

ELEKTROMANYETİK FIRLATICILAR

Çağdaş TUNCEROĞLU¹ Uğur HASIRCI² Engin HÜNER³ Zülkif SARI⁴

¹ Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, TÜRKİYE

² Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, TÜRKİYE

³ Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 39000, Kırklareli, TÜRKİYE

⁴ Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, 81620, Düzce, TÜRKİYE

cagdastunceroglu@duzce.edu.tr

ugurhasirci@duzce.edu.tr

engin.huner@klu.edu.tr

zulkifsari@duzce.edu.tr

Özet-Bu çalışmada Elektromanyetik Fırlatıcı'ların çalışma prensibi, yapısı, türleri, bu tür fırlatıcılar için güç kaynakları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Elektromanyetik Fırlatıcı, Bobinli Silah, Güç Kaynağı.

ELECTROMAGNETIC LAUNCHERS

Abstract-In this study, a review of Electromagnetic Launcher's theory of operation, structure, types and power sources is presented.

Key Words- Electromagnetic Launchers, Coilgun, Power Source.

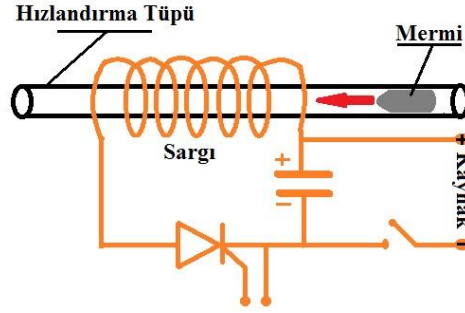
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1980'lerin daha öncelerinden itibaren elektromanyetik fırlatıcılar ile ilgili çalışmalar, ABD'de ciddi olarak yürütülmüştür. Yapılan İlk çalışma bir kaç gramdan daha ağır olan kütlelerin yüksek hızlarla fırlatılabilmesiydi. DARPA(ABD Ordusu ve İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı)'nın ilk başarılı fizibilite gösteriminden sonra, çalışmaları manyetik olarak kaldırılan trenleri içeren manyetik tahrik, elektromanyetik mancınıklar (katapult) kullanılarak uçakların fırlatılması, metallerin uzaya fırlatılması, küçük mermilerin aşırı yüksek hızlarda fırlatılması vb. birçok konuda yaygınlaşmıştır. 1985'lerde DARPA elektromanyetik fırlatıcı teknolojilerini kullanarak, gelişmiş zırhlı savaş araçlarını yenilgiye uğratabilecek arazi savaş araçlarını değerlendirmeye almıştır [1]. Fakat hâlihazırda kullanılan teknolojiler ile araçların zırhlarını delebilecek hızlara ulaşamamıştır. Bu nedenle sonraki elektromanyetik fırlatıcı sistemlerinde yüksek verim amaçlı, raylı sistemlerden fırlatmalar için plazma armatürleri yerine katı armatürler seçilmiştir. Potansiyel güç kaynakları olarak da kondansatörler ve darbeli alternatörler kullanılmıştır [2].

* Bu çalışma, DÜBAP tarafından 2016.07.03.438 nolu proje ile desteklenmiştir.

2. ELEKTROMANYETİK FIRLATICILAR (ELECTROMAGNETIC LAUNCHERS)

Elektromanyetik fırlatıcıların çalışmasının temel ilkesi, elektromanyetik teoriye dayanır. Gerçekleştirilmeye çalışılan, değişen ya da hareket eden güçlü bir elektromanyetik alan oluşturarak, hareket ettirilecek ya da fırlatılacak nesnenin bu elektromanyetik alanı izlemesini sağlamaktır. Elektromanyetik fırlatıcı uygulamalarını bu denli ilginç kılan özellik gelişmeye açık olmasıdır. Aşağıdaki şekilde basit bir elektromanyetik fırlatıcının iç yapısı gösterilmiştir [3-4].

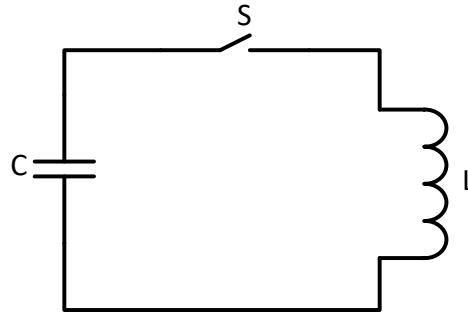


Şekil 1. Basit bir elektromanyetik fırlatıcının iç yapısı

Bir sargıdan akım aktığında sargının çevresinde manyetik alan oluşturacaktır. Sargının iç hacminde bu manyetik akı yoğunlaşacaktır. Metalik bir cisim (mermi) sargının yakınına yerleştirilecek olursa manyetik akı, düşük relüktanslı olması nedeniyle bu cisim içinden akmayı tercih edecek ve manyetik indüksiyon oluşturarak cismi içine çekecektir.

Tek bir sargı kullanmak yerine, yan yana dizilmiş belirli sayıda sargılar kullanıldığında; her bir sargı mermiyi içine çekerek hızlandıracak ve sargıların bittiği yerde kazandığı kinetik enerji ile mermi dışarı fırlatılacaktır.

Fırlatıcının elektrik eşdeğer devresi, temelde bir anahtar üzerinden paralel olarak bağlanmış bir sargı ve bir kondansatörden ibarettir. Bu elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.'de gösterilmiştir [5-6].



Şekil 2. Fırlatıcının elektriksel eşdeğer devresi

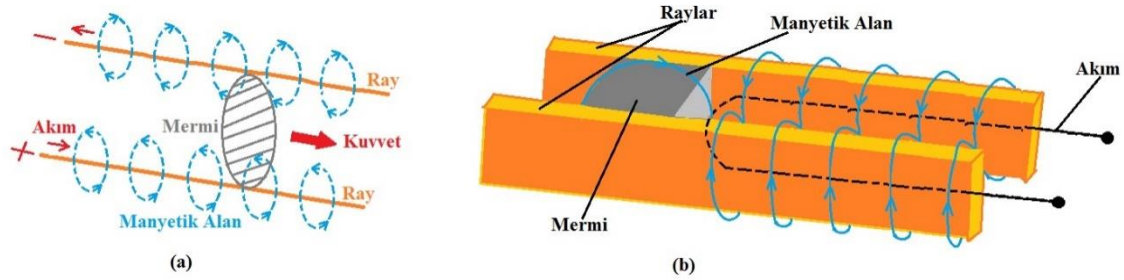
Devreden görüleceği gibi elektromanyetik fırlatıcılarda kullanılan sargıdan dolayı indüktans ve direnç, sargıyı besleyen kapasiteden dolayı seri bir RLC devresine benzemektedir. Seri RLC devreleri, çoğu yüksek gerilim ve darbeli boşalma devrelerinde öncelikli bir modeldir.

2.1. Elektromanyetik Fırlatıcıların Çeşitleri (Electromagnetic Launcher Types)

Raylı elektromanyetik fırlatıcılar, sargılı elektromanyetik fırlatıcılar, karma elektromanyetik fırlatıcılar ve doğrusal hareketli fırlatıcılar olmak üzere 4 çeşittir.

2.1.a. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcılar (Railed Electromagnetic Launchers)

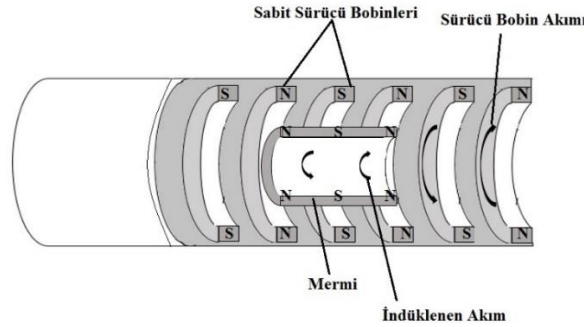
Bu tür fırlatıcılarda iki metal ray bulunur, fırlatılacak cisim bu iki metalin arasında bulunur. Fırlatma işlemi cismin üzerinde elektriksel itme kuvveti oluşturularak gerçekleştirilir. Genel uygulamalarda çoğunlukla bakır raylar kullanılır. Raylı fırlatıcılarda oluşan ısınma problemi ile ilgili ray direncine etkileyen ray ömrü, ray oyuk geometrisi vb. konularda çalışmalar devam etmektedir. Altta şekil bu tür fırlatıcılara örnek genel ve fiziki yapısı gösterilmiştir [7-9].



Şekil 3. a) Genel Yapısı b) Fiziki Yapısı

2.1.b. Sargılı Elektromanyetik Fırlatıcılar (Coil Electromagnetic Launchers)

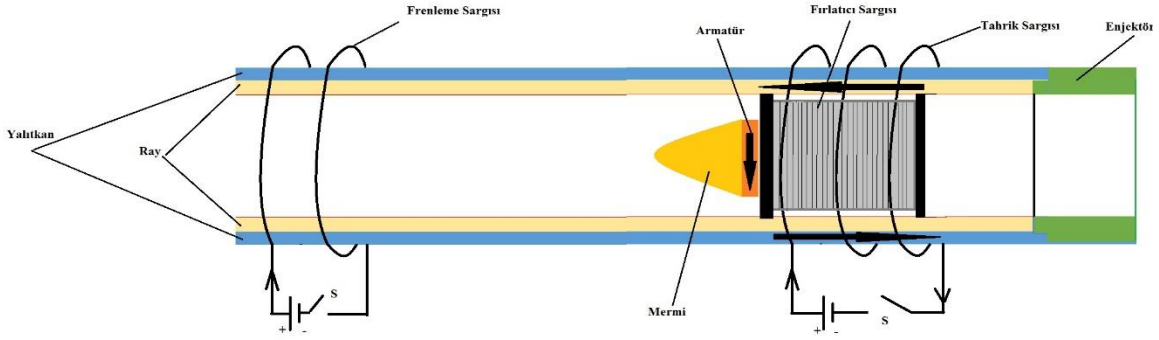
Ardışık sürücü sargıların oluşturduğu elektriksel itme kuvveti ile cismin fırlatılması gerçekleşir. Büyük kütleli cisimlerin orta hızlarda fırlatılmasında yaygın olarak kullanılırlar. Sargılı fırlatıcıların raylı fırlatıcılara göre mekanik zorlanmanın daha geniş bir yüzeye yayılması, namlu ve mermi arasındaki temassızlık sayesinde uzun ömürlü ve daha verimli olması, sargılı fırlatıcıların avantajlarıdır. Şekil 3.'de genel bir yapısı gösterilmiştir [10-11].



Şekil 4. Sargılı Fırlatıcı Genel Yapısı

2.1.c. Hibrit Elektromanyetik Fırlatıcılar (Hybrid Electromagnetic Launchers)

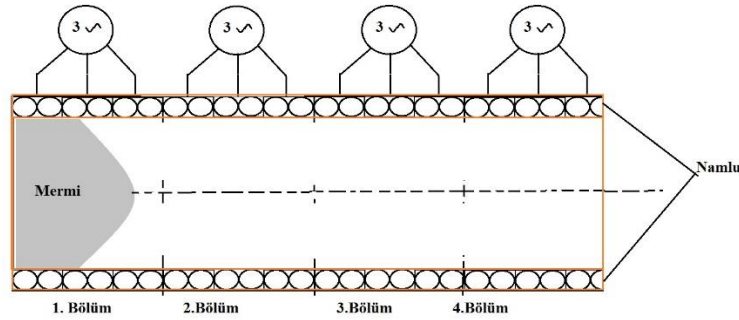
Bu tip fırlatıcı yapılarında hem raylı hem de sargılı fırlatıcı sistemini bulundurlar. Diğerlerine göre daha az akımla çalışarak ve sargılı ve raylı tip fırlatıcıların özelliklerini karşılayabilirler. Tasarımsal olarak daha basit bir yapıya sahiptirler ve maliyetleri daha düşüktür. Şekil 4.'te hibrit bir fırlatıcının iç yapısı gösterilmiştir [12].



Şekil 5. Hibrit (raylı-sargılı) Fırlatıcı İçyapısı

2.1.d. Doğrusal Hareketli Fırlatıcılar (Linear Motion Launchers)

Bu tip fırlatıcılar asenkron motor prensibine göre çalışırlar ve hava nüveli sargılı fırlatıcılardır. Fırlatılacak olan cisim alüminyumdan oluşan bir tüp içerisinde bulunmaktadır. Namludaki sargılar çok fazlı bir kaynaktan beslenerek, namlu içerisinde dolanan dalgalar oluşturmaktadır. Namlu birden fazla bölüme ayrılır ve her bir bölüm farklı frekanslardaki enerji kaynaklarıyla beslenir. Bir bölümdeki frekans bir öncekinden daha yüksektir. Altta şekil gibi basit bir doğrusal fırlatıcı yapısı gösterilmiştir [13-14].



Şekil 6. Üç fazlı 4 bölmeli doğrusal fırlatıcı

3. ELEKTROMANYETİK FIRLATICILAR İÇİN GÜÇ KAYNAKLARI (POWER SUPPLY FOR ELECTROMAGNETIC LAUNCHER)

3.1. Volanlı Güç Kaynakları (Flywheel Power Supplies)

Bobinli manyetik fırlatıcılar (BMF) elektrik enerjisini lineer hareket enerjisine dönüştüren elektrik makinalarıdır. Hareket enerjisi elde etmek için kısa sürede yüksek enerjiye gereksinim duyarlar. BMF'nin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin kaynağı kısa sürede yüksek deşarj akımına sahip olmalıdır. Bunun yanı sıra yüksek çevrim ömrü de istenen diğer bir özelliktir. Bu özellikleri bünyesinde barındıran sistemlerden biri de volanlı enerji depolama sistemleridir. Volanlı enerji depolama sistemleri (VEDS) dönen bir volanın depoladığı kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayanır. Dönen volanın kinetik enerjisi volanın sertlik derecesine, volanın hacmine ve volanın şekline bağlıdır [15-17]. Volanda depolanan kinetik enerji hızın karesi ile doğru orantılı olarak değişir. VEDS'nin hızı 3.000 d/dk'lardan 60.000 d/dk'lara kadar çıkmaktadır. VEDS'nin yüksek hızlarda tasarlanması bazı mekanik problemlere neden olmaktadır. Bunun üstesinden gelmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Dolayısıyla VEDS'ler

hıza bağlı olarak ikiye ayrılır [18]. Birincisi VEDS'nin hızı 6.000 d/dk'ya kadar olanlara düşük hızlı, 6.000 d/dk'dan daha yüksek hızlara ise yüksek hızlı VEDS'ler olarak tanımlanmıştır. Yüksek hızlı VEDS'lerin en ayırt edici özellikleri mekanik rulmanlar yerine manyetik rulmanların kullanılması ve daha karmaşık kontrol algoritmalarıdır. VEDS'ler enerjiyi depolayan volan, mekanik veya manyetik rulmanlar, vakum gövdesi, alternatör-motor setinden oluşmaktadır [19-20].

Enerjinin depolanması için günümüzde aküler, süper kondansatörler, lityum piller ve VEDS kullanılmaktadır. Akü ve lityum içerikli piller enerjiyi kimyasal yolla depolamaktadır. Depoladıkları enerji miktarları diğerlerine göre yüksek olmasına karşın çevrim ömürleri sınırlıdır. Bunun yanında akülerin deşarj akımları da düşüktür. Süper kondansatörler ve VEDS'ler kimyasal bataryalara göre çevrim ömürleri ve deşarj akımları yüksektir [21-22]. VEDS'leri süper kondansatörlerden ayıran en önemli özellik ise daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarıdır. Bu nedenle son yıllarda enerji depolama üstünde çalışılan önemli konulardan biridir [19]. VEDS'ler üzerine yapılan çalışmalar; rüzgâr enerji santrallerindeki güç dalgalanmalarında, güneş enerji santrallerinde kısa süreli enerji depolamada, güç üretim sistemlerindeki enerji dalgalanmalarını gidermek için, uzay mekiklerinde enerji depolamak için, trenlerin tahrik sistemlerinde, uçak ve uzay mekiği fırlatma sistemleri üzerine, raylı ve bobinli manyetik fırlatıcılar olmak üzere birçok alanda araştırmalar yapılmaktadır [23-26].

VEDS'ler yapıları gereği kimyasal bataryalara göre daha az enerji depolamasına karşın düşük bakım maliyetleri, uzun kullanım ömürleri, yüksek sayıda şarj-deşarj imkânları ve çeşitli kullanım alanları açısından birçok avantaja sahiptir. Bu yüzden de son yıllarda yoğun şekilde araştırmalara konu olmaktadır. Bununla birlikte yapılan çalışmalar genellikle prototip aşamasındadır. Güç dalgalanmalarını kompanze etmek amacıyla yapılan ticari düzeyde uygulamaları da artık literatürde görmek mümkündür. Ticari olarak güç sistemlerindeki enerji dalgalanmalarını 20 dakika süre ile 10 MW enerji kapasitesine sahip VEDS tasarımı ve üretimi gerçekleştirilerek yapılan çalışma mevcuttur [19]. Kato ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada farklı türdeki VEDS tasarımları enerji ağ sistemleri için geliştirilmiştir. Her bir prototipin şarj ve deşarj enerjileri karşılaştırılarak verimleri incelenmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarındaki çevresel koşulların değişimi nedeniyle meydana gelen güç dalgalanmalarını gidermek içinde VEDS'lerin ideal oldukları belirtilmiştir [19]. Yüksek enerji depolama gereken yerlerde kontrole gerek kalmayan mekanik rulmanlar kullanılarak düşük hızlı fakat yüksek enerji depolayabilen tasarımlar geliştirilmiştir [16-19]. Yüksek hızlı ve manyetik rulmanların kullanıldığı sensörler vasıtasıyla karmaşık algoritmalar ile kontrol edilebilen tasarımlar prototip aşamasında olup yapım zorlukları, maliyetleri ve kompleks yapıları nedeniyle düşük enerjiye sahiptirler [22-23-24-26]. Vakum altında manyetik rulmanlar ile yüksek hızlarda enerji depolayan VEDS'ler uzay uygulamaları ile dikkati çekmektedir [26]. Mikro düzeyde 50000-60000 devir/dakika hızında enerji depolayan VEDS'lerin müknessatları tek parça olarak sekmenlere ayrılmış biçimde üretilerek merkez kaç kuvvetlerden dolayı fırlaması önlenmektedir. Bununla birlikte stator sargıları da baskı devre kartlarında oluşturularak kompakt bir yapı sağlanmıştır [26-27].

Enerji piyasasında rüzgâr ve güneş enerjisinin de gelişmesiyle bu sistemlerde enerji dalgalanmalarını önlemek ve kısa süreli (3-4 saat) enerjinin depolanması amacıyla VEDS önerilmiştir [28-29]. Rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinde meteorolojik şartlara bağlı olarak meydana gelen enerji dalgalanmalarını gidermek için VEDS'lerin enerji yönetimi içinde değerlendirilerek kullanılması yenilenebilir enerji kaynaklarını daha yüksek verimde kullanmamızı sağlamaktadır [29]. Yenilenebilir enerji kaynakları için yüksek şarj deşarj verimine sahip VEDS'ler kimyasal bataryalara göre yüksek ömürleri, yüksek şarj deşarj akımları açısından avantajlıdır. Araştırmacılar yeni prototiplerle kimyasal bataryalara göre daha az enerji depolayan bu sistemlerin enerji depolama kabiliyetlerini arttırmaya yönelik çalışmalar gerçekleştirmektedir. Bunun için mevcut VEDS'lerde kayıplar incelenerek toplam enerji

kayıplarını azaltıcı yönde çalışmalarda gerçekleştirilmektedir [20-30]. Yapılan çalışmalarda girdap akımları kayıplar üzerine etkisinin büyük olduğu vurgulanmıştır. Elektrik makinelerindeki kayıplar ısı şeklinde ortaya çıktığı için sistemin toplam ısısı artmakta bu durumda mıknatısların manyetik özelliklerini kaybetmelerine de yol açabilmektedir. Bu yüzden VEDS'lerin kullanım alanına uygun yapıda olması ve tasarım kriterlerinin dikkatli seçilmesi gerekmektedir.

VEDS'lerin bir diğer dikkat çekici uygulama alanı ise çok kısa sürelerde (1-2 saniye) yüksek enerji gereksinimi duyulan uygulama alanlarıdır [25]. Bu uygulama alanlarına uçak fırlatma sistemleri ve elektromanyetik fırlatıcılar girmektedir. Ayrıca uzay mekiklerini de manyetik fırlatıcı sistemlerle fırlatılması üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Elektromanyetik uçak fırlatma sistemi için 2 saniyede 120 MW enerjiye gereksinim duyulmaktadır [25]. Elektromanyetik fırlatıcı sistemleri 2 grupta toplanabilir. Birincisi bobinli fırlatıcılar, ikincisi ise raylı fırlatıcı sistemleridir. Bobinli fırlatıcılar manyetik alanın içine yerleştirilen merminin üzerinde oluşan manyetik alanın ana manyetik alan tarafından iletilmesi prensibine göre çalışır. Esas itibari ile asenkron makinenin lineer olarak açılmasına benzer ve manyetik etki ile mermi fırlatılır. Raylı fırlatıcılar ise iki ray arasına yerleştirilen mermi üzerinden geçen akım ve içinde bulunduğu manyetik alana bağlı olarak, Lorentz kanununa göre mermi üzerinde oluşturulan kuvvete bağlı olarak fırlatılır. İki sistemde de çok kısa sürede yüksek akımlara yani yüksek enerjiye gereksinim vardır [31]. Bu sistemleri beslemek içinde son yıllarda VEDS'ler üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Savunma sanayinde kullanılmak için elektromanyetik fırlatıcı sistemleri için yapılan VEDS tasarımında 1-2 saniyede yüksek akımı sisteme verebilecek tasarım gerçekleştirilmiştir. Bunun için yapılan bir çalışmada uçak fırlatma sistemleri için 2 saniyede 120 MW enerjiye gereksinim olduğu belirterek bunu sağlayacak prototip bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımda VEDS motor modunda iki sargı ile kinetik enerji depolanmış ve alternatör modunda ise sadece ikinci sargı devrede kalarak kısa sürede yüksek enerjinin sistemden alınması sağlanmıştır [25]. Yapılan tasarım nüvesiz statora sahiptir ve süreç içinde oluşan kuvvetlerden dolayı statorun ikinci defa üretilmesi dikkat çekicidir. Bununla birlikte alternatör modunda çalışırken enerjinin alınmasıyla birlikte alternatör hızının düşmesiyle birlikte gerilimin sabit kalması için ikinci bir alan zayıflatma sistemi geliştirilmiştir. Fakat bu durumun, enerji beslemesinin de 2 saniye olduğu göz önünde tutulduğunda, motor-alternatör setinin çok karmaşık hale gelmesine sebep olduğu görülmektedir. Şayet 3-4 saat gibi bir süre için bir VEDS tasarımı gerçekleştirilecek olsaydı, bu durumda alternatörün başlangıç devri ile referans son devri arasındaki farka göre gerilimde değişme olacağı için alan zayıflatma tekniğinin uygulanması ve buna göre motor-alternatör setinin tasarlanması gerekli olurdu. Dolayısıyla kısa süreli manyetik fırlatıcı sistemleri için geliştirilecek volanlı motor-alternatör seti kompakt ve sade tasarım içermelidir.

VEDS'nin dönen volanın hacmi ve ağırlığı göz önünde tutulduğunda en uygun motor-alternatör setinin kompakt yapısı ve yüksek güç yoğunluğu açısından eksenel akılı sabit mıknatıslı makine tipi olduğu görülmektedir [32-34]. Eksenel akılı makineler düşük hızlarda sağladıkları yüksek moment sayesinde direkt sürülebilir ve dişli sisteme gereksinimi olmayan makinelerdir. Dolayısıyla düşük hızda volana ilk hareketin verilmesi ve belirli bir referans hıza ulaşması açısından EASM motor idealdir. Bununla birlikte yüksek hızlarda EASM motoru sürmek için çok yüksek frekanslı sürücülere gereksinim vardır. Ayrıca yüksek frekanslı sistemler, nüveli tip EASM motorun histerezis ve girdap akımı kayıplarını ciddi oranda artırır. Bu yüzden yapılan VEDS tasarımlarında nüvesiz tip eksenel akılı makine yapısı kullanılmıştır [25-26-27-30]. Bununla birlikte nüveli tip EASM makinelerin kullanımında ise az kutuplu tasarım yapılarak 300 Hz'e kadar olan frekanslarda uygulama gerçekleştirilmiştir [16-21]. EASM makinede kutup sayısını azaltmak 50 Hz için devir sayısını yükseltir. Fakat düşük kutup sayısı makine boyutlarını sınırlandırır veya büyük makine boyutları içinde özel tasarım mıknatısların yapımını gerektirir. Buda toplam maliyet açısından olumsuz bir etkidir. Ayrıca EASM makinenin yüksek kutup sayısı

ile ve nüveli tip tasarımı düşük hızlarda yüksek moment elde edilmesini sağlar bu da VEDS için önemlidir.

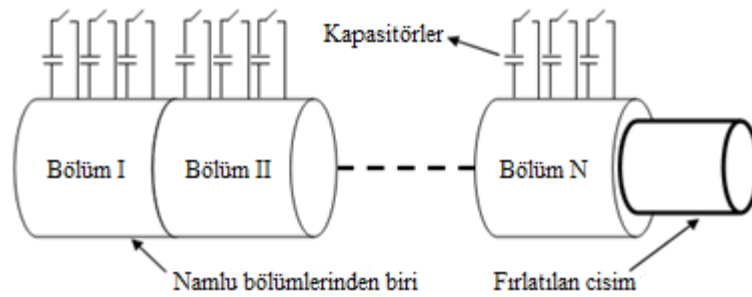
Ülkemizde elektromanyetik fırlatıcı çalışmaları, ağırlıklı olarak bobinli silah tipi fırlatıcıların, [35] tarafından önerilen ve “Lineer İndüksiyon Fırlatıcı” adı verilen, hava nüveli özel bir formuna yoğunlaşmıştır. Fırlatıcının hava nüveli olması, taşınabilirliğini artırmakta ve bu nedenle donanma gemileri, hava ve kara taşıtları gibi araçlarda, araca kalıcı olarak sabitlenmesini gerektirmeden kullanılabilmesini sağlamaktadır. [36], bu fırlatıcıların 50 m/s hızına sahip bir prototipini üretmiştir. Yine [37], bu kez 250 m/s hıza sahip bir fırlatıcı üretmiş ve test sonuçlarını sunmuşlardır. Ayrıca [38] bu tür fırlatıcıların sadece savunma sanayinde değil, uzay endüstrisinde kullanılabilecek özel formu için tasarım algoritması sunmuşlardır. Bu tür fırlatıcıların manyetik levitasyon trenlerine uygulanan özel bir formuna ilişkin deneysel sonuçlar [39] tarafından sunulmuştur. [40], bu tür fırlatıcılar için özel olarak tasarlanan volanlı motor-alternatör setlerinin doğrusal olmayan kontrolüne ilişkin benzetim sonuçları sunmuştur.

3.2. Kondansatörlü Güç Kaynakları (Capacitor Power Supplies)

Kondansatörlü Güç Kaynakları, volanlı kaynaklara önemli bir alternatif sunar. Volanlı güç kaynaklarına göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri mevcuttur. Şekil 7, çok parçalı bir fırlatıcı için kondansatörlü güç kaynağının yapısını göstermektedir. Aynı yapı, tek parçalı güç kaynağı ile de kullanılabilir. Eğer kullanılan fırlatıcı alternatif akım ile çalışan bir fırlatıcı ise, doğal olarak kondansatörlerin bağlandığı DC baranın uçlarına bir invertör bağlanması gerekmektedir.

Günümüz yarıiletken teknolojisi, kondansatörlü güç kaynaklarını geçmiş yıllara göre daha avantajlı kılmıştır. Zira elektromanyetik fırlatıcılarda temel problem, fırlatma işleminin çok kısa sürmesi ve bu sürede devasa bir enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır. Geçmiş yıllarda çok yüksek akım ve gerilim seviyelerine sahip MOSFET, IGBT gibi anahtarlar mevcut değil iken, günümüz yarıiletken teknolojisi yüksek akım gerilim seviyelerine olanak sağlamaktadır. Ayrıca anahtarlama hızları da geçmişe göre oldukça yüksektir.

Ancak kondansatörlü fırlatıcıları günümüzde daha cazip kılan tek etken, yarıiletken teknolojisi değildir. Günümüzde kondansatörleri kapasitesi de oldukça artmıştır. Özellikle ultrakapasitör teknolojisi oldukça hızlı bir gelişim ivmesi göstermiş ve hem akım-gerilim seviyeleri artmış, hem de kapasiteleri çok yüksek değerlere ulaşmıştır. Elektromanyetik fırlatıcılar için, ultrakapasitörlere ilişkin en az akım-gerilim seviyeleri ve enerji depolama kapasitesi kadar önemli bir faktör, enerji deşarj hızıdır. Özellikle film kapasitörler, depoladıkları enerjiyi çok hızlı bir şekilde deşarj edebilmektedir.



Şekil 7. Kondansatörlü tahrik bobininin bir taslağı

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Elektromanyetik fırlatıcılar, barutlu fırlatıcılara güçlü bir alternatif teşkil ederler. Barutlu (kimyasal) fırlatıcılar, çoğu zaman fırlatma işleminden sonra bakım çabasına ihtiyaç duyarlar. Elektromanyetik fırlatıcılar ise böyle bir çabaya ihtiyaç duymazlar ve teorik olarak sonsuz sayıda ardışık mermi fırlatabilirler. Temel olarak, raylı silahlar ve bobinli silahlar olmak üzere iki tür elektromanyetik fırlatıcı mevcuttur. Raylı silahlarda mermi ile raylar arasındaki sürtünme, aşılması gereken temel problemdir. Bobinli silahlarda ise mermi, herhangi bir sürtünme olmaksızın hareket eder. Ancak yine de şu ana kadar bir elektromanyetik fırlatıcı ile elde edilmiş en yüksek hız, bir raylı silah tarafından elde edilmiştir.

Elektromanyetik fırlatıcılar, savunma ve uzay endüstrisi için, kimyasal fırlatıcılara güçlü bir alternatif teşkil ederler. Bu tür fırlatıcıların çalışma prensibi, alternatif kullanım alanları için de araştırmayı dikte eder.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Harry Fair, 2003: The Electromagnetic Launch Technology Revolution, University of Texas at Austin, USA.
- [2]. Akyazı, Ö. ve Akpınar, A. S. 2008: Elektromanyetik Fırlatıcılar, Fen ve Mühendislik Bilgisi Dergisi, Fırat Üniversitesi, Türkiye, 29 Ocak, sf. 117-126..
- [3]. <https://www.rappinstruments.de/accelerator/Coilgun/coilgun.html>.
- [4]. <https://www.sfwar.com/pyodogi/pyodogi0001b.html>.
- [5]. <https://www.nas.nasa.gov/.../Nowicki/SPBI112.html>.
- [6]. <http://members.home.nl/yja.wolters/Coilgun/Coilgun1.html>.
- [7]. http://www.physics4u.gr/articles/2006/electromagnetic_propulsion.html.
- [8]. <http://www.global-defence.com/1997/High-speed.html>.
- [9]. H.D. Fair, "Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters a New Era", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 41, No. 1, pp. 158–164, January 2005.
- [10]. M.Liao, Z.Zabar, D.Czarkowski, E.Levi and L.Birenbaum, "On the Design of as a Rapid-Fire Grenade Launcher" IEEE Transaction on Magnetics, Vol.35, No.1, January 1999.
- [11]. http://www.coilgun.eclipse.co.uk/electromagnetic_pistol.html.
- [12]. Y. Shirong, W. Ying, C. Shanbao, P. Guohua, L. Xuquiong, W. Wei, "A Novel Type Rail-Coil Hybrid Electromagnetic Launcher", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 41, No. 1, pp. 266–267, 2005.
- [13]. A.Balikci, "Flywheel Motor/Generator Set as an Energy Source for Coil Launchers", Ph. D. Dissertation, Polytechnic University, June 2003.
- [14]. E. Bıçak, "Elektromagnetik Fırlatıcı", Lisans bitirme tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, Haziran 2005.
- [15]. Zhang, C., Wu, P., Tseng, K.J. 2005. "FEM Analyses for the Design and Modeling of a Novel Flywheel Energy Storage System Assisted by Integrated Magnetic Bearing", Electric Machines and Drives International Conference IEEE, 1157-1164.
- [16]. Nguyen, T.D., Tseng, K.J., Zhang, S., Nguyen, H.T. 2011. "A Novel Axial Flux Permanent Magnet Machine for Flywheel Energy Storage System: Design and Analysis", IEEE Transaction on Industrial Electroninc", vol.(58), No.9, September, 3784-3794.
- [17]. Zhou, L., Qi, Z. 2009. "Modeling and Simulation of Flywheel Energy Storage Ssystem with IPMSM for Voltage Sags in Distributed Power Network", International Conference on Mechatronics and Automation, August, China, 5046-5051.
- [18]. Abdel-Khalik, A., Elserougi, A., Massoud, A., Ahmed, S. 2013. "A Power Control Strategy for Flywheel Doubly-Fed Induction Machine Storage System Using Artificial Neural Network", Electric Power System Research, Vol.(96), March, 267-276.
- [19]. Kato, K., Ishigma, S., Nakajima, Y., Arai, H., Ueda, T., Iwata, T., Ito, Y., Sugao, K. 2014. "10MW, 3.3MWh Energy Storage System consisting of 4000 Flywheels controlled by ICT

- network for Short Cycle Power Fluctuation Compensation”, The 2014 International Power Electronics Conference IEEE, 403-408.
- [20]. Zhang, C., Tseng, K.J., Nguyen, T.D. 2010. “Design and Loss Analysis of a High Speed Flywheel Energy Storage System Based on Axial Flux Flywheel Rotor Electric Machines”, IPEC Conference IEEE, October, Singapore, 886-891.
- [21]. Fu, X. 2010. “A Novel Design for Flywheel Battery of Electric Vehicles”, IEEE International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application”, 107-111.
- [22]. Chu, H.Y., Fan, Y., Zhang, C.S. 2005. “A Novel Design for the Flywheel Energy Storage System”, Electrical Machines and Systems ICEMS Proceedings of the Eighth International Conference on”, Vol.(2), September, 1583-1587.
- [23]. Zhang, C., Tseng, K.J. 2004. “Design and FEM Analysis of a Flywheel Energy Storage System Assisted by Integrated Magnetic Bearings”, IECON Industrial Electronics Society 30th Annual Conference IEEE, Vol.(2), November, Busan, Korea, 1634-1639.
- [24]. Zhang, C., Tseng, K.J. 2007. “A Novel Flywheel Energy Storage System With Partially-Self-Bearing Flywheel Rotor”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.(22), No.2, 477-487.
- [25]. Dong, J., Huang, Y., Shen, P., Jin, L., Ge, B. 2012. “An Axial Flux Flywheel Motor/Generator for Pulsed Power Application”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE), Raleigh, NC, September, 678-683.
- [26]. Junfeng, W. 2012. “Design of a Miniature Axial Flux Flywheel Motor with PCB Winding for Nanosatellites”, Optoelectronics and Microelectronics ICOM International Conference, 544-548.
- [27]. Yi, J., Lee, K.W., Kim, B., Ko, J., Jeong, S., Noh, M.D., Lee, S.S. 2007. “Micro Flywheel Energy Storage System with Axial Flux Machine”, Advanced Intelligent Mechatronics IEEE/ASME International Conference on, September, Zurich, 1-6.
- [28]. Qian, X. 2010. “Application Research of Flywheel Battery in the Wind and Solar Complementary Power Generation”, Computer Application and System Modeling International Conference on, Vol.(13), 546-550.
- [29]. Diaz-Gonzalez, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., Bianchi, F.D. 2013. “Energy Management of Flywheel Based Energy Storage Device for Wind Power Smoothing”, Applied Energy, Vol.(110), 207-219.
- [30]. Santiago, J., Oliveira, J.G., Lundin, J., Larsson, A., Bernhoff, H. 2008. “Losses in Axial Flux Permanent Magnet Coreless Flywheel Energy Storage Systems”, 18th International Conference on Electric Machines ICEM, 1-5.
- [31]. Lee, S.J., Kim, J.H., Song, B.S., Kim, J.H. 2013. “Coil Gun Electromagnetic Launcher (EML) System with Multi-Stage Electromagnetic Coils”, Journal of Magnetism, Vol.(18), No.4, 481-486.
- [32]. Huang, S., Luo, J., Leonardi, F., Lipo, T.A. 1999. “A Comprasion of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol(14), No.2, 185-192.
- [33]. Huner, E., Akuner, C. 2012. “Axial-Flux Synchronous Machines Compared with Different Stator Structures for Use in Working”, Prezeglad Elektrotechniczny.
- [34]. Aydın, M., Qu, R., Lipo, T.A. 2003. “Cogging Torque Minimization Technique for Multiple-Rotor, Axial-Flux, Surface-Mounted-PM Motors : Alternating Magnet Pole-Arcs in Facing Rotors”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol(14), No.2, 185-192.
- [35]. Zabar, Z., Naot, Y., Birenbaum, L., Levi, E., Joshi, P. N. 1989. “Design and power conditioning for the coilgun”, IEEE Transactions on Magnetism, 25(1), 627-631.
- [36]. Hasirci, U., Balikci, A. 2009. “Design, implementation and test of a coilgun-type electromagnetic launcher prototype”, in Proc. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, RAST’13, 815-820, Istanbul, Turkey.
- [37]. Hasirci, U., Balikci, A. 2013. “Design, fabrication and test of a 250 m/s generator-driven coil launcher”, in Proc. 4th International Conference on Recent Advances in Space

- Technologies, RAST'09, 237-240, Istanbul, Turkey.
- [38]. Hasirci, U., Balikci, A., Zabar, Z., Birenbaum, L. 2011. "Concerning the design of a novel electromagnetic launcher for earth-to-orbit micro- and nanosatellite systems", IEEE Transactions on Plasma Science, 39(1), 498-503.
- [39]. Hasirci, U., Balikci, A., Zabar, Z., Birenbaum, L. 2013. "Experimental performance investigation of a novel magnetic levitation system", IEEE Transactions on Plasma Science, 41(5), 1174-1181.
- [40]. Hasirci, U. 2014. "Nonlinear control of axial flux flywheel motor/generator set of coil launchers", in Proc. 17th International Symposium on Electrmagnetic Launch Technology, 1-5, San Diego, CA, USA.