,53

4. Sonuçlar

Çalışmada, yüksek verimli rezonans devre yapısı için bağlantı faktörünü etkileyen parametrelerin Ansys Maxwell programında analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda seçilen bobin yapısının, basitleştirilmiş kablosuz güç iletim devresi kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Rezonans devre yapısında kullanılan bobinlerin arasındaki mesafe 15 cm olarak belirlenmiştir. Simülasyon sonucunda rezonans devre çıkış gerilimi 155,0466 V, çıkış akımı 51,6822 A ve verimi % 86,53 olarak elde edilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Si P., Hu A. P., Malpas S., Budgett D., 2008. A Frequency Control Method for Regulating Wireless Power to Implantable Devices. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, **2**(1), 22-29.
- [2] Bhutkar R., Sapre S., 2009. Wireless Energy Transfer Using Magnetic Resonance. 2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, Dubai, 28-30 December, 512-515.
- [3] Polat Ö., Yumak K., Sezgin M. S., Yumurtacı G., Gül Ö., 2015. Elektrikli Araç ve Şarj İstasyonlarının Türkiye'deki Güncel Durumu. 6. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi, Kocaeli, 4-6 Haziran.
- [4] Li Z., Zhu C., Jiang J., Song K., Wei G., 2017. A 3-kW Wireless Power Transfer System for Sightseeing Car Supercapacitor Charge. IEEE Transactions on Power Electronics, **32**(5), 3301-3316.
- [5] Fincan B., Üstün Ö., 2012. Kablosuz Enerji Transferinde Bazı Kısıtlar ve Çözümler. ELECO, 2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa 29 Kasım - 1 Aralık, 455-459.
- [6] Musavi F., Edington M., Eberle W., 2012. Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, NC, 15-20 September, 1804-1810.
- [7] Fincan B., 2015. Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Song B. M., Kratz R., Guroi S., 2002. Contactless inductive power pickup system for Maglev applications. Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344), Pittsburgh, PA, USA, 13-18 October, **3**, 1586-1591.
- [9] Mecke R., Rathge C., 2004. High frequency resonant inverter for contactless energy transmission over large air gap: 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), Aachen, Germany, **3**, 1737-1743.
- [10] Sampath J. P. K., Alphones A., Vilathgamuwa D. M., 2016. Coil optimization against misalignment for wireless power transfer. 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), Auckland, New Zealand, 5-8 December, 1-5. DOI: 10.1109/SPEC.2016.7846159.
- [11] Akyel C., Babic S. I., Mahmoudi M. M., 2009. Mutual inductance calculation for non-coaxial circular air coils with parallel axes. Progress In Electromagnetics Research, **91**, 287-301.
- [12] Silva F.A., 2011, DC-DC Converters, Editor: Rashid M.H., Power Electronics Handbook, 3rd ed., IEEE, USA, 252.
- [13] Fu M., Ma C., Zhu X., 2014. A cascaded Boost-Buck converter for high efficiency wireless power transfer systems. IEEE Trans Ind. Informat., **10**(3), 1972-1980.