ENDÜKTİF KUPLAJLI KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİNİN ANALİZİ VE TASARIMI

Yeliz TEZCAN, Hasret ÜNAL, Mutlu BOZTEPE

Ege Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İzmir ylztzcn@gmail.com, hasret-unal1@hotmail.com, mutlu.boztepe@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada endüktif kuplajlıkablosuz enerji transferi sistemlerinde öz-endüktans, karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısı hesaplanması yapılmış ve rezonant dc-ac eviricinin yumuşak anahtarlama yapabilmesi için sıfır gerilimde anahtarlama koşulları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar sonlu eleman analizi sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar sonucunda bobinlerdeki bakır kaybının genel kayıplar icerisinde oldukca önemli bir ver tuttuğu görülmüstür. Laboratuvar kosullarında gerçekleştirilen prototip sistemde dc girişten vüke güc aktarım verimi maksimum %64,2 olarak ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kablosuz güç transferi, Kuplaj katsayısı, Sonlu elemananalizi, Rezonans evirici

1. GİRİŞ

Nikola Tesla ile başlayan kablosuz güç transferi calışmaları temelde iki ana gruba avrilir; bunlar vakin alan (nearfield) ve uzak alan (far-field) güç transferi teknolojileridir. Uzak alan enerji transferi yüksek frekanslarda elektromanyetik dalgaların yayınımı (radiation) ile gerçekleşmektedir ve uzak mesafelere enerji transferi için uygundur. Ancak uzak alan teknolojisi >10 MHz frekanslarında çalışacak güç elektroniği devre teknolojileri gerektirdiğinden hem çok pahalıdır hem de verimi düşüktür. Buna karşın yakın alan güç transferi ise bir dalgaboyundan daha küçük mesafelerde ve düşük frekanslarda endüktif kuplaj yoluyla gerceklesir. Bu teknoloji nispeten daha verimli ve düşük maliyetli olduğundan kablosuz şarj uygulamalarında özellikle tercih edilmektedir. Bu yöntemi kullanan pek çok ticari ürün piyasada bulunmaktadır. Bunlar arasında elektrikli diş firçaları, RFID etiketleri, medikal implantlar, mobil cihaz şarj aletleri ve elektrikli araç şarj sistemleri vb. sayılabilir.

Endüktif kuplajlı kablosuz enerji transferi konusunda literatürde birçokakademik çalışma bulunmaktadır. Melbourne Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmadaindüktifgüç transfer sistemlerinde bobinler arası mesafeye göre kuplaj katsayısının değişimi teorik ve deneysel olarak analiz edilmiştir [1]. Cin Southeast Üniversitesi'ndetransfer verimi ve karsılıklı indüktans hesaplamaları alıcı bobinin farklı pozisyonlarında hem teorik hem deneysel olarak incelenmiştir [2].SigiLi, elektrikli araç uygulamaları icin kablosuz güç transferinin mali açıdan değerlendirmesini yapmıştır [3]. Texas Instruments kablosuz güç transferi sistemleri için alıcı bobinin tasarımı ile ilgili çalışmalar yapmıştır [4]. Edward B. Rosa veL.Cohen[5] bobinlerin öz ve karşılıklı indüktans değerlerinin hesaplanması üzerinde calışmışlardır.Literatür çalışmalarından da görüleceği üzere endüktif kablosuz enerji transferi sistemlerinde verim pek çok parametreye birden bağımlıdır. Özellikle güç elektroniği devresive kuplajlı sargıların optimum tasarımı oldukça önemlidir.

Bu çalışmada seri-seri topolojiye sahip bir endüktif kuplajlı kablosuz enerji transferi sisteminin analitik olarak analizi yapılmakta ve verimli çalışması için gereken koşullar ortaya konmaktadır. Gerçekleştirilen bir prototip üzerinde alınmış olan deneysel ölçümler de sunulmaktadır.

2. ENDÜKTİF KUPLAJLI SİSTEM

Endüktif kuplajlı bir kablosuz güç aktarım sistemi, Şekil-1'de gösterildiği gibi bir rezonant dc-ac evirici, kuplajlı bobinler ve doğrultucu olmak üzere üç ana işlem bloğuna sahiptir.Bobinler seri veya paralel kondansatörle kompanze edilerek devreye bağlanırlar.Dolayısıyla seri-seri, seri-paralel, paralel-seri ve paralel-paralel olmak üzere 4 farklı kompanzasyon vöntemi ortava çıkmaktadır. Yükün değerine bağımlılığı en az olduğu için bu calışmada Sekil 2'de görüldüğü gibi kompanzasyon seri-seri durumu incelenmistir. Genel sistem veriminin yüksek olabilmesi icin yukarıda belirtilen her bir bloğun en az kayıp ile calışması gerekir. İlerleyen bölümlerde söz konusu bu kayıplar hakkında detaylı bilgilerverilmektedir.

Doğrultucu bloğu bir diyot köprüsü ve filtre kondansatöründen olusmaktadır. Bu devrede sıfır akımda anahtarlama (ZCS. Zero currentswitching) gerçekleştiği için anahtarlama kaybı ihmal edilebilir. Dolayısıyla sadece diyotlardaki gerilim düşümü nedeniyle olusan iletim kavıpları dikkate alınmalıdır. Bu kısımdaki kavıpları azaltmak için iletim gerilimleri düşük olan diyotların kullanılması faydalı olacaktır.

Rezonant evirici, tam (veya yarım) köprü bir dc-ac dönüştürücüden oluşmakta ve primer bobine yüksek frekanslı AC gerilim uygulamaktadır. Sekil 3'teki esdeğer devrede Vs kaynağının gördüğü giriş empedansı endüktif ise bu durumda akım, gerilime göre geride olacağından sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS, Zero voltageswitching) gerçekleşir ve anahtarlama kaybı ihmal edilebilir. Bu nedenle evirici anahtarlama frekansı kompanzasyonlu sargıların rezonans frekansının üstünde olacak sekilde seçilirse ZVS çalışma elde edilir. Ancak sargı endüktansının değerine, güce ve frekansa göre ZVS calısma aralığı değişmektedir. Bu nedenle tasarım aşamasında tüm çalışma sahasında ZVS elde edilebilecek sekilde L ve f değerleri dikkatli analiz edilmelidir.





Şekil 3. Eşdeğer devre

2.1.Sıfır Gerilimde Çalışma Koşulları

Rezonant dönüştürücü için ZVS çalışma empedansının pozitif fazında giris gerçekleşmektedir. Şekil 4'te 200uH indüktans değerinde 10 ve 50 ohm yük direncleri icin frekansa bağlı cıkıs gücü grafiği verilmiştir. Şekil 5 ise aynı kosullarda giriş empedansının faz açısınıgöstermektedir. Görüldüğü üzere rezonans frekansının üzerinde faz açısı pozitiftir ve ZVS calısma mümkündür. Maksimum anahtarlama frekansı 40kHz seçilirse çalışma frekans aralığı37kHz-40kHz arasında olacaktır.

Eğer primer sargı öz endüktansı 400 uH'ye yükseltilirse bu defa 10 ohm yük direnci için Şekil 6'da görüldüğü gibi grafiğinde bir çatallanma güç (bifurcation), yani iki tepe ortaya çıkmaktadır. Sekil 7'deki faz grafiğinden rezonansfrekansının üzerinde faz acısının kücüldüğü gözükmektedir. Hatta bazı durumlarda faz açısı bu bölgede negatife bile inebilmektedir.Bu durumda ZVS çalışmayı garanti altına almak için yüksek frekanstaki tepenin üzerindeki frekanslarda calışma gereklidir. Bu durumda çalışma frekans aralığı daralmaktadır. Bu yöntemle istenen bir güç seviyesi ve çalışma frekans aralığı ZVS calısmayı garantileven icin endüktansdeğer aralığını belirlenebilir.

2.1.Öz-endüktans hesabı

ZVS çalışma koşullarına göre değeri belirlenmiş bir endüktans, Şekil 8'de ki gibi yassı bir spiral bobin olarak sarılabilir ve öz indüktansıWheeler formülü [6] ile hesaplanarak boyutları belirlenebilir.

$$L = 31.33 \,\mu_0 \left(\frac{N^2 r^2}{8r + 11\omega} \right) \tag{1}$$

burada N tur sayısı, r ortalama yarıçap ve w bobinin genişliğidir.Bu hesaplamada bobinin uzayda tek başına olduğu ve diğer bobin ve çevresel etkilerden bağımsız olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 4. 200uH için frekansa göre çıkış gücünün değişimi



Şekil 5. 200uH için frekansa göre faz açısının değişimi



Şekil 6. 400uH için frekansa göre çıkış gücünündeğişimi



il 7. 400uH için frekansa göre faz açısır değişimi



Şekil 8. Spiral bobin

2.2. Karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısı hesabı

Birbirine yakın konumlandırılmış iki bobin arasında manyetik bir kuplaj vardır. Bu kuplaj sayesinde bobinler arasında güç aktarımı yapılabilmektedir. Esdeğer devrede bu etki karsılıklı endüktans (mutualinductance) olarak modellenmektedir ve **Biot-Savart** yasasıve Stokes teoremi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Sekil 9'da görüldüğü gibi, aynı eksen üzerinde bulunan N sarımlı iki spiral bobin arasındaki karşılıklı takımı endüktans(M) [7]aşağıdaki formülle elde edilebilir.

$$M = \frac{N_1 N_2 \mu_0}{4\pi} \oint \int \frac{ab\cos(\theta - \theta')d\theta d\theta'}{\sqrt{A - B}}$$
(2)

burada A ve B değişkenleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilirler.

$$A = a^2 + b^2 + d^2$$
 (3)

$$B = 2ab\cos(\theta - \theta') \tag{4}$$

Bobin eksenlerinde kayıklık olması durumunda kuplaj kötüleşmekte ve dolayısıyla karşılıklı endüktans değeri küçülmektedir. Şekil 9 (b)'de gösterilen bu durum için karşılıklı endüktans

$$M = \frac{N_1 N_2 \mu_0}{4\pi} \iint \frac{ab \cos(\theta - \theta') d\theta d\theta'}{\sqrt{C + D}}$$
(5)

burada C ve D değişkenleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilirler.

$$C = a^2 + b^2 + d^2 + l^2 + h^2$$
(6)

$$D = -2ab\cos(\theta - \theta') + 2l(b\cos\theta' - a\cos\theta)$$
(7)
+ 2h(b\sin\theta' - a\sin\theta)

Eşitlik (2) eliptik integral formuna benzetilerek analitik yöntemle çözülebilse de eşitlik (3) için aynı işlem yapılamadığından çözümün nümerik yöntemle elde edilmesi daha uygundur. Bu çalışmada nümerik çözüm için yamuk kuralı (trapezoidalrule) kullanılmıştır.

Öz ve karşılıklı endüktans değerleri hesaplandıktan sonra aşağıdaki eşitlik yardımıyla kuplaj katsayısı hesaplanabilir.



Şekil 9.(a) aynı eksende ve (b) eksenleri kayık olan iki spiral bobin parametreleri

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{8}$$

Kuplaj katsayısı bobinler arasındaki mesafe ve bobinlerdeki oluşan eksen kayıklığı ile ters orantılıdır. Kuplaj katsayısının sıfır olması hiçbir kuplaj olmadığı, yani güç aktarımın sıfır olduğu anlamına gelmektedir.

3. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Kuplajlı bobinler ile ilgili 2.bölümde verilen analitik hesaplamalar MATLAB yazılımı ile hesaplanmış ve elde edilen sonuclar ANSYS Maxwellsonlu elemanlar vöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bobinlerin yarıçapı 250mm ve sargılar arası mesafe d=100mm iken eksenlerin cakışık olduğu durumda elde edilen sonuçlar Sekil 10'da görüldüğü gibi oldukça uyumlu çıkmıştır. Aynı koşullarda ama sargıların aynı eksen üzerinde olmadığı durumdakuplai katsavısının değisimi isehem tek eksende hem de iki eksende olmak üzere ayrı ayrı incelenmiştir. Sekil 11'de sadece x-eksenin kayıklık olma durumu, Sekil 12'de ise x ve v eksenlerinde eşit miktarda kayıklık olma durumunda kuplaj katsayısının eksenden kayma miktarına göre görülmektedir. değişimi Her iki nümerik analiz analizde de ile hesaplama sonucları sonlu eleman analizi sonuçlarıyla uyumlu çıkmıştır.

Eksen kavıklığı arttığında kuplai katsayısı da hızla düşmektedir. Özellikle bobin yarıçapı kadar bir mesafeye erişildiğinde k<0.15 değerinin altına indiği görülmektedir. Bu durumda verimli bir güç transferi gerçekleştirmek olacağından bobin yarıçapının zor istenilen transfer mesafesine eşit veya büyük olacak sekilde belirlenmesi önemli olduğu görülmektedir. Bobinler arasındaki manyetik etkileşimin daha iyi anlaşılabilmesi için manyetik akı yoğunluğu grafikleri Şekil 13 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Görüldüğü gibi bobinler arası eksen kayıklığı arttıkça manyetik etkileşim de azalmakta ve bu da kuplaj katsayısını azaltarak sistemi etkilemektedir.



Şekil 10. Kuplaj katsayısının mesafeye göre değişimi



Şekil 11. Kuplaj katsayısının tek eksende kayma mesafesine göre değişimi



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmaları gerçekleştirmek üzere Şekil 14'te genel görünüşü verilen ve Tablo-1'deki teknik özelliklere sahip bobinler sarılmıştır. Tel kesiti küçük olduğu için prototip devrenin gücü 15W ile sınırlandırılmıştır.

Tablo	1. Deneysel	prototip	teknik	özellikle	eri
-------	-------------	----------	--------	-----------	-----

Parametre	Değer
Çıkış gücü, Pout	15W
Giriş gerilimi,V _{in}	20V
Çıkış gerilimi,V _{out}	15-25V
Rezonans frekansı, f	37kHz
Bobinler arası mesafe, d	100 mm
Sarım sayısı N ₁ =N ₂	44
Bobin öz endüktansı L ₁ =L ₂	820 uH
Bobin sargı direnci $R_1 = R_2$	2.8Ω
Bobin tel çapı	0.5 mm
Bobin çapı	250 mm
Kompanzasyonkond. C ₁ =C ₂	22 nF











Şekil 13.Manyetik akı yoğunluğudağılımları, (a)eksen kayıklığı olmadığı durum, (b) %25 kayıklık varken, (c) %50 kayıklık varken



(a)



(b) Şekil 14.(a) Genel devre modeli (b) Eksen kayıklığı varken devre modeli

Devrede evirici %50 görev oranında kare dalga üretmektedir. Ölçümler sırasında primer akım ve gerilimi rezonansa çok yakın ve ZVS için bölgede kalacak endüktif sekilde ayarlanmıştır. Yük direnci değeri çıkış gücü maksimum olacak sekilde ayarlanabilmektedir. Bobinler arası mesafe d=100 mm ve eksenler çakışık durumda iken devreden alınan osiloskop görüntüleri Sekil 15, 16 ve 17'de görülmektedir. Maksimum güç transferi için hesaplanan rezonans frekansı değeri iken deneysel 37kHz çalışmada maksimum güç transferi 37.53kHz'te elde edilmistir. Verim ise %68,93 olarak hesaplanmasına karşın %58,4 olarak ölçülmüştür. Teorik hesaplamalarda doğrultucu divotlar üzerindeki gerilim düşümleri dikkate alınmamıştır. Verimin nispeten düsük olmasının sebebi bobinlerdeki bakır kayıplarının fazla olmasıdır. Diğer koşullarda alınan ölçüm sonuçları toplu olarak Tablo-2'de özetlenmiştir.

Tablo 2'den görüldüğü üzere bobinler birbirinden uzaklastıkça ve eksen kayıklığı arttıkça verim düşmektedir. Bu durum kuplaj katsayısının düşmesinin bir sonucudur. Kuplaj katsayısı düştükçe girişten daha fazla akım çekilmesine karşın bu güç yüke aktarılamamaktadır. Cünkü gecen yüksek akım özellikle bobin iletkenleri üzerinde olmak üzere tüm elemanlarda akımın karesi ile orantılı bir iletim kaybı ortaya çıkarmaktadır.Prototip sistemde DC girişten DC çıkışa en yüksek verim %64,2 olarak akımın en düşük olduğu durumda elde edilmis olması bu tezi doğrulamaktadır. Bobinlerin bakır kayıplarını azaltarak verim daha yüksek değerlere çıkarılabilir. Ancak bunun için deri etkisi (skin effect) ve yakınlık etkisi (proximityeffect) dikkate alınarak optimum parametreleri sargi bulunmalıdır [8]

Tablo 2	Farklı	kosu	llarda	ölcüm	sonuc	ları
1 a010 2.	raikii	ĸoşu	marua	oiçum	sonuç	lall

Kayıklık	_				
/ bobin	D	Vin	Vout		
yarıçapı	[mm]	I _{in}	Iout	Verim	
	100	15.2V	21V	0/59 /	
-		736mA	311mA	7030.4	
0.25	100	16.1V	28.1V	0/370	
0.25		1.56A	339mA	/037.9	
0.5	100	15.8V	21.2V	0/101	
0.5	100	2.13A	288mA	7018.1	
	75	17.8V	17.9V	0/62.0	
-	/5	432mA	266mA	7002.0	
0.25	75	17.4V	26.9V	0/55.0	
0.23		993mA	359mA	7033.9	
0.5	75	16.1V	24.7V	0/261	
0.5		1.98A	336mA	7020.1	
	50	18.2V	15.8V	0/64.2	
-	50	364mA	269mA	7004.2	
0.25	50	19.6V	7.75V	0/10.2	
0.25		440mA	213mA	7019.2	
0.5	50	20.2V	1.21V	0/1/0	
0.5	50	360mA	90.1mA	701.49	









5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada endüktif kuplajlı kablosuz enerji transferi sistemlerinde tasarım için gerekli olan öz endüktans ve kuplaj katsayısı hesabı ile sıfır gerilimde calışma koşullarının analizi yapılmıştır. Yapılan benzetim denevsel ve calısmalar sonucunda maksimum verim elde edilmesi için rezonans frekansında çalışılması ve kuplaj katsayısının mümkün olduğu kadar büyük olması gerektiği, kayıpların özellikle bobinlerde bakır kaybı olarak ortaya bunun çıktığı ve için bobin tasarımlarında deri ve proximity etkileri

dikkate alınmasının önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen bilgilerle Şekil 18'te verilen akış diyagramının tasarım için uygun bir yol olacağı değerlendirilmiştir.



Şekil 18. Tasarım aşamaları

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 115E116 nolu "Elektrikli Araçlar için Temassız Bir Şarj sistemi Tasarımı ve Optimizasyonu" başlıklı projekapsamında gerçekleştirilmiştir.

7. REFERANSLAR

- [1] M. Duarte and G. K. Felic, "Analysis of the Coupling Coefficient in Inductive Energy Transfer Systems," Hindawi Publishing Corporation, no. Active and Passive Electronic Components, 2014
- [2] X. L. Huang, W. Wang, L. L. Tan, J. M. Zhao, and Y. L. Zhou, "Study of TransmissionPerformance on StrongCoupling Wireless Power Transfer System in FreePosition", School of ElectricalEngineering, SoutheastUniversity, Nanjing 210096, China, 2012
- [3] SiqiLi, andChuntingChris Mi, " Wireless Power Transfer ForElectricVehicle Applications", IEEE Journal of Emerging

andSelectedTopicsInPowerElectronics, Vol. 3, No. 1, March 2015

- [4] B. Johns, T.Antonacci, and K. Siddabattula, "Designing a Qi-Compliant Receiver Coil For Wireless Power Systems", Texas Instruments Incorporated, 2012
- [5] B. Rosa, and L. Cohen,"Formul/E andTablesForTheCalculation of Mutual and Self-Inductance",National Bureau of Standards, Vol. 8,January 1912
- [6] M.K. Kazimierzczuk, "High-Frequency Magnetic Components", 2nd ed. Wiley, 2014
- [7] R.M. Duarte and G.K. Felic, "Analysis of the Coupling Coefficient in Inductive Energy Transfer Systems", Active and Passive Electronic Components Vol. 2014, 6 pages, 2014 doi:10.1155/2014/951624
- [8] Y.Tezcan, H. Ünal, T. Sürgevil and M. Boztepe, "Optimum Coil Design Considering Skin and Proximity Effects for a Wireless Battery Charger ofElectric Vehicle", World Electro Mobility Conference, May 2017