

Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri

Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles

Ali Pashaei¹, Emrullah Aydın¹, Mehmet Polat², Emin Yıldırım³, M. Timur Aydemir¹

¹Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

ali.pashaei@gazi.edu.tr

emrullahaydin@gazi.edu.tr

aydemirmt@gazi.edu.tr

²Ulaşım, Güvenlik, Enerji ve Otomasyon Sistemleri Sektör Başkanlığı (UGES)

ASELSAN A.Ş.

mpolat@aselsan.com.tr

³Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü

Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

eminyildirim@duzce.edu.tr

Özet

Elektrikli araçların, enerji darboğazı ve çevre kirliliği sorunlarına bir çözüm olarak görülmesi ile birlikte, bu araçların bataryalarının temassız sistemlerle şarj edilmesi düşüncesi yaygınlaşmaya başlamıştır. İlk olarak Nikola Tesla tarafından ortaya atılan temassız güç aktarımı düşüncesi, enerjinin, ortak bir çekirdek üzerinde bulunmayan iki sargı arasında, oldukça büyük bir hava aralığı üzerinden aktarılması ilkesine dayanmaktadır. Bu aktarımın verimli olabilmesi için her iki sargının da rezonans koşullarında çalışması gerekmektedir. Bu makalede, bu sistemlerin kısa bir tarihçesi verilmekte, çalışma ilkesi ve bileşenleri tanıtılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Temassız Güç Aktarım Sistemleri, Endüktif Güç Aktarım Sistemleri, Kablosuz Güç Aktarım Sistemleri, Elektrikli Araçlar.

Abstract

Electric vehicles are seen as a solution to depletion of energy and air pollution. As a result of this vision the idea of contactless battery charging has been widespread. Contactless energy transfer idea was first proposed by Nikola Tesla. The concept is based on the transfer of energy between two coils which are not on a common core through a very large air gap. In order for this transfer to be efficient both coils have to work in resonant mode. In this paper, a brief history of these system is given, the operation principles and system components are discussed.

Keywords: Contactless Energy Transfer Systems, Inductive Energy Transfer Systems; Wireless Energy Transfer Systems; Electric vehicles.

1. Giriş

Elektrikli araçlarda, araç bataryasının şarj edilmesi için gerekli elektriksel güç, kablolu ya da kablosuz (temassız) olarak bataryaya aktarılabilir. Temassız güç aktarım (TGA) teknolojisinde güç, araç dışındaki primer kısımdan araç üzerindeki sekonder kısma, hava aralığı üzerinden, elektromanyetik endüksiyon yoluyla aktarılmaktadır. Arada bir temas olmaması nedeniyle temassız güç aktarım sistemleri; kullanım kolaylığı, yüksek emniyet, yüksek güvenilirlik, düşük bakım maliyeti ve uzun kullanım ömrü gibi avantajları beraberinde getirmektedir. Ayrıca meteorolojik ve çevresel etkenlerden bağımsız olarak kesintisiz güç sağlayabilen bu sistemler birçok ortamda güvenle çalıştırılabilmektedir. Bu üstünlüklerinden dolayı temassız güç aktarım sistemlerinin özellikle, elektrikli araç ve otobüs gibi uygulamalarda kullanılmaya başlandığı ve giderek yaygınlaştığı gözlenmektedir.

Elektrikli araçlarda TGA teknolojisinin kullanımı ile birlikte, çevredeki kablo karmaşası ve kirliliğinin azaltılması sağlanacak, kullanıcılar için zahmetli olan şarj işlemi, daha hızlı, zahmetsiz, çevre estetiğine uyumlu ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilecektir. Teknik avantajları yanında hizmet kalitesinin artması sonucu elektrikli araç kullanıcısının yaşam standartları yükselecektir. Bu doğrultuda ülkemizde elektrikli araçların kullanımının artırılması, milli kaynaklarla geliştirilmesi ve kullanımının özendirilmesi sonucunda büyük kentlerdeki çevre kirliliğinin azalması da mümkün olacaktır.

Bu makalenin amacı, TGA sistemlerinin çalışma ilkesi ve bu sistemlerin bileşenleri hakkında bilgi vermektir. İlerleyen bölümlerde önce kısa bir tarihçe verilmekte, sonra çalışma ilkesi anlatılmakta ve ardından da, her bir bileşen tanıtılıp, bu bileşen-

lere yönelik olarak yapılan bilimsel çalışmalardan kısaca söz edilmektedir.

2. TGA Sistemlerinin Tarihiçesi

Elektrik enerjisinin kablosuz olarak aktarımı ilk kez Nikola Tesla tarafından 1891 yılında ortaya atılmış bir kavramdır. Tesla, elektrik enerjisinin dünyanın her yerine kablosuz olarak aktarılabilmesi hedefine yönelik olarak araştırmalar yapmıştır. Bu amaçla 1901 yılında Long Island Sound yakınlarında “Wardenclyffe” kulesinin yapımına başlamıştır. Projenin kaynakları tükendiği için kule hiçbir zaman çalışır hale gelememiştir.



Şekil 1. Tesla'nın Wardenclyffe kulesi [1, 2]

Tesla'nın, aşağıdaki buluşların ya öncüsü, ya da tek başına sahibi olduğu söylenmektedir [3].

- 1) Süren ve sürülen devreler arasında endüktif bağlaşım düşüncesi
- 2) Her iki devreyi de akortlamanın önemi; yani salınım yapan transformatör
- 3) Açık devre olan sekonder sargısını kondansatörle yüklemeye düşüncesi

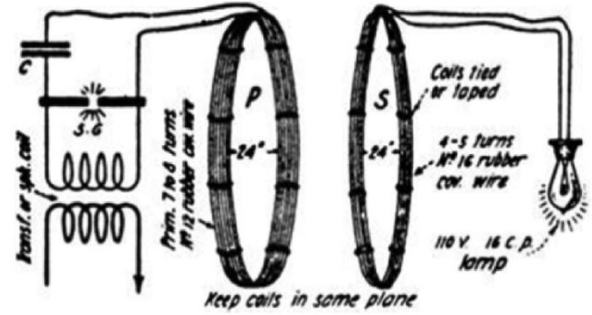
Bu üç kavram, ışımalı ve ışısız kablosuz iletimin temel ilkelerini oluşturmaktadır. Akort edilmiş devreleri salınlı transformatör olarak kullanma düşüncesi hem gönderici hem de alıcı tarafın rezonans modda çalışacak biçimde akort edilmesi anlamına gelir. Bu kavram, manyetik olarak bağlaşımli sargılar arasında manyetik rezonansın kullanımını işaret etmektedir.

Manyetik endüksiyonun, akortlu devrelerin ve rezonans frekansının birlikte kullanımı kablosuz güç aktarımının temelini oluşturmaktadır ve bu özellikler daha sonraki orta mesafeli güç aktarım çalışmaları “ışımsız” veya “manyetoendüktif” veya “manyetik rezonans” olarak adlandırılmıştır [4].

Teknik olanakların yetersizliğine karşı Tesla, Şekil 2’de görülen sistemi geliştirmiş ve 10 – 20 kHz aralığında denemiştir [5]. Tesla, manyetik olarak bağlaşımli sargılar arasında verimli bir güç aktarımının gerçekleştirilebilmesi için manyetik rezonansın gerekli olduğunu göstermiştir.

Kablosuz güç aktarımı, onlarca yıl sonra, mikrodalga teknolojinin gelişmesiyle yeniden gündeme gelmiştir. İkinci Dünya Savaşı sonrası dönemde, mikrodalga frekanslarında çalışabilen yüksek güçlü vakum tüplerinin geliştirilmesiyle, uzun mesafelere yüksek güçlü bir ışın gönderilmesi mümkün olabildiği.

1963 yılında William C. Brown, Raytheon’da ilk mikrodalga güç aktarımını gerçekleştirmiştir. 1969 yılında 50 ft yükseklikteki bir model helikoptere yerleştirilen alıcı anten ile 270W güç aktarımını başarmıştır [6]. 1970’li yıllardan sonra uzayda kurulu sistemler üzerinden kablosuz enerji aktarımı düşünceleri ortaya çıktı. Örneğin bir çölde konumlandırılan yüksek güçlü bir güneş enerjisi santralinde üretilen enerjinin iyi yönlendirilmiş ışınlarla uzaydaki bu sistem üzerinden yansıtılıp istenilen yere aktarılması ile yüksek gerilim hatlarının yarattığı manyetik alanın çevre üzerinde oluşturduğu zararlı etkileri ortadan kaldıracağı düşünüldü.

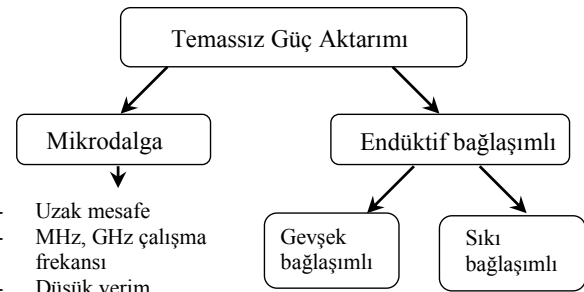


Şekil 2. Tesla tarafından geliştirilen ilk sistemin kendi elinden çizimi [5]

TGA sistemleri üzerine yapılan çalışmalar 2007 yılında MIT’de bir grup araştırmacının 2 m mesafeden 60 W gücünde bir ampulü yakan bir sistemi tanıtmalarıyla yeniden ilgi görmeye başlamıştır [7].

3. Endüktif Güç Aktarım Sistemlerinin Genel Yapısı

TGA sistemleri, enerjinin transfer edildiği hava aralığına, güç seviyesine, sistem verimliliğine ve çalışma frekansına göre sınıflandırılabilir (Şekil 3).



Şekil 3. TGA sınıflandırması

Günümüze kadar araştırmacılar farklı güçlerde ve mesafelerde mikrodalga TGA uygulamaları gerçekleştirmiştir [8, 9]. Bu teknik düşük güçlü algılayıcı ağlar gibi pek çok uygulama için uygundur. Bu uygulamalarda verim çok kritik olmayıp, mik-

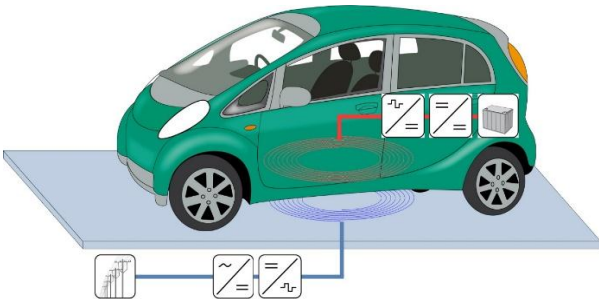
rodalga ışınımı güvenli sınırlar içinde tutulabilir. Yüksek güçlerde ise büyük anten yapıları ve bunun yanında maliyet artışı söz konusudur. Günlük yaşamımızda kullandığımız cihazların uzak alanlı mikrodalga sistemleri ile enerjilendirilmesi verim ve ışınım oranları açısından uygun değildir. Mikrodalga sistemlerin bir başka zayıf yönü de aktarım için doğrudan görüş gerektirmesidir. Bu nedenle yakın alan yani endüktif güç aktarımı araştırmacıların daha çok dikkatini çekmiştir.

Asenkron motorlar endüktif güç aktarımı sistemi ilkesi ile çalışmaktadır. Bilindiği üzere asenkron motorlarda statora uygulanan güç, küçük bir hava aralığı ile rotora aktarılır. Hava aralığının küçük olması, sargılar arasındaki bağlaşımın (kuplaj) yüksek olmasına neden olur. Bu sistemler sıkı bağlaşımli sistem olarak adlandırılır. Sıkı bağlaşımli sistemlerde ortak endüktans değerleri kaçak endüktans değerlerine göre çok daha büyüktür ve doğal olarak güç oldukça yüksek bir verimle aktarılabilir.

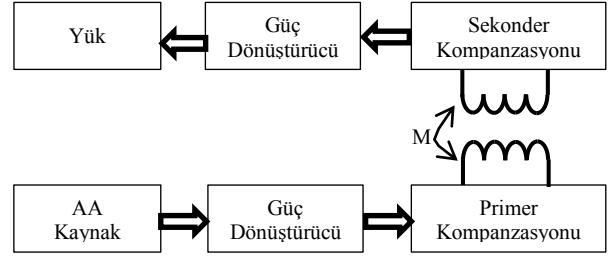
Sargılar arasındaki mesafenin büyük olduğu sistemlerde bağlaşım katsayısı düşük olur. Bu sistemler gevşek bağlaşımli sistem olarak adlandırılır. Gevşek bağlaşımli sistemlerde primer ve sekonder sargılarını üzerinde barındıran ortak bir çekirdek bulunmaz. Ancak her iki sargı da ayrı ayrı bir çekirdek üzerine sarılabilir. Bu yapı, sekonderin primere göre hareketli olmasına izin verdiğinden, elektrikli araçların batarya şarj uygulamaları için kullanışlıdır. Arada bir temas olmaması ve dolayısıyla galvanik yalıtımın sağlanmış olması nedeniyle güvenlik, güvenilirlik, düşük bakım maliyetleri ve uzun kullanım süresi gibi üstünlükleri beraberinde getirir [10].

Gevşek bağlaşımli sistemlerde kaçak endüktans değerleri çok büyük olur [11] ve doğal olarak güç aktarımı düşük verimlidir. Verimi yükseltebilmek için primer ve sekonder sargılara, rezonansa girmeleri ve güç katsayısını düzenlemek için kondansatörler bağlanır.

Endüktif bağlaşımli güç aktarımı durağan [12] veya hareket halinde olabilir [13, 14, 15]. Şekil 4'te durağan endüktif bağlaşımli güç sisteminin genel yapısı görülmektedir. Alternatif akım kaynağından alınan gerilim önce doğrultulmakta; doğrultulmuş gerilim, rezonans frekansında çalışan evirici tarafından anahtarlanarak elde edilen karesel gerilim kompanzasyon devresinden de geçirilerek yer platformunda bulunan primer sargısına uygulanmaktadır. Araç üzerine yerleştirilmiş sekonder sargısına primer sargısından yansıyan gerilim yeniden doğrultulmakta, doğrultulmuş gerilim bir başka güç dönüştürücü kullanılarak bataryanın şarjında kullanılmaktadır. Şekil 5'te ise bu sistem blok diyagram olarak gösterilmektedir.

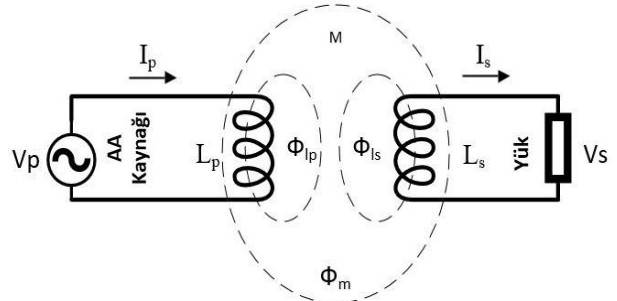


Şekil 4. Örnek bir durağan TGA sistemi [16]



Şekil 5. Durağan TGA sisteminin genel yapısı

Gevşek bağlaşımli sistemlerde, sıkı bağlaşımli sistemlerden farklı olarak primer ve sekonder kompanzasyon blokları yer almak zorundadır. Kompanzasyon devresi olmadan sargılar arasında güç aktarımının nasıl gerçekleştiği, Şekil 6'da basitçe gösterilmektedir [17].

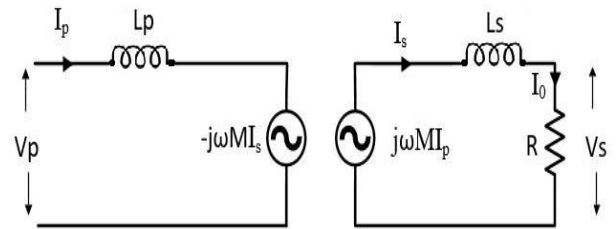


Şekil 6. Bağlaşımli sargılarda güç aktarımı

Sargılar arasındaki bağlaşımın kalitesi bağlaşım katsayısı ile gösterilir ve şu biçimde tanımlanır:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (1)$$

Bu eşitlikte L_s ve L_p , sekonder ve primer sargılarının endüktans değerlerini, M ise iki sargı arasındaki ortak endüktansı gösterir. Ortak endüktans, iki sargı arasındaki mesafeye ve bu sargıların birbirlerine göre nasıl yerleştirildiğine bağlı olarak değişir. Örneğin yol üzerine döşenmiş 100 m uzunlukta bir hattın üzerindeki aktif toplayıcının uzunluğu 30 cm ise, bağlaşım katsayısının olası en büyük değeri % 0.3 civarındadır [10]. Şekil 7'de bağlaşımli sargıların eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil 7. Bağlaşımli sargıların eşdeğer devresi

Bir temassız güç aktarım sisteminin başarımı başlıca iki parametre ile belirlenir: (1) Primer (gönderici uç) akımı (I_p) nedeniyle sekonderde (alıcı uç) endüklenen ω frekanslı açık devre gerilimi V_{OC} (2) Bu gerilimin yarattığı kısa devre akımı I_{sc} . Bu akım, sargıdan akabilecek en büyük akımdır.

$$V_{OC} = j\omega M I_p \quad (2)$$

$$I_{sc} = \frac{j\omega MI_p}{j\omega L_s} \quad (3)$$

Kompanze edilmemiş sargıdan alınan güç şu bağıntı ile hesaplanır:

$$P = \frac{R V_{OC}^2}{R^2 + (\omega L_s)^2} \quad (4)$$

Bu aktif gücün en yüksek değeri, yük direnci, sargı empedansına eşitken elde edilir:

$$R = \omega L_s \quad (5)$$

Bu durumda, elde edilen gücün en yüksek değeri:

$$P_{max} = \frac{V_{OC}^2}{2\omega L_s} \quad (6)$$

Sargı gücü

$$P = \frac{|V_{oc}||I_{sc}|}{2} \quad (7)$$

biçiminde de ifade edilebildiğinden, maksimum güç için (2), (3) ve (5) kullanılarak

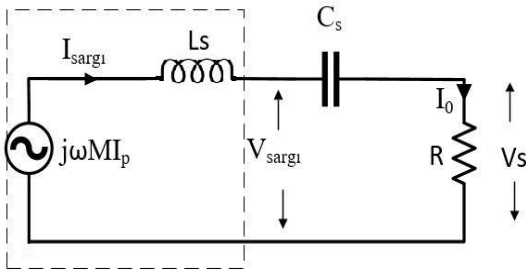
$$P_{max} = \frac{1}{2} \omega MI_p \frac{\omega MI_p}{\omega L_s} = \frac{1}{2} \frac{\omega M^2 I_p^2}{L_s} \quad (8)$$

yazılabilir. Maksimum güç aktarımı teoremi gereği bu durumda verim %50 olmaktadır. Eğer bu değerden daha büyük bir gücün aktarılması isteniyorsa sargının kompanze edilmesi gerekmektedir.

Sekonder kompanzasyonunun güç aktarma kapasitesini nasıl yükselttiği Şekil 8'deki eşdeğer devre yardımıyla anlaşılabilir. Şekildeki devrede sekonder sargısı seri bağlı bir kondansatörle kompanze edilmiştir.

Sekonder sargısının maksimum güç aktarımı durumundaki VA değeri şu biçimde tanımlanır:

$$VA = V_{sargı} \times I_{sargı} \quad (9)$$



Şekil 8. Seri kompanzasyonlu sekonder

Eğer kondansatörün değeri uygun biçimde seçilirse, seri reaktif elemanlar birbirlerinin etkisini yok edeceğinden

$$I_{sargı} = \frac{j\omega MI_p}{R} \quad (10)$$

ve

$$V_{sargı} = (R + \frac{1}{j\omega_o C_s}) \frac{j\omega MI_p}{R} \quad (11)$$

olarak tanımlanır.

Şimdi, (2), (3), (10) ve (11) eşitlikleri (9) eşitliği içerisinde kullanılarak sargının VA değeri şu biçimde ifade edilebilir.

$$(VA)_{sargı} = |V_{oc}||I_{sc}| \frac{\omega_o L_s}{R_L} (1 - j \frac{\omega_o L_s}{R_L}) \quad (12)$$

Reaktif elemanların kalite katsayısı, elemanda depolanan enerjinin, elemanın aktif gücüne oranı olarak tanımlanır. Örneğin, iç direnci R_s olan bir endüktans için bu katsayının değeri

$$Q_s = \frac{\omega L_s}{R_s} \quad (13)$$

olur. Seri bağlı sekonder devresi için kalite katsayısı aynı biçimde tanımlanabilir. Sargının iç direncinin yük direnci yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu göz önüne alınır, sekonder sargısının kalite katsayısı (Q_s) şu biçimde tanımlanır:

$$Q_s = \frac{\omega L_s}{R} \quad (14)$$

Seri kompanzasyonlu sekonder sargısı için VA değeri şimdi kalite katsayısı cinsinden ifade edilebilir:

$$(VA)_{sargı} = |V_{oc}||I_{sc}| Q_s (1 - j Q_s) \quad (15)$$

Bu eşitliğin gerçel bileşeni, yüke aktarılan maksimum aktif gücü verir:

$$P_{max} = |V_{oc}||I_{sc}| Q_s \quad (16)$$

Görüldüğü üzere, sargıdan alınabilecek aktif güç, kalite katsayısına bağlı olarak artabilmektedir. Açık devre gerilimi ve kısa devre akımının değerleri yerine konulursa, seri kompanzasyonlu devre için maksimum güç ifadesi şu biçimde elde edilir:

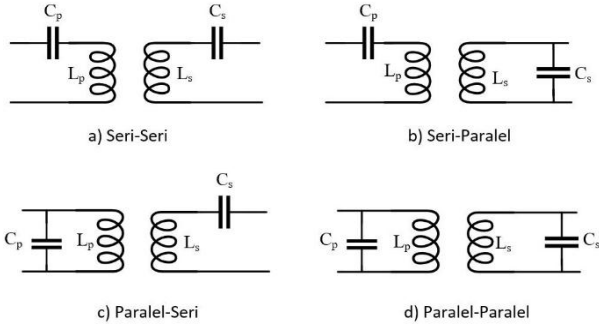
$$P_{max} = \frac{\omega M^2 Q_s I_p^2}{L_s} \quad (17)$$

Hareketsiz bir sistemde M ve L_s sabit olduğundan, aktarılan enerjiyi maksimize edebilmek için ωI_p değerinin maksimize edilmesi gereklidir. Primer sargısını anma akımında çalıştırmak, sargının en yüksek düzeyde kullanımı anlamına geldiğinden hacim ve maliyeti de düşürecektir.

Sistemin maliyetini ve karmaşıklığını etkileyen diğer bir unsur da çalışılan frekanstır. Belli bir I_p , M ve L_s değeri için güç aktarım kapasitesi doğrudan frekansa bağımlı olur. Günümüz güç elektroniği sistemlerinde kilowattlar düzeyindeki güçler için çalışma frekansı 10 kHz – 100 kHz aralığındadır. Bu frekans bölgesinde deri olayının ve yakınlık etkisinin dikkate alınması gereklidir. Her bir iletkeninin çapı dalma derinliğinden düşük olan Litz sargılar kullanılarak bu etkiler minimize edilir.

4. Kompanzasyon Yapıları

TGA sistemi endüktif bir yapıdır. Çalışma frekansı da yüksek olduğundan, kaynak tarafındaki güç katsayısı çok düşük olur [18]. Bu durumun neden olduğu verim kaybını engellemek için sargılara seri veya paralel kondansatörler yerleştirilmelidir. Temel kompanzasyon yapıları [18, 19, 20] çalışmalarında incelenmiştir. Bu yapılar Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil 9. Temel kompanzasyon yapıları

Kompanzasyon devresi tasarımında ilk olarak sekonderdeki kapasite değeri seçilir. Çalışma frekansı değerinde sekonder sargısının öz endüktansını kompanze edecek bir kapasite değeri kullanılır. Tüm topolojiler için kompanzasyon kapasitesinin değeri şu biçimde hesaplanır:

$$C_S = \frac{1}{\omega_o L_s} \quad (18)$$

Bu eşitlikte ω_o sistemin çalışma (rezonans) frekansıdır. Benzer olarak primer kapasite değeri de giriş güç katsayısı bir olacak biçimde seçilir. Dört topoloji için yapılan hesaplamalar Tablo 1’de verilmektedir. Tabloda görülen primer ve sekonder kalite katsayıları (Q_p , Q_s) rezonans frekansında (ω_o) tanımlanmıştır.

Tablo 1. Farklı kompanzasyon topolojileri için primer kapasitesi hesabı

Topoloji	Primer Kapasitansı, C_p	Primer Kalite Katsayısı, Q_p	Sekonder Kalite Katsayısı, Q_s
Seri-Seri	$\frac{L_s C_s}{L_p}$	$\frac{R_L L_p}{\omega_o M^2}$	$\frac{\omega_o L_s}{R_L}$
Seri-Paralel	$\frac{L_s C_s}{L_p} \frac{1}{(1-k^2)}$	$\frac{M^2 R_L}{\omega_o L_p L_s^2}$	$\frac{\omega_o L_s}{R_L}$
Paralel-Seri	$\frac{L_s C_s}{L_p} \frac{1}{Q_s^2 k^4 + 1}$	$\frac{R_L L_p}{\omega_o M^2}$	$\frac{\omega_o L_s}{R_L}$
Paralel-Paralel	$\frac{L_s C_s}{L_p} \frac{1-k^2}{Q_s^2 k^4 + (1-k^2)^2}$	$\frac{\omega_o L_p L_s^2}{M^2 R_L}$	$\frac{\omega_o L_s}{R_L}$

Primer sargısı, giriş güç katsayısını iyileştirmek için, sekonder sargısı da aktarılan gücü yükseltmek için kompanze edilir. Eğer primere yansıyan empedans, primerin öz endüktansının yanında ihmal edilebilir düzeyde ise yalnızca primer sargısını kompanze etmek yeterli olabilir [20].

Tablo 2’de, yükün direnç olması durumunda, kompanze edilmiş, seri kompanze edilmiş ve paralel kompanze edilmiş sekonder sargıları tarafından aktarılabilen maksimum aktif ve reaktif güç değerleri, kalite katsayısına bağlı olarak verilmektedir. Şekilde sargının yükü direnç artı kondansatör olduğu için reaktif gücün işareti eksi olmaktadır. Bu çizelgeden görüldüğü gibi, sargının kompanze edilmesi durumunda güç aktarım kapasitesi $2Q_s$ katına, anma VA değeri ise $2Q_s \sqrt{1+Q_s^2}$ katına çıkmaktadır.

Kompanzasyon topolojilerinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Hangi topolojinin kullanılacağı uygulamaya göre kararlaştırılır. Örneğin, batarya şarj uygulamalarında sabit akım ve sabit gerilim gerekli olduğundan, bunu sağlayabilecek topolojinin kullanılması gereklidir. Hareket halindeyken şarj gerektiren uygulamalarda primer sargısı uzun bir hat olarak

döşendiğinden, kaçak reaktans üzerindeki gerilim düşümü yüksektir ve kaynak geriliminin yeterince yüksek olması gereklidir. Bu uygulamalarda seri kompanzasyon daha caziptir. Böylece kaynak geriliminin uygun seviyelere düşürülmesi mümkün olabilmektedir. Sekonderde, yükte sabit bir gerilim sağlayabilmek için seri kompanzasyon, sabit akım sağlayabilmek için ise paralel kompanzasyon gereklidir. Primerde de seri kapasitör ile primer gerilimi düşürülürken, paralel kondansatörle de primer akımının yükseltilmesi sağlanır [18, 21, 22].

Tablo 2. Omik yük için sekonder sargısının maksimum güç aktarım değerleri [17]

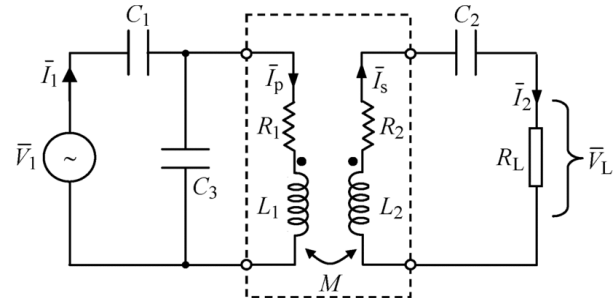
Sargı Parametreleri (Max. Değerler)	Kompanze edilmemiş	Seri Kompanzasyon	Paralel Kompanzasyon
VA değeri	$\frac{ V_{oc} I_{sc} }{2}$	$ V_{oc} I_{sc} (1 - jQ_s)Q_s$	$ V_{oc} I_{sc} (1 - jQ_s)Q_s$
Aktif güç	$\frac{ V_{oc} I_{sc} }{2}$	$ V_{oc} I_{sc} Q_s$	$ V_{oc} I_{sc} Q_s$
Reaktif güç	0	$-j V_{oc} I_{sc} Q_s^2$	$-j V_{oc} I_{sc} Q_s^2$

Sekonder tarafı rezonans durumundayken primere yansıyan yük:

$$R_{r,ss} = R_{r,ps} = \frac{\omega_o M^2}{R_L} \quad (18)$$

$$R_{r,sp} = R_{r,pp} = \frac{M^2 R_L}{L_s^2} \quad (19)$$

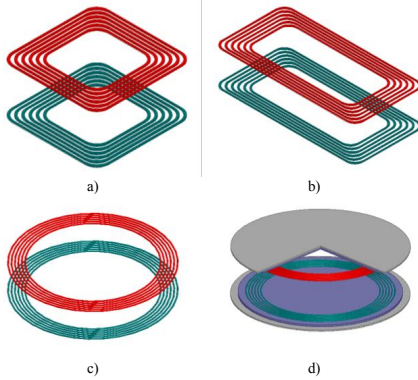
Primer ve sekonder sargı eşmerkezli olarak konumlandırıldığında bağlaşım en yüksek değerini alır. Bunun için bir yaklaşım sistemi oluşturulmalıdır. İdeal konumun yaklaşım sensörü ile sağlanması ise hem zaman kaybına hem de sistemin karmaşık olmasına neden olur. Primer ve sekonder sargıları eş merkezli olmadığında ise bağlaşım katsayısı ciddi oranda azalır. Bağlaşım azaldığında primere yansıyan direnç küçülür. Primer tarafında seri kompanzasyon varsa, giriş gerilim kaynağı olduğundan, bağlaşım düşünce yüke aktarılan güç artar. Primer tarafında paralel kompanzasyon varsa giriş akım kaynağı olmalıdır. Bu nedenle, bağlaşım azaldığında güç düşer. Çıkış gücünü sabit tutmak için farklı kompanzasyon topolojileri de önerilmiştir. Bunlardan bir tanesi de yüksek hizalama toleransı sağlayan SPS topolojisidir (Şekil 10). Geleneksel seri-seri topoloji ile karşılaştırıldığında eş merkezli hizalamada pratik verim %89’dan %92’ye çıkartılmıştır. Ayrıca tek bir yönde (X doğrultusu) %25 oranında bir hizalama hatası olsa bile seri-seri topolojiden daha yüksek bir verim elde edilmiştir [23].



Şekil 10. SPS kompanzasyon topolojisi [23]

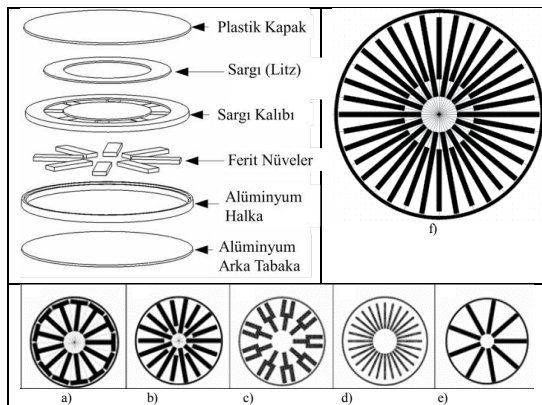
5. Sargı Yapıları

Gevşek bağlaşımlı güç aktarımında, sargı tasarımı önemli bir yer tutar. Düşük güçlü uygulamalarda MHz seviyesindeki frekanslar, güç düzeyi arttıkça 10-150 kHz aralığında olur. Bu frekanslarda sargılardaki deri ve yaklaşım etkilerini engellemek için yapılmış litz sargılar kullanılır. Sargı kesiti akım yoğunluğuna ve kompanzasyon yapısında dikkate alınan sargı direncine bağlıdır. Enerji transferinin yapıldığı primer ve sekonder sargı arasındaki mesafe, bağlaşım katsayısı için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle genelde Şekil 11'deki gibi sarmal sargı yapıları kullanılmıştır.



Şekil 11. Sarmal sargılar

Kaçak akıyı azaltmak ve bağlaşımı arttırmak için Şekil 11'deki gibi ferit nüveler ve ekranlayıcı alüminyum kullanılabilir [24]. Sargılar nüvenin içine gömülecek şekilde nüve yapısı da kullanılabilir [25, 26], ancak bu durumda kullanılan nüve miktarı ve maliyet artar. Elektrikli araçların şarjı için kullanılan TGA'da sekonder sargı aracın üzerine yerleştirilir. Bu nedenle sekonderin ağırlığı önem kazanır. Blok bir nüve kullanmak yerine ortak bağlaşımı destekleyen çok sayıda çubuk nüve kullanılarak ağırlık ve kalınlık azaltılabilir [27]. Şekil 12'de dairesel sargı kullanan TGA'da farklı nüve yapıları görülmektedir. En iyi akı yoğunluğu d) ve e) nüve yapısında görülürken, bu yapıların birleşimi ile elde edilen f)'deki yapıda eş merkezli olmayan çalşmalar için tolerans daha yüksektir.

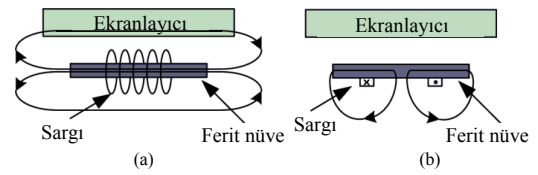


Şekil 12. Dairesel sargı kullanan farklı çubuk nüve yapıları

Sargı akımlarının oluşturduğu manyetik akı yollarına göre sargı yapıları Şekil 13'de görüldüğü gibi, tek taraf ve çift taraf bağlaşımlı olarak sınıflandırılır [28]. Çift taraf bağlaşımlı, sargının oluşturduğu manyetik akı nüvenin her iki tarafından da dolunur. Bu da kullanılacak faydalı akı miktarını azaltır ve ekranlamayı

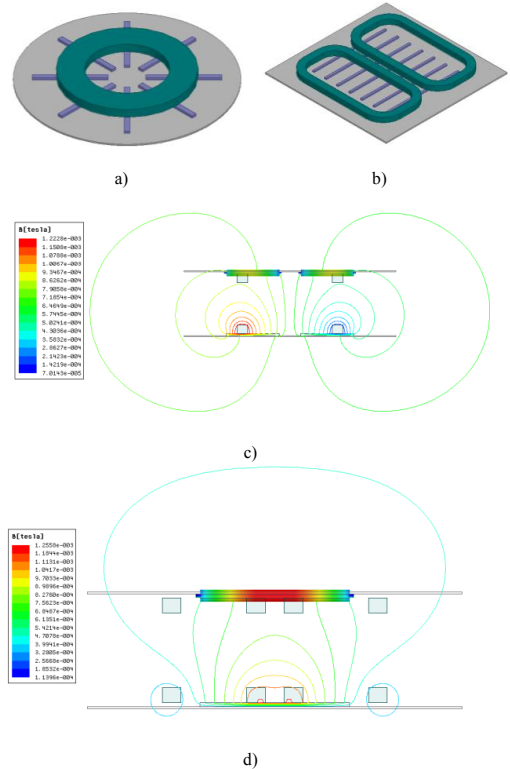
zorunlu kılar. Alüminyum şase de kayıpları %1-2 artırır [28, 29]. Tek taraf bağlaşımlı, üretilen akının büyük bir kısmı tek tarafta toplanır. Kullanılacak ekranlayıcı alüminyum sadece kaçak akıları önlemeye yönelik olur.

Geleneksel tek yataklı tek taraftan bağlaşımlı sargı yapısında [27], temel akının yüksekliği sargı çapının $\frac{1}{4}$ 'ü kadardır. Şekil 14'teki sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan magnetostatik analiz sonuçlarından görüldüğü gibi bu oran aynı boyutlarda, dikdörtgen şeklinde yan yana yerleştirilmiş iki sargı kullanan çift yataklı tek taraf bağlaşımlı sargı yapısında ise (DD) $\frac{1}{2}$ 'i kadardır [31] Bu da bağlaşımın daha yüksek olması ve daha yüksek güç aktarımı anlamına gelir. Literatürde DD yapısıyla %95.36 verime ulaşılmıştır [32].

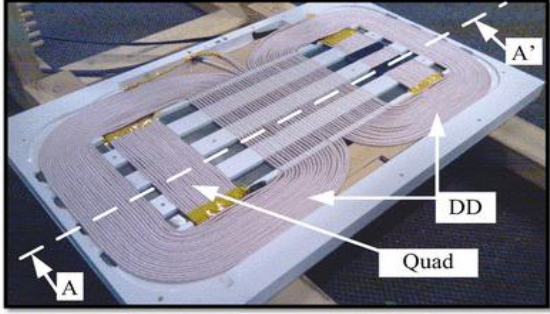


Şekil 13. Çift ve tek taraf bağlaşımlı sargı yapıları

Tüm sargı yapılarında en iyi güç aktarım performansı, sargıların eş merkezli olarak konumlanmasında olur. Ancak sargı konumları eş merkezden uzak olsa bile, güç transferi belirli bir toleransla yapılabilir. DD sargı yapısında y eksenini boyunca bu tolerans iyidir ancak x eksenini boyunca bu tolerans zayıftır. Bu sorun, Şekil 15'te görüldüğü gibi, alıcı sargıya ilave bir karesel sargı yerleştirilerek çözülmüştür [31]. [33]'te DDQ yapısında kullanılan sargı miktarını azaltan bir başka tek taraf bağlaşımlı sargı yapısı önerilmiştir.



Şekil 14. Tek taraf bağlaşımlı sargı yapıları: a) tek yataklı, b) çift yataklı c) tek taraf bağlaşımlı sargı için d) çift taraf bağlaşımlı sargı için manyetik akı dağılımı

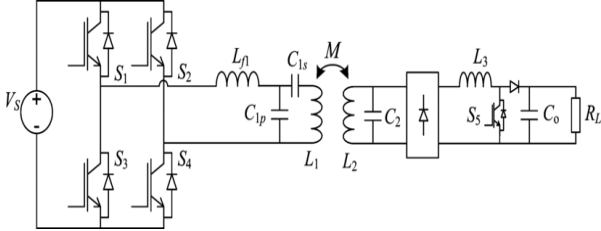


Şekil 15. DDQ sargı yapısı

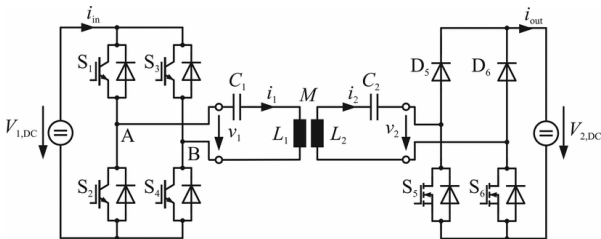
6. Güç Dönüştürücüler

TGA sistemlerinde primer taraftaki güç dönüştürücüsünün görevi, primer sargısında yüksek frekanslı akım üretmektir. Sekonderdeki dönüştürücü doğrultma amacıyla kullanılır. Evirici devre tarafından üretilen kare dalga gerilim kompanzasyon devresine uygulanır. TGA sistemleri yüksek frekanslarda çalıştığından, anahtarlama kayıplarını düşürmek için yumuşak anahtarlama tekniklerinden yararlanılabilir. Bu nedenle rezonanslı dönüştürücülerin kullanılması önerilmektedir. Güç kaynağı sabit veya değişken frekanslı olabilir [34].

Literatür incelendiğinde kullanılan dönüştürücü yapılarının ağırlıklı olarak Şekil 16'da gösterilen klasik yapı olduğu görülmektedir. Yaygın olarak kullanılmakta olan bir başka yapı da hem primerde hem de sekonderde denetime izin veren dönüştürücü devrelerdir [35]. Sekonderdeki doğrultucuda kullanılan iki anahtar, ikinci bir dönüştürücüye gerek duyulmadan güç akışının denetlenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 16. TGA sisteminde kullanılan klasik güç dönüştürücü yapısı [28]



Şekil 17. Her iki yanda da denetime izin veren dönüştürücü yapısı [35]

7. Denetim

Seri-seri kompanzasyon topolojisinde primer kapasitansı ortak endüktans değerinden bağımsızdır. Dolayısıyla primere sekonderden gelen bir VAR yüklemesi yoktur. Bu durumda girişte sabit frekanslı bir kaynak kullanıp eviricinin çıkış gerilimi, geniş

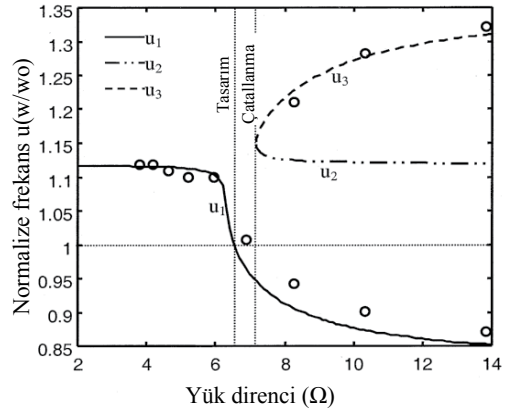
bir aralıkta yük akımını sabit tutacak biçimde değiştirilebilir [34]. Sabit frekanslı denetim daha basit ve kolay uygulanabilir. Ancak sıcaklıklardaki değişimden dolayı kapasitans değeri değişebilir. Bu durumda sistem rezonans frekansında çalışmayabilir. Bu da güç aktarım kapasitesini olumsuz etkiler.

Diğer üç topolojide primer kapasitans değeri ortak endüktansa ve yük direncine bağlıdır. Yük veya primer ve sekonder sargılarının birbirine göre konumu değiştiğinde ayardan sapma olur ve aktarılan güçte ciddi miktarda düşme olur. Bu nedenle bu uygulamalarda, ortak endüktanstaki değişimin algılanarak kaynak frekansının uygun biçimde değiştirilebilmesi istenir [10, 34]. Böylece sistemin her zaman birim güç katsayısı ile çalışması sağlanır.

Ancak analiz yapıldığında görülmektedir ki, bu durumda TGA sisteminin faz farkının sıfır olduğu en azından üç tane frekans değeri hesaplanabilmekte birlikte bunların yalnızca bir tanesi rezonans frekansıdır. Bu olgu çatallanma olarak adlandırılır [10, 18, 20, 34]. Değişken frekanslı denetleyici çatallanma bölgesindeki belirsizlikle baş edemezse güç kaynağının frekansı kayabilir ve kararsız bir çalışma durumu söz konusu olabilir. Bu durumda güç aktarımı ciddi biçimde düşer. Çatallanma durumu Şekil 18'de gösterilmektedir.

Çatallanma olgusu ile karşılaşmamak için primer tarafın kalite katsayısının sekonderin kalite katsayısından büyük olması istenir ($Q_p > Q_s$).

Aktarılan gücü kontrol etmek için primer tarafında, sekonder tarafında veya her iki tarafta birden kontrol devresi kullanılabilir. Primer tarafında, frekans, doluluk oranı (duty cycle) veya iki kol arasındaki faz farkı değiştirilerek kontrol yapılabilir.



Şekil 18. Çatallanma olgusu [20]

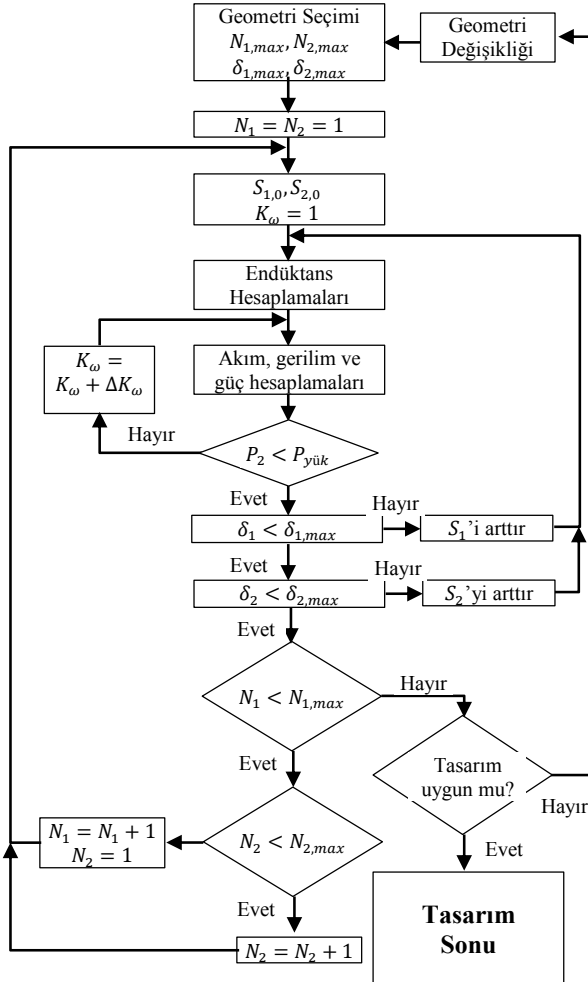
8. Sistem Tasarımı

TGA sistem tasarımı henüz standartlaşmış bir yöntemeye dayanmamaktadır. Primer ve sekonder rezonans devrelerinin etkileşiminden kaynaklanan karmaşıklık nedeniyle tasarım için deneyim ve deneysel doğrulama gereklidir.

Tasarım yöntemi için yapılan ilk önerilerden biri sistemin rezonans frekansında çalıştığı varsayımına dayanmaktadır [11]. Bu yöntemde yinelemeli bir süreç sonunda, belli bir çıkış gücü için hem sistemden elektromanyetik yapısı hem de primer akımının değeri belirlenebilmektedir.

TGA sistem tasarımı için literatürde önerilen ve başarılı olduğu düşünülen yöntemlerden biri [12]'de önerilmektedir. Yöntemin akış diyagramı Şekil 19'da verilmektedir.

Önerilen yöntemin başlangıcında bir geometri seçimi yapılır. Öncelikle sargı yapısının dikdörtgen şekilli mi yoksa dairesel yapı mı olduğu belirlenir. Primer ve sekonder sargıları için maksimum sarım sayısı ve kullanılacak iletkenler için maksimum akım yoğunluğu değerleri seçilir. Sargıların başlangıçta tek sarımlı olduğu varsayılarak işlem döngüsü başlatılır. İlk döngüde sargı kesiti için bir başlangıç değeri belirlenir ve frekans çarpanı değeri de (K_ω) bir olarak alınır. Bu başlangıç değerleri sargı yapısı için geçerli öz endüktans ve ortak endüktans bağıntılarında kullanılır. Endüktans değerleri yardımıyla, seçilen kompozisyon topolojisi için geçerli bağıntılar kullanılarak kondansatörlerin değerleri, sargı empedansları, akımlar, gerilimler ve güçler hesaplanır. Bu aşamada, sistemin rezonans frekansından olup olmadığı hesaplanan çıkış gücüne bakılarak kararlaştırılır.



Şekil 19. TGA sistem tasarımı için önerilen bir yöntemle ilişkin akış diyagramı [12]

Eğer frekans yeterince yüksek değilse, çıkış gücü yüksek olacaktır. Hesaplanan güç hedeflenenin üzerinde ise çalışma frekansı küçük adımlarla artırılır ve hesaplamalar bu frekans için yeniden yapılır. Bu döngünün sonunda hedef güç değerine inil-

diğinde, sargılar için belirlenen kesitlerin uygun olup olmadığı, akım yoğunluklarına bakılarak kararlaştırılır. Hesaplanan akım yoğunluğu yüksekse, sargı kesiti artırılarak endüktanslar ve güçler yeniden hesaplanır. Akım yoğunlukları uygun sınırlar içindeyse sarım sayılarının, belirlenen üst değerlere ulaşip ulaşmadığı kontrol edilir. Ulaşılmadıysa sarım sayıları birer birer artırılarak işlemler yinelenir. Birinci sargı için belirlenen üst sınıra ulaşıldığında bulunan çözüm kümesinin uygun bir çözüm kümesi olup olmadığına bakılır. Uygun bir çözüm kümesi, hem güç değeri, hem bataryaya uygulanacak gerilimi, hem akım yoğunluklarını hem de kararlı bir çalışma için gerekli kalite katsayısı koşulunu ($Q_p > Q_c$) sağlayan çözümdür. Ancak bu tasarım sürecinin sonunda bulunan değerlerin, deneysel çalışma sırasında bir miktar değiştirilmesi söz konusu olabilir.

9. İnsan Sağlığına Etkiler

TGA sistemlerinin insan sağlığı üzerine olumsuz etki yapmaması için önem almak gereklidir. Sargılar arasındaki hava aralığının büyük olmasından dolayı manyetik alanın çevreye saçılması söz konusu olduğundan saçılmayı sınırlayacak önlemler alınmalıdır. Sargıların bir çekirdek üzerine sarılması saçılmayı azaltacaktır. Ayrıca sargı altlarına yerleştirecek ekranlayıcı malzemeler sistem verimini bir miktar düşürseler de saçılan manyetik alanın sınırlanmasına yardımcı olurlar.

Elektromanyetik dalgaların insan sağlığına olan etkileri ile ilgili bazı uluslararası standartlar mevcuttur.

1. IEEE. Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz. (Radyo Frekanslı Elektromanyetik Alanlara İnsanları Maruziyetine İlişkin Güvenlik Sınırları)
2. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz) (Zamanla Değişen Elektrik, Manyetik ve Elektromanyetik Alanlara Maruziyetin Sınırlanmasına İlişkin Kılavuz).
3. World Health Organization (WHO) Electromagnetic fields (300Hz to 300GHz) (Elektromanyetik Alanlar)

Her üç standartta da elektromanyetik alanın kansere sebep olduğu ile ilgili yeterli ve güçlü kanıtların olmadığı belirtilmektedir. Çok ciddi olmamakla birlikte uzun süreli maruz kalınması durumunda karşılaşılabilecek muhtemel problemler şunlardır:

- Dokularda yanma
- Sinir sistemi bozuklukları
- Kas kasılmaları
- Gözde (retina kısmında) bozukluklar.

100kHz üzeri için her üç standardın da özgül soğurma oranı (specific absorption rate-SAR) tanımı geliştirdiği görülmektedir. Bir insan, 30 dakika boyunca 1-4 W/kg seviyesinde elektromanyetik alana maruz kalırsa vücut sıcaklığı 1°C artmaktadır.

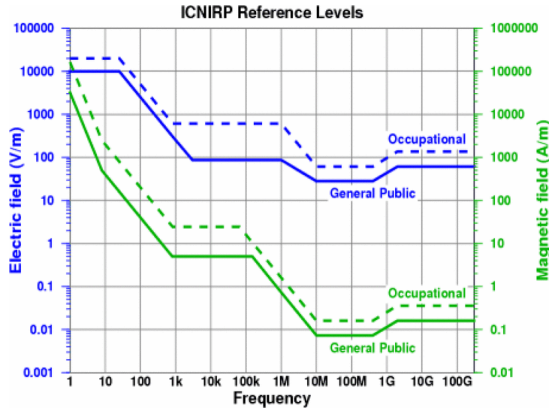
Şekil 20'de, ICNORP tarafından belirlenen sınırlar verilmektedir. Kesikli çizgiler işi gereği bu alanlara maruz kalan kişilere (örneğin sürücüler) ilişkin sınırlamaları, kalın çizgiler ise genelle yönelik (yolcular) sınırlamaları göstermektedir.

TGA sistemlerinde insanların maruz kalabilecekleri alan değerleri ile ilgili ayrıntılı bir çalışma [4]'te verilmektedir.

10. Yabancı Nesne Algılama, Canlı Nesne Algılama ve Hizalama Konuları

TGA sistemleri ile ilgili önemli bir husus da yabancı ve canlı nesnelerin algılanmasıdır.

Güç aktarımı sırasında bobinler arasında girebilecek 2.5 cm^2 'den büyük, iletkenliği yüksek olan metal nesnelere aşırı ısınmadan dolayı yangına yol açabilir. Yabancı nesne algılayıcı özelliği, 2 saniyeden fazla sürede böyle bir nesnenin tespit edilmediği durumda, güç aktarımının durdurulmasını sağlar.



Şekil 20. ICNIRP tarafından tanımlanan sınırlamalar [4]

Araç ile yol arasındaki boşluğa girebilecek bir canlı (örneğin bir kedi), araç bataryasının şarjı sırasında uzun süre manyetik alana maruz kalabilir ve bu alan bu canlının sağlığını olumsuz yönde etkileyebilir. Güç aktarımı sırasında bobinler arasında minimum insan eli/ayağı kadar küçük yapılar veya bu boyutlara sahip bir hayvanın girdiğinin ve 2 saniyeden daha fazla sürede kaldığının algılanması durumunda canlı nesne algılayıcı özelliği sayesinde güç aktarımı durdurulur.

Her iki özellik için de enerji transfer verimini azaltmayacak şekilde çeşitli sensör teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Kapasitif algılayıcılar, havayı dielektrik olarak kabul eden bir RC osilatörü vasıtasıyla kapasitif alan oluşturur. Bu kapasitif alanın içine giren metal veya metal olmayan cisimler, dielektrik seviyesinin değişimine sebep olur. Salınım frekansının değişimi sonucu algılama yapılır.

Dielektrik seviyesi (kapasite) değişikliğini etkileyen faktörler şunlardır:

1. Algılama yüzeyi önündeki cismin uzaklığı ve konumu
2. Cismin boyutları ve şekli
3. Cismin dielektrik katsayısı

Kapasitif sensör teknolojisi, yerel sinyal işleme ve gerçek zamanlı canlı nesne yakınlık tespiti ile entegre halde çalışmaktadır.

Canlı nesne algılayıcı sisteminin hatalı uyarı yapmaması gerekmektedir. Dielektrik seviyesi düşük olan tahta, kağıt veya plastik malzemelerin tespit edilmesi durumunda sistem enerji akışı durdurulmamalıdır.

Yabancı nesne algılayıcılar (YNA) genellikle primer sargıya entegre edilir. İki boyutlu yüksek hassasiyetli manyetik alan sensörleri ve yerel sinyal işleme ve kontrol devreleriyle birlikte sürekli olarak bobinler arasındaki manyetik alanı monitör ederler.

Belirli bir boyut ve iletkenliğe sahip metal parçanın primer sargı üzerine gelmesi durumunda oluşacak girdap akımı manyetik alanda bozulmaya sebep verecek ve bu bozulmalar YNA tarafından tespit edilecektir. Eğer tespit edilen metal nesne tehlike boyutlarında ise sistem enerji akışı durdurulmalıdır. Gerekirse kullanıcıya bu hata durumundan dolayı uyarı verilmelidir. Bu özellik için, enerji transferinin yapıldığı alana yoğunlaşılır. Diğer alanlarda yer alabilecek yabancı nesnelere yanlış alarm sebebiyet vermemelidir.

Batarya şarjı sırasında iki sargının birbirine aynı hızda olması manyetik bağlaşımın olası en iyi değerinde olması için önemlidir. Bu nedenle hizalamayı sağlayacak geribeslemeli bir denetim sistemi oluşturmak gerekmektedir. Bunun yanında, hızının tam olarak sağlanamaması durumunda da akı bağlaşımının göreceli olarak iyi olmasını sağlayabilecek sargı yapıları üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. 5. Bölüm'de anlatılan DDQ yapısı buna bir örnektir.

11. Ticari Uygulamalar

TGA sistemleri üzerinde dünyanın pek çok yerinde çalışmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların sonucunda bazı ticari ürünler elde edilmiştir. Tablo 3'te bu ürünlere ilişkin temel bilgiler verilmektedir.

Tablo 3. Ticarileşmiş Uygulama Örnekleri (BY: Bilgi Yok)

Firma İsmi (Faaliyet yılı/yeri)	Frekans (kHz)	Güç (kW)	Hava Aralığı (cm)	Verim (%)
WITRICITY	85	3.3	10-20	90
QUALCOMM	85	3.3-6.6-7-20	13-18	80-9
EVATRAN	19.5	3.3	10	89
BOMBARDIE R-PRIMOVE	BY	22-200	BY	BY
CONDUCTIX-WAMPFLER	20	60-180	4	>90
MOMENTUM DYNAMICS	BY	3.3-10	61	92
FRAUNHOFER IWES	BY	0.4-3.6	20	93-95
FRAUNHOFER RISE	100	22	13	97.4
BRUSA	81.38 - 90	3.7	13	90
Fast In Charge Projesi	13 - 25	35	9	92

12. Üniversitelerde Yapılan Çalışmalar

Auckland Üniversitesinde 1991 yılında 10 kHz çalışma frekansına sahip ve elektrikli araçlar, elektrikli el aletleri gibi birçok alanda kullanılacak yeni bir TGA sistemi geliştirilmiş ve patenti alınmıştır [36]. Bu çalışma ile TGA yeni bir araştırma alanı olarak görülmüş ve özellikle MIT'de bir grup araştırmacının 2007 yılında gerçekleştirmiş olduğu TGA projesinin ardından üniversitelerde bu alana olan ilgi artmış ve yeni fikirler ışığında projeler geliştirilmiştir. Özellikle çalışma frekansının belirlenmesi ve geniş hava aralıklarında daha yüksek verim elde edilmesi bu projelerdeki önemli çalışma alanlarını oluşturmaktadır. Tablo 4'te bugüne kadar üniversitelerde yapılan bazı önemli projelerdeki TGA sistemlerinin ayrıntılarına ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 4. Üniversitelerde Yapılmış Çalışma Örnekleri (BY: Bilgi Yok)

Üniversite İsmi	Frekansı (kHz)	Güç (kW)	Hava Aralığı (cm)	Verim (%)
KAIST (Kore İleri teknoloji ve Bilim Enstitüsü) [37]	20	3-52	1-20	71-83
Cheng Kung Üniversitesi [38]	25-35	1	0.04	88
UTAH Üniversitesi [39]	BY	25-50	15	>90
ORNL (Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı) [40]	BY	>4	25.4	92
Auckland Üniversitesi [41]	BY	1.5	4	BY
Setunan Üniversitesi [42]	$1.2 \cdot 10^6 - 2.45 \cdot 10^6$	BY	5-25	20-98
Tokohu Üniversitesi [43]	360	15-18	0-200	75
UTAH Üniversitesi [44]	BY	5	BY	90-97
Tokyo Üniversitesi [45,46,47]	$13.56 \cdot 10^6$	60	5-200	40-90
Saitama Üniversitesi [48]	30	1.5-3	7	94
Britanya Kolombiya Üniversitesi [49]	$150 \cdot 10^{-3}$	1.6	15	81
Zaragoza Üniversitesi [50]	15	5	20	95

Ülkemizde de son dönemlerde bu alana ilgi artmış olup, küçük-büyük bazı sanayi kuruluşlarının Ar-Ge çalışması başlattığı bilinmektedir. Ayrıca, üniversitelerimizde yüksek lisans düzeyinde bazı çalışmalar yapılmaktadır. Sonuçlandırılmış tez çalışmalarına bazı örnekler [51, 52, 53]'te bulunabilir.

13. Sonuç

Fosil yakıtların tükenmeye yüz tutmaları ve çevreye verdiği zararlar nedeniyle elektrikli araçlar önemli bir seçenek olarak tartışılmaktadır. Elektrikli araçların bataryalarının hızlı ve etkin doldurulması, bu araçların yaygınlaşmasının önündeki engellerden biridir. Temelleri 1800'lü yılların sonlarında Tesla tarafından kurulan temassız güç aktarım sistemleri, bu engeli aşmaya yönelik olarak yeniden araştırmacıların gündemine girmiştir. Bu makalede, TGA sistemleri hakkında genel bilgiler verilmektedir. Bir literatür incelemesi olarak hazırlanan bu makalenin, konuya ilgi duyan mühendisler ve öğretim elemanları için yararlı olacağı düşünülmektedir.

14. Kaynaklar

- [1] W. W. Massie and C. R. Underhill, "The future of the wireless art," *Wireless Telegraphy Telephony*, pp. 67-71, 1908.
- [2] J. Garnica, R. A. Chinga and J. Lin, "Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1321-1331, June 2013.
- [3] Wheeler L. P., "II — Tesla's contribution to high frequency," in *Electrical Engineering*, vol. 62, no. 8, pp. 355-357, Aug. 1943.

[4] Hui S. Y. R., Zhong W. Ve Lee C. K., "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4500-4511, Sept. 2014.

[5] Secor, H. W., "Tesla Apparatus and Experiments—How to Build Both Large and Small Tesla and Oudin Coils and How to Carry On Spectacular Experiments With Them," *Practical Electrics*, November 1921.

[6] Brown W. C., "Experiments Involving a Microwave Beam to Power and Position a Helicopter," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-5, no. 5, pp. 692-702, Sept. 1969.

[7] A.B. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P.H. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, 317, pp. 83-86, (2007).

[8] Shinohara N., Niwa N., Takagi K., Hamamoto K., Ujigawa S., Ao J-P., et al. "Microwave building as an application of wireless power transfer". *Wireless Power Transfer Cambridge Journals*, 2014;1:1-9.

[9] Chen W., Chinga R. A., Yoshida S., Lin J., Chen C. and Lo W., "A 25.6 W 13.56 MHz wireless power transfer system with a 94% efficiency GaN Class-E power amplifier," *Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2012 IEEE MTT-S International, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3.

[10] Chwei-Sen Wang; Stielau, O.H.; Covic, G.A., "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.52, no.5, pp.1308,1314, Oct. 2005.

[11] Stielau, O.H.; Covic, G.A., "Design of loosely coupled inductive power transfer systems," *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on*, vol.1, no., pp.85-90 vol.1, 2000.

[12] Sallan J., Villa J. L., Llombart A., ve Sanz J. F., "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge," in *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 2140-2149, June 2009.

[13] Kissin, M.L.G.; Boys, J.T.; Covic, G.A., "Interphase Mutual Inductance in Polyphase Inductive Power Transfer Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.56, no.7, pp.2393,2400, July 2009

[14] Pedder D. A. G., Brown A. D. Ve Skinner J. A., "A contactless electrical energy transmission system," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 1, pp. 23-30, Feb 1999.

[15] Boys J. T., Covic G. A. ve Green A. W., "Stability and control of inductively coupled power transfer systems," in *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 147, no. 1, pp. 37-43, Jan 2000.

[16] <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/presseinformationen-2013/cables-no-longer-needed>.

[17] Aditya K. ve Williamson S. S., "Design considerations for loosely coupled inductive power transfer (IPT) system for electric vehicle battery charging-A comprehensive review," *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2014 IEEE, Dearborn, MI, 2014, pp. 1-6.

[18] Chopra S., Bauer P., "Analysis and design considerations for a contactless power transfer system," in *proc. IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference*, Oct. 2011, pp.1-6.

[19] Wang C.S., Covic G. A., ve Stielau O. H., "General stability criteria for zero phase angle controlled loosely coupled inductive power transfer systems," in *Proc. IEEE Annual Conf. of the Industrial Electronics Society*, Denver, CO, vol. 2, Nov. 2001, pp. 1049-1054.

- [20] Wang C. S., Covic G. A., ve Stielau O. H., "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 148-157, Feb. 2004.
- [21] Ho, T.C.Y.; Gomersall, B.; Li Ran, "Contactless charging for electric vehicles with a large air gap," *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, vol., no., pp.1,10, Aug. 30 2011-Sept. 1 2011.
- [22] Wang C. S., Stielau O. H., Covic G. A., "Load models and their application in the design of loosely coupled Inductive power transfer systems," in *proc. IEEE international conference on power system technology*, 2000, pp. 1053-1058.
- [23] Villa J. L., Sallan J., Sanz Osorio J. F. ve Llombart A., "High-Misalignment Tolerant Compensation Topology For ICPT Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 945-951, Feb. 2012.
- [24] Valtchev S., Borges B., Brandisky K. ve Klaassens J. B., "Resonant Contactless Energy Transfer With Improved Efficiency," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 3, pp. 685-699, March 2009.
- [25] Sakamoto H., Harada K., Washimiya S., Takehara K., Matsuo Y. ve Nakao F., "Large air-gap coupler for inductive charger [for electric vehicles]," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 5, pp. 3526-3528, Sep 1999.
- [26] Kim J. ve arkadaşları., "Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1332-1342, June 2013.
- [27] Budhia M., Covic G. A. ve Boys J. T., "Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3096-3108, Nov. 2011.
- [28] Li S. ve Mi C. C., "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, March 2015.
- [29] Nagatsuka Y., Ehara N., Kaneko Y., Abe S. ve Yasuda T., "Compact contactless power transfer system for electric vehicles," *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, Sapporo, 2010, pp. 807-813.
- [30] Budhia M., Covic G. ve Boys J., "A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems," *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, 2010, pp. 2487-2492.
- [31] Budhia M., Boys J. T., Covic G. A. ve Huang C. Y., "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 318-328, Jan. 2013.
- [32] Zaheer A., Kacprzak D. ve Covic G. A., "A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, 2012, pp. 283-290.
- [33] Deng J., Li W., Nguyen T. D., Li S. ve Mi C. C., "Compact and Efficient Bipolar Coupler for Wireless Power Chargers: Design and Analysis," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6130-6140, Nov. 2015.
- [34] Covic G. A. ve Boys J. T., "Inductive power transfer," in *Proc. of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1-14, June 2013.
- [35] Diekhans, T.; De Doncker, R.W. "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, On page(s): 6320-6328 Volume: 30, Issue: 11, Nov. 2015.
- [36] John T. Boys ve Andrew W. Green, "Inductive power distribution system" U.S. Patent US5293308, 1991. H. Jin ve C. T. Rim, "KAIST wireless electric vehicles-OLEV," *SAE International*, vol. 1, pp. 1-10, 2011.
- [37] J. Lee, H. Shen ve C. Li, "Three-phase inductive coupled structures for contactless PHEV charging system", *International Journal of Electronics*, 2015.
- [38] M. Kesler ve P. Foy. "Utah to deploy electric bus that needs no plug", 2011.
- [39] M. B. Scudiere ve J. M. Miller, "Wireless Charging System for Electric Vehicles", 2011.
- [40] U. K. Madawala ve D. J. Thrimawithana, "A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 4789-4796, 2011.
- [41] T. Horiuchi ve K. Kawashima, "Study on Planar Antennas for Wireless Power Transmission of Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 130, pp. 1371-1377, 2010.
- [42] F. Sato, J. Morita, T. Takura, T. Sato, ve H. Matsuki, "Research on Highly Efficient Contactless Power Station System using Meander Coil for Moving Electric Vehicle Model," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 36, pp. 249-252, 2012.
- [43] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, ve D. Bronson, "A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics* vol. 8, pp. 585-595, 2012.
- [44] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, ve M. Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, p. 83, 2007.
- [45] T. Imura, H. Okabe, ve Y. Hori, "Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for Electric Vehicles by using magnetic resonant couplings," presented at the *IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference*, 2009.
- [46] T. Beh, M. Kato, T. Imura, ve Y. Hori, "Wireless power transfer system via magnetic resonant coupling at fixed resonance frequency. Power transfer system based on impedance matching," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 4, pp. 744-753, 2012.
- [47] M. Chigira, Y. Nagatsuka, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, ve A. Suzuki, "Smallsize light-weight transformer with new core structure for contactless electric vehicle power transfer system," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, 2011, pp. 260-266.
- [48] W. Li, "High efficiency wireless power transmission at low frequency using permanent magnetic coupling" "Master of Applied Science, The Faculty of Graduate Studies The University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada, 2007.
- [49] J. L. Villa, A. Llombart, J. F. Sanz and J. Sallan, "Practical Development of a 5 kW ICPT System SS Compensated with a Large Air gap," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, 2007, pp. 1219-1223.
- [50] Uzun G., "Kablosuz Enerji Transferi", Y. Lisans Tezi, 19 Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2012.
- [51] Fincan B., "Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı", Y. Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
- [52] Ağçal, A., "Kablosuz Enerji Transferinde Farklı Hava Aralıkları Ve Karakteristik Empedanslara Göre Verim Analizi", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2014.



Ali Pashaei

1989 yılında Tebriz’de doğan Ali Pashaei, Lisans eğitimini 2012 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden Tebriz Azad Üniversitesi’nde tamamladı. 2014 yılında Yüksek Lisans derecesini Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendislik Bölümü’nde tamamlayarak aynı yıl Doktora eğitimine Gazi Üniversitesi’nde başlamıştır ve halen devam etmektedir. Güç elektroniği ve temassız güç aktarım sistemlerinde çalışmalarını devam ettirmektedir. Akademik kariyeri boyunca çeşitli San-Tez ve Tübitak projelerinde araştırmacı olarak görev yapmıştır. İlgi duyduğu araştırma alanları arasında güç elektroniği, temassız güç aktarım sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrik makineleri yer almaktadır.



Emrullah Aydın

1986 yılında Elazığ’da doğan Emrullah Aydın, lisans eğitimini 2009 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde tamamladı. 2014 yılında yüksek lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde tamamlayarak aynı yıl doktora eğitimine Gazi Üniversitesi’nde başlamıştır ve halen devam etmektedir. Elektrik makineleri ve temassız güç aktarım sistemlerinde çalışmalarını devam ettirmektedir. İlgi duyduğu araştırma alanları arasında elektrik makineleri, temassız güç aktarım sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları ve güç elektroniği yer almaktadır.



Mehmet Polat

ASELSAN A.Ş. Ulaşım, Güvenlik, Enerji ve Otomasyon Sistemleri Sektör Başkanlığı’nda (UGES) Ulaşım ve Enerji Sistemleri Sistem Mühendisi olarak görev yapmakta olan Mehmet Polat, lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi; yüksek lisans eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde sırasıyla 2009 ve 2012 yıllarında tamamladı. Polat, 2009 yılından itibaren savunma projelerinde güç ve kontrol sistemleri alanında geliştirici olarak görev almıştır. 2014 yılında ASELSAN bünyesinde UGES Sektör Başkanlığı’nın kurulması ile birlikte ulaşım ve enerji alanlarında sistem mühendisliği yapmaya başlayan Polat, halen raylı araç, elektrikli araç, akıllı şebekeler ve yenilenebilir enerji projelerinde sistem mühendisliği faaliyetlerinde aktif olarak görev yapmaktadır.



Emin Yıldırım

1981 Edirne doğumlu olan Emin Yıldırım, lisans eğitimini 2004 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi’nde aldı. 2005 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Meslek Yüksekokulu’nda öğretim görevlisi olarak göreve başladı. 2008 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı ve 2014 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü elektrik makineleri bilim dalından doktora derecesi aldı. 2015 yılından beri Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanlarından bazıları; düşük ve yüksek frekanslı elektromanyetik uygulamalar, sürekli mıknatıslı senkron makine tasarımı, analizi ve optimizasyonu, rüzgar türbinlerine yönelik sıradışı melez uyartımlı senkron makine tasarımıdır.



M. Timur Aydemir

M. Timur Aydemir, 1962 Trabzon-Maçka doğumludur. Lisans ve yüksek lisans derecelerini 1983 ve 1985 yıllarında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden, doktora derecesini ise 1995 yılında University of Wisconsin-Madison, Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden almıştır. 1995 yılından beri Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde çalışmaktadır. Güç Elektroniği alanında çalışmalar yapmaktadır.