

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

LİNEER İNDÜKSİYON FIRLATICILARIN ÇOKLU
EVİRİCİLER İLE TASARIMI

SERKAN DOĞANGÜNEŞ

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

TEMMUZ 2024

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**LİNEER İNDÜKSİYON FIRLATICILARIN ÇOKLU
EVİRİCİLER İLE TASARIMI**

SERKAN DOĞANGÜNEŞ

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

DANIŞMAN: PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

TEMMUZ 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**DESIGN OF LINEAR INDUCTION LAUNCHERS WITH
MULTI-STAGE INVERTERS**

SERKAN DOĞANGÜNEŞ

**A THESIS OF DOCTORATE
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING**

ADVISOR: PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

JULY 2024

DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 01/07/2024 tarih ve 2024/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Serkan DOĞANGÜNEŞ'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE

: Prof. Dr. Serkan AKSOY

ÜYE

: Prof. Dr. Erkan ZERGEROĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Yunus UZUN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

*biricik kızlarım Nüha ♡ Meryem'e
ve
canım eşime...*

ÖZET

Elektromanyetik fırlatıcılar Lorentz kuvvetini kullanarak elektrik enerjisini kinetik enerjiye çeviren ve bir mermiyi ya da faydalı yükü fırlatan sistemlerdir. Bu fırlatıcılar yapısına göre raylı fırlatıcı ve bobinli fırlatıcı olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Lineer indüksiyon fırlatıcılar (LIL) ise bobinli fırlatıcıların bir alt tipidir ve temelde asenkron makine prensibiyle çalışmaktadır. Ancak LIL'ler bu elektrik makinaların aksine sürekli rejimde değil yüksek güçlerde (>megawatt) geçici rejimde çalışmaktadır. Bu yüzden literatürdeki LIL için uygulanan kontrol yöntemlerinde milisaniye mertebesinde yüksek güçlerde kontrol zorluğu ve düşük verim problemleri bulunmaktadır.

Bu çalışmada literatürde karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için namlu boyunca merminin olmadığı yerleri enerjilendirmeyen ve düşük adım aralıklarla yumuşak geçiş özelliğine sahip V/f kontrol yapabilen yüksek verimli yeni bir güç sistemi geliştirilmiştir.

Sistem modeli modüler fırlatıcı bölümleri, bu bölümleri ayrı ayrı enerjilendirebilen H-köprü eviriciler ve bu eviricileri kontrol eden merkezi kontrol biriminden oluşmaktadır. FPGA tabanlı kontrol birimi, namlu boyunca skaler V/f kontrolü için evirici IGBT anahtarlara bipolar sinüzoidal PWM fiber optik sinyaller gönderir. Bu sayede fırlatıcı bölüm bölüm enerjilendirilmesine rağmen namlu boyunca düzgün bir hareket eden elektromanyetik dalga paketi oluşturur ve merminin bu paketi bir kayma ile takip etmesi sağlanır.

Bu çalışmada fırlatıcıdaki sürücü bobinlere uygulanacak algoritmanın optimizasyonu için 3 boyutlu FEM analizi yöntemi kullanılarak akım, gerilim, frekans ve faz bilgileri elde edilmiş ve namlu boyunca pozitif ve az dalgalanmaya sahip kuvvetlerin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu algoritmayı uygulayabilmek için laboratuvar ölçeğinde fırlatıcı ve 0.25 Mj enerji depolama kapasitesine sahip, 25 MW güç üretebilen bir güç sistemi tasarlanmıştır. Güç sistemindeki H-köprü evirici modüllerinde 3300 V-1200 A IGBT'ler ve 8.8 mF-2000 V DC-Link kapasitörler kullanılmıştır.

Fırlatıcı üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve merminin 32 m/s hıza ulaşılması da dahil olmak üzere elde edilen sonuçların 3B FEM simülasyonlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Önerilen sistemle beslenen fırlatıcının, tek bir evirici ile beslenen versiyona kıyasla yaklaşık %57,14 daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca diğer fırlatıcılardaki kontrol zorlukları giderilerek elektrik makinalarında uygulanan SPWM yöntemiyle yüksek hassasiyetle fırlatıcı kontrolü sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lineer indüksiyon fırlatıcı, V/f kontrol, H-köprü evirici, SPWM kontrol.

ABSTRACT

Electromagnetic launchers are systems that convert electrical energy into kinetic energy using the Lorentz force and launch a projectile or payload. These launchers are divided into two main groups according to their structure: rail launchers and coil launchers. Linear Induction Launchers (LIL) are a subtype of coil launchers and basically operate on the asynchronous machine principle. However, unlike these electric machines, LILs operate in transient mode at high power levels (>megawatts) rather than in steady state. Consequently, the control methods applied to LILs in the literature face challenges related to the difficulty of controlling high power levels within the millisecond range and issues with low efficiency.

In this study, to overcome the challenges encountered in the literature, a new power system capable of V/f control with smooth transitions at fine step intervals and de-energizing the sections of the barrel where the projectile is not present has been developed. The system model consists of modular launcher sections, H-bridge inverters that can energize these sections separately, and a central control unit that controls these inverters. The FPGA based control unit sends bipolar sinusoidal PWM fiber optic signals to the inverter IGBT switches for scalar V/f control along the barrel. In this way, although the launcher is energized section by section, it creates a smoothly moving electromagnetic wave package along the barrel and the projectile follows this package with a slip.

In order to optimize the algorithm to be applied to the driver coils in the launcher, current, voltage, frequency, phase and slip data were obtained by using the 3D FEM analysis method and positive forces with low ripple were achieved along the barrel. In order to apply this algorithm, a laboratory-scale launcher and a power system with 0.25 MJ energy storage capacity and 25 MW power generation capacity were designed. In this study, 3300 V-1200 A IGBTs and 8.8 mF-2000 V DC-Link capacitors were used in the H-bridge inverter modules.

Experimental studies were carried out on the launcher and it was observed that the results obtained, including the projectile reaching a speed of 32 m/s, were consistent with the 3D FEM simulations. It was observed that the launcher fed with the proposed system was approximately 57.14% more efficient than the version fed with a single inverter. In addition, the control difficulties were eliminated and the launcher control was achieved with high precision with the SPWM control method.

Keywords: Linear induction launcher, V/f control, H-bridge inverter, SPWM control.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tez danışmanım Prof. Dr. Abdulkadir Balıkçı'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Fırlatıcı alanındaki liderliği, engin bilgi ve deneyimi ile bana ilham vermiş, bu yolculukta karşılaştığım zorlukları aşmamda bana rehberlik etmiştir. Kendisinin bilimsel disiplini ve araştırma konusundaki vizyonu, doktora çalışmamın her aşamasında beni motive etmiş ve yönlendirmiştir.

Tez izleme komitesinde ve jürimde yer alan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Serkan Aksoy, Prof. Dr. Erkan Zergeroğlu, Prof. Dr. Mehmet Hakan Hocaoglu ve Prof. Dr. Yunus UZUN'a içtenlikle teşekkür ederim. Her birinizin yapıcı eleştirileri ve önerileri, çalışmamın gelişiminde kritik rol oynamıştır.

Çalışmam boyunca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen Murat Ceylan'a da çok teşekkür ederim.

Tübitak MAM ve Tübitak RUTE elektriksel tahrik sistemleri grubu çalışma arkadaşlarıma, özellikle Osman Şentürk, Mustafa Deniz, Osman Tanrıverdi, Uğur Şahbaz, Ali İbrahim Yılmaz, Saniye Dindar, Fatih Yüksel'e ve Altınay Savunma Teknolojilerinden Faruk Ekinci'ye de desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Eşime, kızlarıma, anneme, babama ve abime bana gösterdikleri sevgi, sabır ve anlayışları için minnettarım. Akademik yolculuğum boyunca sunduğunuz destek, moral ve teşvik, bu başarının temel taşlarını oluşturdu.

Bu tez, sizlerin katkıları ve destekleri sayesinde hayat buldu. Hepinize ayrı ayrı teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	2
1.1.1. Raylı Fırlatıcılar	10
1.1.2. Bobinli Fırlatıcılar	11
1.1.2.1. Direkt Bağlantılı Fırlatıcılar	15
1.1.2.2. İndüksiyon Fırlatıcılar	15
1.1.2.2.1. Darbeli İndüksiyon Fırlatıcılar	16
1.1.2.2.2. Yürüyen Dalga İndüksiyon Fırlatıcı	16
1.1.2.2.3. Lineer İndüksiyon Fırlatıcılar	17
1.1.3. Relüktans Fırlatıcılar	20
1.2. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	20
2. SİSTEM MODELİ VE YÖNTEM	23
3. FIRLATICI GÜÇ KATI VE KONTROL	36
3.1. H-Köprü Gerilim Kaynaklı Evirici	37
3.2. Skaler V/f Kontrol	40
3.3. FPGA Kontrol Ünitesi	44
4. 3B SONLU ELEMAN ANALİZİ	47
4.1. Tüm Bölümler Aynı Anda Enerjili İken Sabit Frekans Koşullarında Simülasyonlar	49
4.2. Tüm Bölümler Sırayla Enerjili İken Sabit Frekans Koşullarında Simülasyonlar	51
4.3. Tüm Bölümler Aynı Anda Enerjili İken Düzgün Artan Frekans Koşullarında Simülasyonlar	53
4.4. Tüm Bölümler Sırayla Enerjili İken Ayrık Artan Frekans Koşullarında Simülasyonlar	56
4.5. Tüm Bölümler Sırayla Enerjili İken Düzgün Artan Frekans Koşullarında Akım Değişimi	58
4.6. Tüm Bölümler Sırayla Enerjili İken Düzgün Artan Frekans Koşullarında Frekans Değişimi	62
4.7. Tüm Bölümlerin İkili Enerjilendirilmesiyle Düzgün Artan Frekans Koşullarında Simülasyonlar	63
5. FIRLATICI DENEYSEL ÇALIŞMALARI	66
5.1. Fırlatıcı ve Güç Sistemi	66

5.2. Deney Sonuçları	73
6. SONUÇLAR	79
6.1. Gelecek Çalışmalar	80
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	87
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	88



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

∇	: Nabla operatörü
γ	: Yayılım sabiti
$\mathbf{E}$	: Elektrik alan vektörü
ε	: Dielektrik sabiti
Hz	: Hertz
F	: Kuvvet
km	: Kilometre
sn	: Saniye
$\mathbf{H}$	: Manyetik alan vektörü
3B	: 3 Boyutlu
AA	: Alternatif Akım
AKE	: Akım Kaynaklı Evirici
DA	: Doğru Akım
DARPA	: Defense Advanced Research Projects Agency
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
FEM	: Finite Element Method
FPGA	: Field Programmable Gate Array
GKE	: Gerilim Kaynaklı Evirici
IGBT	: Insulated-Gate Bipolar Transistor
LIL	: Lineer Induction Launcher
PWM	: Pulsed Width Modulation
SiC	: Silicon Carbide
SPWM	: Sinusoidal Pulsed Width Modulation
TTL	: Transistor Transistor Logic
USB	: Universal Serial Bus
VHDL	: VHSIC Hardware Description Language
VVVF	: Variable Voltage Variable Frequency

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1: Birkeland tarafından geliştirilen elektromanyetik silah.	2
Şekil 1.2: Fauchon-Villeplee tarafından tasarlanan uzun menzilli raylı silah.	3
Şekil 1.3: MacLaren tarafından patenti alınan elektromanyetik bobinli fırlatıcı (silah).	4
Şekil 1.4: Hansler'in raylı elektromanyetik fırlatıcısı.	5
Şekil 1.5: Winterberg manyetik alan hızlandırıcısı.	6
Şekil 1.6: Green Farm elektromanyetik silah geliştirme tesisi.	8
Şekil 1.7: Fırlatıcı optik tetikleme devresi.	9
Şekil 1.8: ISL'de bulunan Pegasus fırlatıcı düzeneği.	9
Şekil 1.9: Elektromanyetik fırlatıcıların sınıflandırılması.	10
Şekil 1.10: Raylı elektromanyetik fırlatıcı gösterimi.	11
Şekil 1.11: Raylı fırlatıcı çalışma prensibi.	11
Şekil 1.12: Bobinli fırlatıcı gösterimi.	12
Şekil 1.13: Mermi ve sürücü bobin arasındaki M ve dM/dx ilişkisi.	13
Şekil 1.14: David G. Elliott direkt bağlantılı fırlatıcı gösterimi.	15
Şekil 1.15: Tek kademeli ve çok kademeli indüksiyon fırlatıcı.	16
Şekil 1.16: 5 kademeli darbeli indüksiyon fırlatıcı.	16
Şekil 1.17: Üç fazlı yürüyen dalga indüksiyon fırlatıcı.	17
Şekil 1.18: Kondansatör anahtarlanması ile sürülen lineer indüksiyon fırlatıcı.	17
Şekil 1.19: Lineer indüksiyon fırlatıcı.	18
Şekil 1.20: Bağımsız alt bölümlerden oluşan lineer indüksiyon fırlatıcı.	19
Şekil 1.21: İki seviyeli evirici ile tüm fırlatıcının enerjilendirilmesi.	19
Şekil 1.22: Çok seviyeli evirici ile tüm fırlatıcının enerjilendirilmesi.	19
Şekil 1.23: Relüktans bobinli fırlatıcı yapısı.	20
Şekil 1.24: Fırlatıcı bölümlerinin ayrı ayrı enerjilendirilerek sürekli yürüyen dalga oluşturulması.	21
Şekil 2.1: Sistem model diyagramı.	24
Şekil 2.2: Sürücü bobinleri ve faz sıralamaları.	26
Şekil 2.3: Basit fırlatıcı modelinin eşdeğer devresi.	26
Şekil 2.4: Kaynak tarafından görülen eşdeğer devre modeli.	27
Şekil 2.5: Fırlatıcı bobini-mermi düzlemsel modeli.	28
Şekil 2.6: Fırlatıcıda kuvvet-kayma arasındaki ilişki.	32
Şekil 2.7: Kuvvet-kayma grafiğinde senkron hızın etkisi.	33
Şekil 2.8: Kuvvet-kayma grafiğinde kutup aralığının etkisi.	34
Şekil 2.9: Kuvvet-kayma grafiğinde hava aralığının etkisi.	34
Şekil 2.10: Kuvvet-kayma grafiğinde iletkenliğin etkisi.	35
Şekil 3.1: Güç anahtarları sınıflandırılması.	36
Şekil 3.2: H-köprü evirici topolojisi.	37
Şekil 3.3: H-köprü evirici çalışma durumları.	37
Şekil 3.4: SPWM ile karşılaştırma sonucunda elde edilen çıkış gerilimi.	38
Şekil 3.5: Tek bir güç katı için oluşturulan simülasyon modeli.	39
Şekil 3.6: Tek evirici akım ve gerilim simülasyon sonuçları.	40
Şekil 3.7: Fırlatıcı V/f profili.	40

Şekil 3.8: V/f kontrol ile açık çevrim çıkış gerilim, akım ve frekans kontrolü.	41
Şekil 3.9: Evirici akım ve gerilim sinyalleri için hızlı Fourier dönüşümü.	42
Şekil 3.10: 9 bölümden oluşan sistem blok diyagramı.	42
Şekil 3.11: Her bölüme ve ilgili faza ait akım simülasyon sonuçları.	43
Şekil 3.12: FPGA-SPWM üretim modülü ve test ortamı sonuçları.	44
Şekil 3.13: FPGA üst modül birimi.	45
Şekil 3.14: FPGA üzerinde uygulanan V/f kontrol paterni simülasyon sonucu.	46
Şekil 4.1: 3 boyutlu fırlatıcı ağ yapısı modeli.	48
Şekil 4.2: Simülasyon ortamında kullanılan harici güç kaynakları.	49
Şekil 4.3: Fırlatıcı bobinlerine uygulanan 250 Hz ve 750 Hz frekanslarda akımlar.	50
Şekil 4.4: Aynı anda enerjilendirme sabit frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri b) Hız ve kayma grafikleri.	50
Şekil 4.5: Sırayla enerjilendirme durumunda 250 Hz ve 1000 Hz akım grafikleri.	52
Şekil 4.6: Sırayla enerjilendirme sabit frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri b) Hız ve kayma grafikleri.	53
Şekil 4.7: Aynı anda enerjili ilen sabit V/f uygulanan fırlatıcı akım ve gerilim grafikleri.	54
Şekil 4.8: Aynı anda enerjilendirme artan frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri b) Hız ve kayma grafikleri.	55
Şekil 4.9: 3 bölüm için uygulanan harici akım ve gerilim dalga formları.	57
Şekil 4.10: Yürüyen manyetik dalga ve onu takip eden merminin simülasyon sonuçları.	57
Şekil 4.11: Kuvvet ve hızlanma simülasyon sonuçları.	58
Şekil 4.12: 3 Bölüm için uygulanan artan frekansta faz akımları.	59
Şekil 4.13: 3 Bölüm için uygulanan artan frekansta faz gerilimleri.	60
Şekil 4.14: 3 farklı akım değeri için elde edilen kuvvet grafikleri.	60
Şekil 4.15: 3 farklı akım değeri için elde edilen hız-kayma grafikleri.	61
Şekil 4.16: Bölüm bölüm enerjilendirme artan frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri b) Hız ve kayma grafikleri.	63
Şekil 4.17: Aynı anda iki bölümün enerjilendirildiği faz A gerilimleri.	64
Şekil 4.18: İki bölüm enerjilendirme ile artan frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri b) Hız ve kayma grafikleri.	65
Şekil 5.1: Modüler H-köprü evirici yapısı.	67
Şekil 5.2: Çift darbe deneyi devre yapısı.	67
Şekil 5.3: Çift darbe deneyi test düzeneği.	68
Şekil 5.4: Çift darbe deneyi test sonuçları (CH1: yük akımı, CH4: yük gerilimi)	68
Şekil 5.5: FPGA algoritması programlama akışı.	69
Şekil 5.6: FPGA kontrol ünitesi ve fiber optik kartlar.	70
Şekil 5.7: Fırlatıcı kontrol arayüzü.	70
Şekil 5.8: Fırlatıcı bölüm bölüm enerjilendirme algoritması.	71
Şekil 5.9: Fırlatıcı sürücü bobini.	72
Şekil 5.10: Fırlatıcı namlusunun sürücü bobinlerle oluşturulması.	72
Şekil 5.11: Fırlatıcı ve güç sisteminden oluşan tam deney düzeneği.	73
Şekil 5.12: Bir bölüm içerisindeki A, B ve C fazları akım ölçümleri.	74
Şekil 5.13: A fazı için fırlatıcıdaki tüm bölümlerdeki akım grafikleri.	74

Şekil 5.14: Bölümler arasındaki geçişlerde faz-A akımları.	75
Şekil 5.15: Ayrık artan frekansta deney sonuçları (CH1: Bölüm-1, CH2: Bölüm -2, CH3: Bölüm -3, CH4: Hız Ölçüm Sinyali).	76
Şekil 5.16: Düzgün artan frekansta deney sonuçları (CH1: Bölüm 1, CH2: Bölüm 2, CH3: Bölüm 3).	77
Şekil 5.17: Bölümler arasındaki geçişlerde faz A akımları.	78



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1: Hedeflenen lineer indüksiyon fırlatıcının fiziksel özellikleri.	47
Tablo 4.2: Tüm bölümler enerjili iken sabit frekans senaryoları.	49
Tablo 4.3: Tüm bölümler sırayla enerjili iken sabit frekans senaryoları.	52
Tablo 4.4: Tüm bölümler enerjili iken artan frekans senaryoları.	54
Tablo 4.5: Tüm bölümler sırayla enerjili iken ayırık artan frekans senaryoları.	56
Tablo 4.6: Tüm bölümler sırayla enerjili iken düzgün artan frekans senaryoları.	59
Tablo 4.7: Tüm bölümler sırayla enerjili iken düzgün artan frekans senaryoları.	62
Tablo 4.8: İki bölüm aynı anda sırayla enerjili iken düzgün artan frekans senaryoları.	64
Tablo 6.1: Önerilen sistem ile diğer fırlatıcı güç sistemlerinin karşılaştırma sonucu.	80

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinde bir objeyi daha yüksek hızlara çıkarmak hep büyük bir hedef olarak tutulmuş, her asırda yeni gelen nesiller daha büyük hayaller kurarak bu doğrultuda çaba sarfetmiştir. Bu çabalardan birisi de fırlatıcılar olmuştur. Fırlatıcılar, kısa bir uçuş süresine sahip ve yüksek bir enerji ile bir objenin hızlandırılması için kullanılan sistemlerdir. Fırlatıcılar mekanik, kimyasal ve elektrikli itki sistemlerine sahip olabilir.

Mekanik fırlatıcılar eski zamanlarda ok, taş vb. objelerin fırlatılması için kullanılmakla birlikte daha çok insan gücüne dayanırdı.

Geleneksel kimyasal fırlatıcılar ise kimyasal bazı malzemelerin (H_2, He) tepkimesinden elde edilen itme kuvvetine sahiptir ve teorik olarak maksimum 2 km/s'lik bir fırlatma hızına sahiptir [1]. Roketlerde ise böyle bir limit yoktur ve çok yüksek hızlara çıkmak mümkündür ancak bu tip fırlatıcılar uzaya uydu vb. göndermek amacıyla kullanılabilir. Roketler düşük ivmelenmeye sahip olduğu için yüksek atış mesafesine ihtiyaç duyar ve daha çok uzay endüstrisinde yaygındır.

Elektromanyetik fırlatıcılar ise elektrik enerjisi ile elektromanyetik kuvvetler meydana getirerek bir objede kinetik enerjiye ($mv^2/2$) çeviren yapılardır ve denklem 1.1'de gösterilen Lorentz kuvveti olarak bilinen $\vec{B}$ manyetik alanı içerisinde $\vec{v}$ hızı ile hareket eden q yüküne kuvvet ($\vec{F}$) uygulanması prensibine dayanır [3].

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.1)$$

Elektromanyetik fırlatıcıların aşağıdaki avantajlara sahip olduğu söylenebilir [2].

- Yüksek hız (> 10 km/sn)
- Yüksek ivmelenme
- Basitleştirilmiş enerji kaynağı
- Çevrecilik (düşük duman, ateş vb.)
- Menzil kontrol kolaylığı
- Değişik şekillerde obje (mermi) fırlatabilme
- Düşük kütle ve hacme sahip obje (mermi) fırlatabilme
- Yüksek obje (mermi) yükleme frekansı ve ardışık fırlatma yeteneği

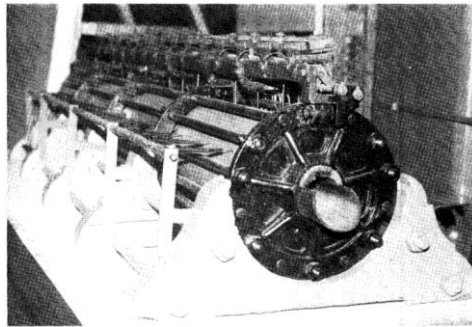
- Yüksek verim.

Bu motivasyonlar ışığında elektromanyetik fırlatıcılar için detaylı literatür taraması gerçekleştirilmiş, bu tip fırlatıcıların tarihsel gelişimi açıklanmış ve fırlatıcıların itme kuvvetini oluşturma yöntemlerine göre sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Literatür çalışmasında indüksiyon motorlarla benzer çalışma prensibine sahip lineer indüksiyon fırlatıcılara daha çok yer verilmiştir [4]. Böylelikle fırlatıcıların enerjilendirilme yöntemleri ve bu tezde önerilen güç sisteminin getirdiği yenilikler ve çözdüğü problemler daha iyi anlaşılabilir.

1.1. Literatür Özeti

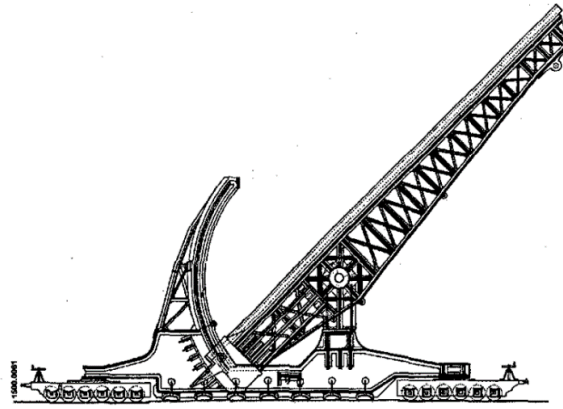
Elektromanyetik fırlatıcıların temelini oluşturan tarihteki ilk bilimsel çalışma, 1844 yılında Benningfield tarafından üretilen SIVA isimli elektromanyetik silah olmuştur. Ancak bu bilimsel çalışmanın tam olarak nasıl sonuçlandığı ise bilinmemektedir. 1845 yılında ise elektromanyetik silahlar konusunda daha bilimsel bir çalışma Dr. Charles G. Page tarafından Washington D.C.'de yapılmış, sarmal bobin kullanılarak bazı demir ve çelik parçaların 15 metreye kadar fırlatılması deneyi gerçekleştirilmiştir [2].

1901 yılında elektromanyetik dalgalar ve enerji transferi konularında çalışan Norveçli fizikçi Kristian Birkeland magnetize edilmiş demir bilyeleri selenoidler yardımıyla fırlatarak bu alanda 3 adet patent almıştır. Birkeland patent başvurusunda 500 kg nitrogliserin içeren 2 tonluk demir bir mermiyi hareket ettirecek 27 metre uzunluğunda elektromanyetik fırlatıcı tasarımı yapmıştır. Gerçek deneylerde ise 500 gr ağırlığındaki bir mermiyi 80 m/sn hızında fırlatmayı başarmış, daha sonra 100 m/sn hızla 1 km uzaklığa fırlatmayı başarmıştır. Birkeland'ın bu çalışmaları bobinli fırlatıcıların tarihteki ilk örneği olmuştur [5].



Şekil 1.1: Birkeland tarafından geliştirilen elektromanyetik silah [5].

1916'da Fransız bilim adamı Fauchon-Villeple, Birkeland ve öncekilerin çalışmalarından farklı olarak raylı bir düzenek üzerinde elektromanyetik kuvvet uygulayarak mermiyi hareket ettirmeyi başarmış ve ilk çalışmasında ahşap bir bloğu vurarak raylı silahların gelişimini başlatmıştır [6]. Bu konuda bir kitap yazarak da raylı silahların çalışma prensiplerini ve bobinli silahlardan farklarını kitabında açıkça belirtmiştir. Fauchon-Villeple raylı fırlatıcıların geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar başlatmış ancak bütçe kısıtlarından dolayı tamamlayamamıştır.



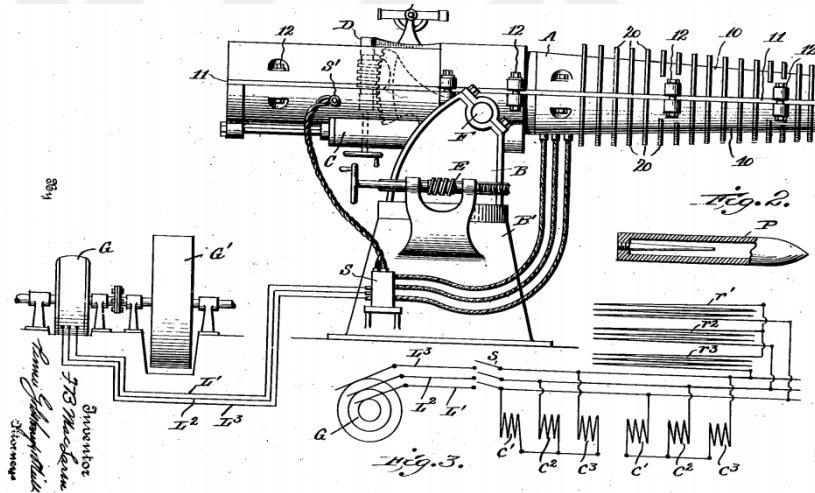
Şekil 1.2: Fauchon-Villeplee tarafından tasarlanan uzun menzilli raylı silah [6].

1923 yılında ise Rus bilim adamı Prof. A. L. Korol'kov, Fauchon-Villeple'in yaptığı çalışmaları fizik ve mühendislik hesapları ile açıklamış ve raylı fırlatıcılarla ilgili yorumlarını da içeren bir rapor yayınlamıştır. Korol'kov raporunda, 1600 m/sn hızla 100 kg ağırlığındaki bir merminin fırlatılabilmesi için gerekli güç hesaplarını gerçekleştirmiş ve raylı fırlatıcılarda merminin daha yüksek kararlılıkla fırlatılabilmesi için çeşitli öneriler sunmuştur [7]. Elektrikli silahların patlayıcı silahlara göre daha ucuz, atış frekansı yüksek, kontrolü kolay ve daha verimli olduğu konusunda bilgiler vermiştir. Öte yandan raporda elektromanyetik silahların yıpranma ve ısınma konularında avantajlı olduğunu belirtmiş olsa da günümüzde bu tip fırlatıcıların yüksek akımlardan dolayı oluşan kısa kullanım ömrü olduğu bilinen bir gerçektir. Ayrıca Korol'kov, fırlatıcının başlangıç hızı ile fırlatıcının boyutu arasındaki ilişkiyi açıklamıştır. Buna göre,

- Uygulanan gerilimle başlangıç hızı doğru orantılıdır.

- Fırlatıcı sargılarındaki sıcaklık merminin hızı ile ters orantılı; fırlatıcının uzunluğu ve akımın karesi ile doğru orantılıdır.
- Fırlatıcının geri tepmesi mermi hızının karesi ile doğru orantılı ve fırlatıcının uzunluğu ile ters orantılıdır.

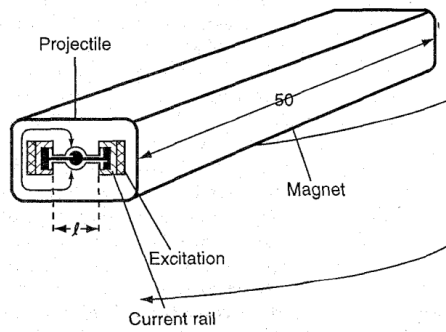
1921 yılında ABD’de MacLaren, elektromanyetik fırlatıcılar konusunda yaptığı çalışmalar ve patent başvuruları ile büyük katkı sağlamıştır. Bu çalışmasında MacLaren, **Şekil 1.3**’te görüldüğü gibi yüksek frekanslı 3-faz jeneratör tarafından oluşturulan yürüyen bir elektromanyetik dalga ile bobinli fırlatıcı (silah) tasarımı yapmıştır. Oluşturulan yürüyen dalga ile merminin üzerinde akım indüklemesi gerçekleştirilmiş ve oluşan elektromanyetik alanlarla merminin hızlanması sağlanmıştır. Bu çalışmasında MacLaren, merminin hızlanması için yürüyen dalganın frekansının değiştirilebilir olması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu fırlatıcı Norveçli bilim adamı Birkeland’ın bobinli fırlatıcı çalışmasının bir devamı niteliğindedir [8].



Şekil 1.3: MacLaren tarafından patenti alınan elektromanyetik bobinli fırlatıcı (silah) [8].

Almanlar 1945’te raylı elektromanyetik fırlatıcılar konusunda oldukça yoğun çalışmalar ve detaylı analizler yapmıştır. Dr. Joachim Hansler’e ait raporlarda Fauchon-Villeplee’in çalışmalarına değinilmiş ve gerilim, öz-endüktans gibi hesapların tutarlı olmadığı gösterilmiştir. 1943 yılında Dr. Joachim Hansler uçaksavar uygulamasına yönelik ilk raylı elektromanyetik silah çalışması ile 1000 adet 12 V kurşun asit akü ve 48 kJ kapasitör bankası kullanarak 10 gram ağırlığa sahip mermileri 800 m/sn hızda fırlatmayı başarmıştır. İkinci çalışmasında ise armatür akımını bakır

alaşım temas noktaları kullanarak 9.8 A'dan 21.1 A'ya çıkarmayı başarmış ve 960 m/sn'lik hızlara ulaşmıştır. Fırlatma esnasında oluşan akım değerleri 10-20 kA mertebelerinde olduğu için elektriksel temas noktalarının dayanımının bu tür silahlarda önemli olduğunu ortaya koymuş ve yaylı mekanizmalarla temas noktalarındaki direnci azaltarak 10.3 gramlık mermileri 1080 m/sn hız ile fırlatmayı başarmıştır. Ayrıca Dr. Hansler elektriksel temas noktaların önemine ek olarak yüksek hızlara ulaşmak amacıyla bu akımları verebilmek için güç kaynağı kısıtlarına da çalışmalarına değinmiştir [2].



şekil 1.4: Hansler'in raylı elektromanyetik fırlatıcısı [2].

Hansler ve arkadaşı Dr. Otto Muck, fırlatıcı üzerindeki çalışmalara ek olarak güç kaynakları konusunda da çalışmalar yürütmüştür. Elektrostatik-kapasitörler, elektromanyetik-darbe trafoları, elektrokimyasal-bataryalar ve elektromekanik-darbe jeneratörleri olmak üzere 4 yaklaşım üzerinde de durmuşlardır. Yapılan deneylerde bataryaların kullanımı ön planda olmasında karşın Hansler, homopolar darbeli jeneratörlerin güç kaynağı olarak fırlatıcıda kullanımının en uygun olduğunu belirtmiştir.

Alman Hava Kuvvetleri tarafından 6.5 kg ağırlığındaki bir merminin 2000 m/sn hızla dakikada 12 kere fırlatılması hedefi verilmiş, Hansler buna yönelik yaptığı çalışmalarda istenilen verileri elde edememiştir.

Dr. Muck elektromanyetik fırlatıcılar konusunda çeşitli çalışmalar yapmaya devam etmiş; fırlatıcıları ateşli silah mermileriyle birlikte kullanmayı önermiş ve güç kaynağı olarak titanyum dioksit kimyasal içeriğe sahip bataryaların fırlatıcı güç kaynağı olarak uygun olabileceğini belirtmiştir [2].

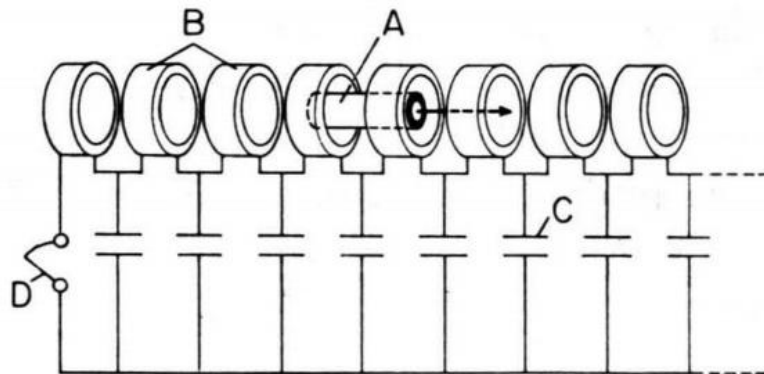
1942-1944 yılları arasında elektrikli silahlar konusunda Japonya ordusuna bağlı teknik araştırma laboratuvarında Almanların yaptıklarına benzer çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 10 kg bir mermiyi 2000 m/sn hızla fırlatmayı hedeflemişler ancak 2 kg mermiyle 335 m/sn hıza ulaşabilmişlerdir. Kannon Saki bu çalışmada 108 bobinden oluşan ve 9.7 m uzunluğunda bir fırlatıcı düzeneği kurmuştur. Fırlatıcı güç kaynağı ihtiyacı 1500 Hz, 2000 kVA gücünde bir jeneratörden karşılanmış ve fırlatıcıdaki güç faktörünü artırmak için kapasitör bankası kullanılmıştır [2].

1957 yılında ABD’de Hypervelocity Impact Symposium adında bir sempozyum gerçekleştirilmiş ve sempozyum sonunda elektromanyetik silahlar üzerinde geliştirilen yöntemlerin yakın gelecekte başarılı olamayacağı sonucuna varılmıştır [9].

Bu sempozyumun etkisiyle elektromanyetik fırlatıcılar üzerine uzunca bir süre çalışma yapılmamış ve bu konuda karanlık bir dönem yaşanmıştır.

1970’li yılların başında Marshall ve arkadaşları Avustralya Ulusal Üniversitesi’nde raylı fırlatıcılar üzerinde çalışmalara başlamıştır. Metal ve plazma armatürler ile çeşitli deneysel çalışmalar yapılmış ve 1978’de gram ağırlığındaki mermileri 5.9 km/sn hızında fırlatmayı başarmışlardır [10].

1971’de Winterberg ve arkadaşları tarafından süperiletken bazı malzemelerin bobinli fırlatıcılar ile fırlatılması üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalarda hareket eden manyetik dalga oluşturabilmek için gerekli bobinlerin iletim hattı modeli ile toplu parametrelili modeli oluşturulmuş ve oluşan ivmelenme hareketinin faz kararlılığı üzerine analizleri gerçekleştirilmiştir [11].



Şekil 1.5: Winterberg manyetik alan hızlandırıcısı [11].

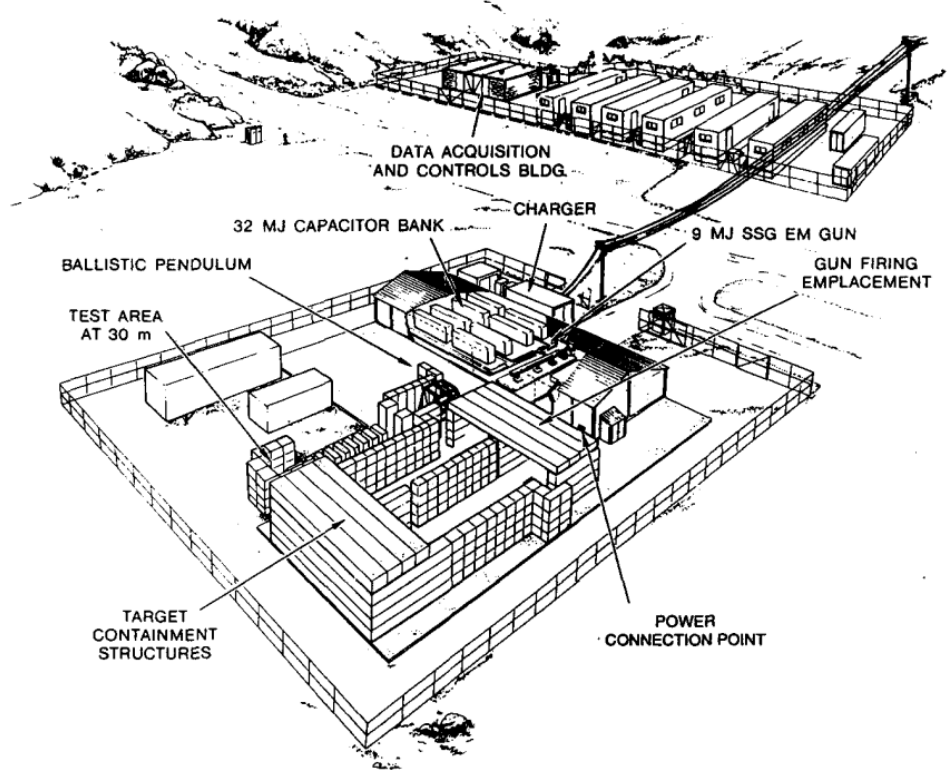
1977 yılında MIT’de Henry Kolm ve arkadaşları raylı fırlatıcılar ve bobinli fırlatıcılar üzerine çalışmalar gerçekleştirmiş ve bobinli fırlatıcılarla darbeli güç kaynakları kullanılarak 105 mm boyutundaki mermiyi 1100 m/sn’lik bir hızla fırlatmayı başarmışlardır. Ayrıca Kolm, bu fırlatıcıların uzay fırlatma platformlarında kullanılabileceği konusunda analizler yapmıştır. Kolm bu analizlerde kimyasal itki sistemlerin çok üzerinde bir faydalı yük-fırlatılan sistem oranı elde edilebileceğini göstermiştir [12].

1980’de ABD’de U.S. Department of Defense (DoD) tarafından desteklenen ilk Elektromanyetik Silahlar ve Fırlatıcılar sempozyumu düzenlenmiş ve 60 bilim adamı ve mühendisin katıldığı sempozyumda elektromanyetik itme teknolojisindeki gelişmeler ele alınmıştır. Bu sempozyumda elektromanyetik itme kuvvetine dayanan sistemlerin elektromanyetik silahlar, manyetik levitasyon ile taşıma sistemleri, sivil ve askeri uçak fırlatma platformları ve uzaya faydalı yük gönderme gibi uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmiştir. DoD tarafından fonlanmak üzere gelecekte elektromanyetik silahlar üzerine yapılması hedeflenen çalışmalar belirlenmiştir [13].

1980’li yılların başında geleceğin askeri silahlarını üretmek amacıyla kurulan ABD Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) desteğiyle ciddi çalışmalar yapılmıştır [14]. DARPA ve ABD ordusu arasında 4 ana konu başlığı altında uzun vadeli 4 adet program anlaşması yapılmıştır:

- Mobil ve hiper hızlı (hypervelocity) savaş silahları,
- 8 MJ enerjiye sahip raylı silah geliştirilmesi,
- 8 MJ enerjili raylı silahın darbeli güç kaynaklarıyla entegrasyonu,
- Bu silahların tank savar ve hava savunma sistemlerinde kullanılması.

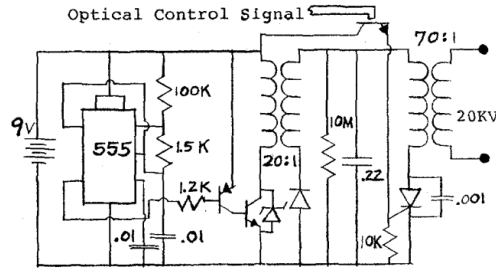
1985 yılında bu amaçların hedeflerine ulaşabilmesi için 9 MJ mermi-kinetik enerjili, 9 m uzunluğunda ve 32 MJ kapasiteli darbeli güç kaynağına sahip raylı fırlatıcı tasarımı için Green Farm isimli bir tesisin yapımına başlanmıştır. 32 MJ kapasitör bankası modüler 11 kV gerilim değerinde 50 kJ kapasitörlerden oluşturulmuştur. Her bir kapasitör çıkışına koruma sigortası eklenmiştir. Elektromanyetik silahta verimi artırabilmek adına her bir kapasiteli güç modülü belirli bir zaman gecikmesi ile tetiklenmiştir. Yapılan çalışmalarda 600 g ağırlığa sahip bir merminin 4.3 km/sn’lik dünya rekoruna sahip bir hızla fırlatılması sağlanmıştır [15].



Şekil 1.6: Green Farm elektromanyetik silah geliştirme tesisi [15].

1982 yılında Mongeu ve Williams ark komütasyonlu fırlatıcılar ile bobinli fırlatıcılara örnek bir çalışma yayınlamıştır. Bu çalışmada mermide akım meydana getirmek için direkt temas ve indüksiyonlu olmak üzere iki yöntem önerilmiştir. Her iki yöntem için de mermiye uygulanan kuvvete ait hesaplamalar, düzenekteki bobinlerin sarım sayısı ve endüktans değeri, karşılıklı endüktans, mermi üzerinde oluşan akım ve endüktans gradyan değerleri ile açıklanmıştır [16].

1984 yılında McKinney ve Mongeau tek parçalı ve çok parçalı birbirine manyetik olarak akupile olan bobinler kullanılarak 2 gramlık yüzük şeklinde bir merminin 5 km/sn'lik bir hızla fırlatılması sağlanmış ve tüm zamanların en yüksek hızına çıkılmıştır. Bu çalışmada fırlatıcının bobin-mermi arasında temas noktası olmaması, yüksek verim, yüksek itme kuvveti gibi avantajları açıklanmış, bunun yanında kontrol zorluğu, indüklenen yüksek gerilimler, yüksek akımlı anahtarlama elemanları gibi bazı kısıtlamalardan bahsedilmiştir. Ayrıca [16] referanslı çalışmaya benzer şekilde temel kuvvet hesapları gerçekleştirilmiş ve 4 parçalı bir fırlatıcı deney düzeneği hazırlanarak aşağıdaki optik tetikleme devresi ile merminin konumuna göre bobinlerin tetiklenmesi sağlanmıştır [17].

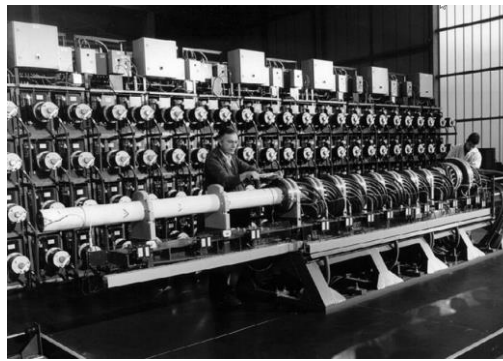


Şekil 1.7: Fırlatıcı optik tetikleme devresi [17].

1987 Eylül ayında ABD ordusunun öncülüğünde raylı olmayan elektromanyetik fırlatıcılar konusunda ortak bir çalışma düzenlenmiş, fırlatıcıların raylı fırlatıcılar ve bobinli fırlatıcılar olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılması konusunda karar alınmıştır [18].

ABD ve Birleşik Krallık elektromanyetik fırlatıcılar konusunda birlikte çalışmalar yapmak için 1990 yılında İskoçya’da laboratuvar kurmuş ve 11 kV, 32.2 MJ darbeli güç kaynağı tasarlanarak 7 m uzunluğunda 2 km menzile sahip raylı elektromanyetik silahlar konusunda çalışmalar yapılmıştır [19].

1989’da Fransa ve Almanya elektromanyetik fırlatıcı çalışmaları için ortak bir çalışma başlatmış ve 1993’ten beri Hollanda’nın da katılımıyla darbeli güç kaynakları, katı hal elemanları ile anahtarlama, 30 MJ enerjiye sahip raylı fırlatıcılar konusunda çalışan bir enstitüsü (Institute of Saint-Louis) oluşturulmuştur [20], [52].

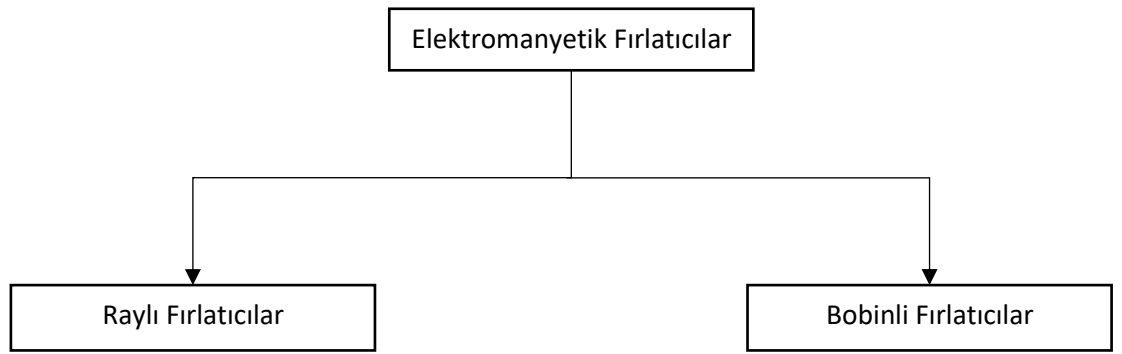


Şekil 1.8: ISL’de bulunan Pegasus fırlatıcı düzeneği [20].

1980’li yıllardan itibaren Çin’de elektromanyetik fırlatıcılar konusunda çalışmalara başlanmış ve “Principles of Electric Guns” adında bir kitap yayınlanmıştır. 7 adet çalışma grubu oluşturularak 1988’de 50 gram ağırlığındaki bir mermi 3 km/sn hıza ulaştırılmıştır [21].

1989 yılında Texas Üniversitesi'nde W.F. Weldon, bu zamana kadar yapılan çalışmalar göz önünde bulundurarak elektromanyetik fırlatıcıların armatür enerjilendirme, stator alan kontrol ve operasyon modları olmak üzere 3 ana özelliğe göre sınıflandırılması konusunda bir çalışma yayınlamıştır [18].

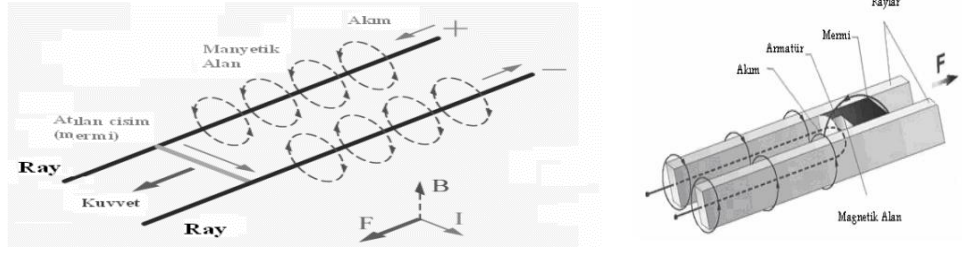
Bu doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen literatür çalışmasında bu iki sınıflandırma yöntemi kullanılarak devam edilmiştir. Raylı fırlatıcılara ait literatür araştırmaları daha genel gerçekleştirilirken; tezin konusu olan bobinli fırlatıcı konusunda daha derin araştırma ve inceleme faaliyetleri yürütülmüştür.



Şekil 1.9: Elektromanyetik fırlatıcıların sınıflandırılması.

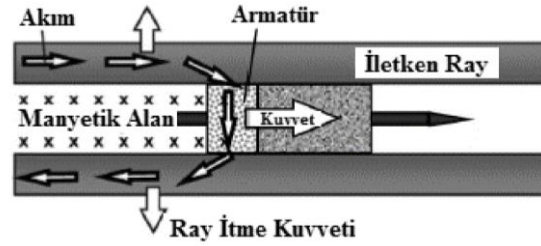
1.1.1. Raylı Fırlatıcılar

Raylı elektromanyetik fırlatıcılar metal iki ray kullanılarak bu raylar arasındaki cismin, üzerinde (daha çok ufak kütlelerin) oluşturulan elektriksel itme kuvveti ile fırlatılması ilkesine dayanır. Ray malzemesi olarak çoğunlukla bakır kullanılmakla beraber, yüksek etkinliğe sahip raylı silahlar için daha yüksek iletkenliğe sahip, daha yüksek mekanik dayanımlı ve çok yüksek akımları (MA) taşıyabilecek daha özel çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Raylı fırlatıcılar konusunda ray direnci ile ilgili olarak raylarda oluşan ısınma nedeni ile ray ömrü, ray oyuk geometrilerinin verimliliğe etkisi v.b. birçok konuda çalışmalar devam etmektedir [22]. **Şekil 10**'da örnek bir raylı fırlatıcı prototipi gösterilmiştir.



Şekil 1.10: Raylı elektromanyetik fırlatıcı gösterimi [22].

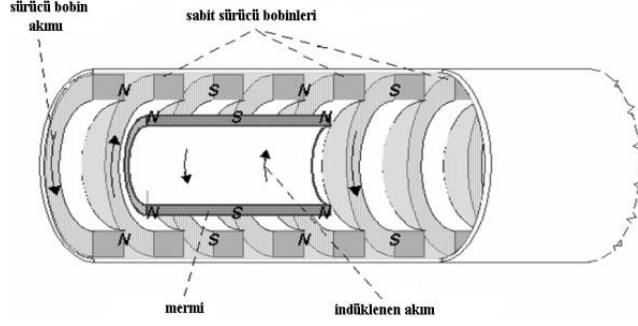
Şekil 1.11’de gösterildiği gibi raylardan bir akım akması için, raylara bir DC kaynak veya kondansatör bağlanır. Armatür rayların arasında köprü oluşturarak akımın akması için gerekli çevrimi sağlar. Oluşan çevrimden akım aktığında rayların etrafında bir manyetik alan oluşur. Manyetik alan içerisinde akım akan iletken bir kuvvet etki eder prensibinden armatüre etki eden bir kuvvet oluşur. Oluşan bu kuvvet armatürü hızlandırır ve armatürün önünde bulunan mermide hızlandırılarak fırlatılır. Armatür olarak katı bir metal kullanılabildiği gibi, iletken bir plazma da kullanılabilir. Bu durumda sürtünme azalacağından armatürün hızı ve dolayısıyla merminin hızı daha da artacaktır [23].



Şekil 1.11: Raylı fırlatıcı çalışma prensibi [23].

1.1.2. Bobinli Fırlatıcılar

Bobinli fırlatıcılar birbirleri ile manyetik olarak bağlantılı sürücü bobini ve mermi bobini arasında oluşturulan elektriksel itme veya çekme kuvveti ile merminin fırlatılması ilkesine dayanır. Sürücü bobini tek veya ardışık yapıda olabilir. Örnek bir bobinli fırlatıcı yapısı Şekil 1.12’de gösterilmektedir.



Şekil 1.12: Bobinli fırlatıcı gösterimi [24].

Burada oluşan kuvvet, sürücü bobini ile mermi arasındaki endüktans ilişkisiyle oldukça bağlantılıdır. Bilindiği gibi akım taşıyan bir iletken depolanan manyetik enerji sistemin endüktansının bir fonksiyonudur:

$$W_L = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1.2)$$

Mermi ile sürücü bobin arasında bir yakınlık söz konusu olduğunda sisteme ait endüktans 3 parçadan oluşur:

- Sürücü bobinin öz endüktansı: L_d
- Mermi bobinin öz endüktansı: L_p
- Sürücü bobinin ve mermi arasındaki karşılıklı endüktans: M

Toplam enerji hesaplandığında,

$$W_S = \frac{1}{2} L_p I_p^2 + \frac{1}{2} L_d I_d^2 + M I_p I_d \quad (1.3)$$

elde edilir.

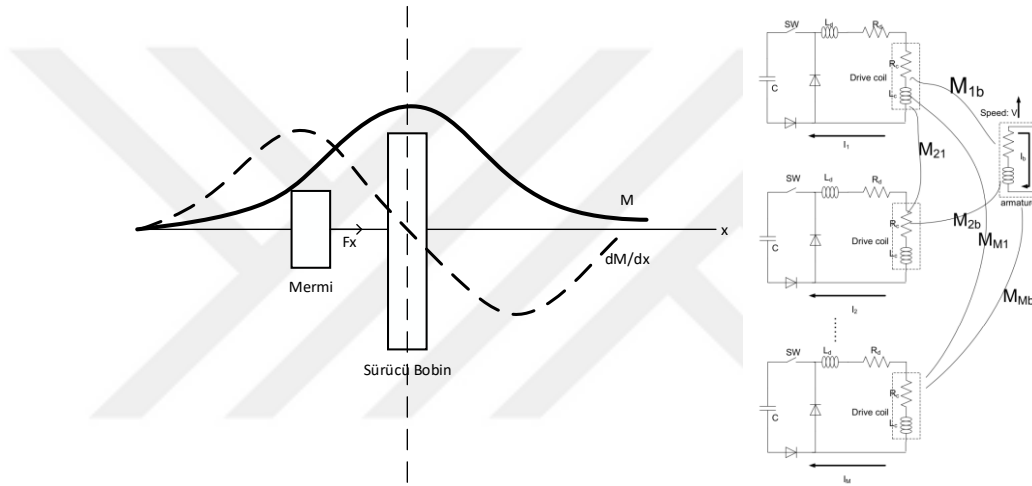
Mermi tek bir yönde (x eksen) hareket ettiği için öz endüktanslara ait enerji sabit olacak ve karşılıklı endüktansa ait manyetik enerji x 'e göre değişecektir. Enerji kayıpları ihmal edildiğinde mermiye uygulanan kuvvet,

$$F_p = \frac{dW_m}{dx} = \frac{dM}{dx} I_p I_d \quad (1.4)$$

olarak hesaplanır.

Bu formülasyondan da görülebileceği üzere mermiye etki eden kuvvet, sürücü ve mermi bobinlerindeki akımın yanı sıra karşılıklı endüktans geçişine (mutual inductance gradient) bağlıdır.

Karşılıklı endüktans mermi bobinden uzakta iken sıfıra yakındır ve mermi sürücü bobin ile aynı hizaya geldiğinde maksimum değerini alır. Ancak karşılıklı endüktans geçişi mermi ve sürücü bobin aynı hizada iken sıfır olur ve bu konumda mermiye uygulanan kuvvetin sıfır olduğu anlamına gelir. Karşılıklı endüktanstaki artışın (eğimin) en yüksek olduğu yerde ise kuvvet maksimum değerini alır [25]. Mermi ve sürücü bobin arasındaki M ve dM/dx ilişkisi Şekil 1.13'te gösterilmiştir.



Şekil 1.13: Mermi ve sürücü bobin arasındaki M ve dM/dx ilişkisi [25].

Grafikte gözlenmesi gereken bir diğer olay ise dM/dx 'in değişimidir. Çünkü mermi bobine yaklaştıkça pozitif iken mermiden uzaklaştıkça negatif değerini almaktadır. Bu da kuvvetin mermiye ters yönde uygulanacağı anlamına gelir ve bu fırlatıcı çalışma prensibine aykırıdır. Bunu engellemek için iki yöntem bulunmaktadır:

- Mermi veya sürücü bobinin akımını ters yöne çevirmek,
- Bobinlerin üzerindeki akımı yok etmektir.

Fırlatıcılarda uygulanan kuvvetin sürekli olması ve verimin yüksek olması beklenir. Bunun için I_p akımının sabit bir DA olduğu varsayıldığında sürücü bobine dM/dx değişimi ile uyumlu bir sinüs formunda akım uygulanarak dalgalanması az bir kuvvet elde edilebilir. Fırlatıcı içerisindeki merminin hızına bağlı olarak sinüzoidal akımın frekansının da artırılması gerekmektedir.

Bobinli bir fırlatıcıda hızı artırmak için şu yöntemler kullanılabilir:

- I_d ve I_p akımlarını arttırmak: Güç kaynağı, ısı kayıplar ve yüksek gerilimlerde yüksek izolasyon direnci ihtiyacı gibi bazı kısıtlar akımların artırılmasında sorun teşkil edebilir.
- Sürücü bobin sayısını artırmak: Fırlatıcının uzunluğu artırılarak dağıtılmış bobinli bir konfigürasyonla mermi hızı artırılabilir.

Bobinli fırlatıcılar, raylı fırlatıcılar ile karşılaştırıldığında avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bazı avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Mermi ile fırlatıcı arasında fiziksel temas olmasına gerek yoktur. Mermi üzerindeki akım indüksiyon yöntemi ile oluşturulduğunda mermi ve sürücü bobinler üzerinde birbirini iten radyal kuvvetler oluşmaktadır. Bu kuvvetler mermi ile sürücü bobin arasındaki hava boşluğu ile ters orantılıdır. Mermi bir tarafa yaklaştığında hava boşluğu azalır ve itici kuvvet artar. Bu şekilde merminin fırlatıcıda merkezlenmesi ile hareketi sağlanır. Eğer bu kuvvetler yeterli olmazsa fırlatıcı namlusuna metal şeritler yerleştirilir ve indüksiyon ile eddy akımlarının oluşturulması sağlanarak metal şeritler ile mermi arasında itici kuvvet oluşturulur. Bu bir çeşit manyetik süspansiyon olarak tanımlanabilir ancak fırlatıcı veriminde düşüşe sebep olur.
- Yüksek verim,
- Daha sağlam bir mekanik yapı,
- Daha düşük akımlarda çalışabilme,
- Kolay bakım,
- Kontrol edilebilir atış frekansı,
- Namlu ağzında ark sorunu olmaması,
- Aynı anda birden fazla mermi fırlatabilmesi.

Dezavantajları ise,

- Sürücü bobinlerin mermi pozisyonuna göre kontrol zorluğu,
- Yüksek di/dt : sürücü bobinlerde oluşabilecek yüksek ters gerilim.

Bobinli fırlatıcılar merminin enerjilendirme yöntemine göre direkt bağlantılı ve indüksiyon olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [18]. İndüksiyon fırlatıcılar ise parça sayısı ve fırlatıcı bobinlerinin enerjilendirme yöntemine göre sürekli ve dağıtılmış

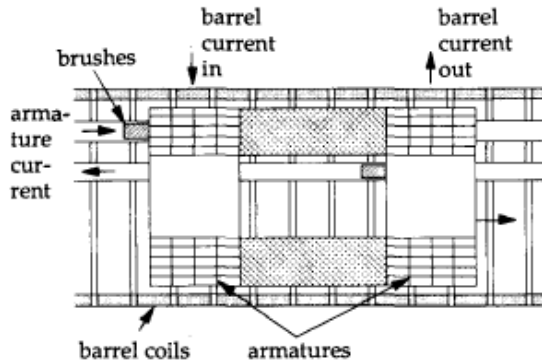
yürüyen dalga fırlatıcılar olmak üzere iki alt kategoride değerlendirilmektedir [26]. Ayrıca merminin sarımlı ve sarımsız olmak üzere çeşitleri de bulunmaktadır.

1.1.2.1. Direkt Bağlantılı Fırlatıcılar

Bu tip fırlatıcıların çalışma prensibi tıpkı senkron makinelerinkine benzemektedir. Senkron makinelerde armatür akımının oluşturulması gibi, mermide fırçalar sayesinde kayan kontak noktalarından akımlar oluşturulur ve merminin manyetik alanın hızını takip etmesi sağlanır [27].

Senkron fırlatıcılar ilk defa 1982 yılında Mongeau ve arkadaşları tarafından MIT’de yapılan çalışmalar sonucunda ark komütasyonlu fırlatıcılar olarak önerilmiştir. Bu çalışmada mermi üzerindeki kontaklar ile hareketin, bobinlerle senkron olması sağlanmıştır [16].

1991’de David G. Elliott, fırça yardımıyla direkt bağlantılı senkron bir bobinli fırlatıcı üzerine teorik çalışmalar gerçekleştirmiştir [29].



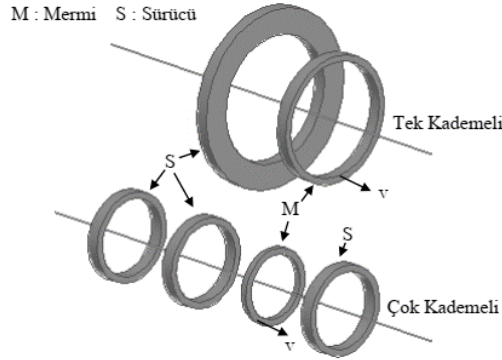
Şekil 1.14: David G. Elliott-Direkt bağlantılı fırlatıcı gösterimi [29].

1.1.2.2. İndüksiyon Fırlatıcılar

İndüksiyon fırlatıcılar indüksiyon motor çalışma prensibine dayanır ve hareket etmesi istenen merminin üzerinde indüksiyon yöntemi ile akımlar oluşturulur. Fırlatıcı sargı akımının zamana göre değişimi mermide bir akım oluşturur. Oluşan bu akımın etkisiyle iki sargı arasında itici bir kuvvet oluşur [30].

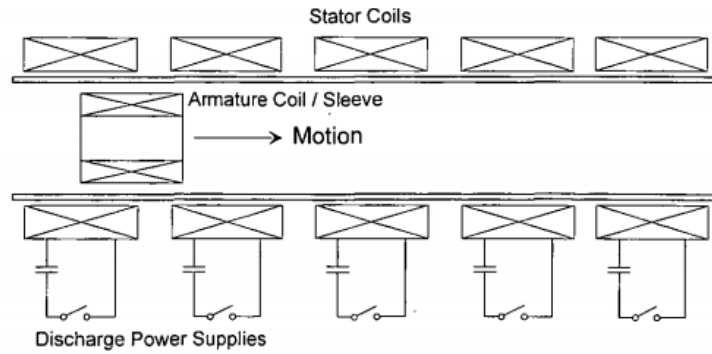
1.1.2.2.1. Darbeli İndüksiyon Fırlatıcılar

Darbeli indüksiyon fırlatıcılar birbirinden bağımsız bobinler ve bu bobinlere bağlı güç kaynaklarından oluşur. Bobinler tek tek enerjilendirilerek merminin hareketi sağlanmaktadır. Şekil 1.15'te tek kademeli ve çok kademeli indüksiyon fırlatıcı görülmektedir.



Şekil 1.15: Tek kademeli ve çok kademeli indüksiyon fırlatıcı [17].

Şekil 1.16'da gösterildiği gibi 5 kademeli bir kontrol devresi merminin fırlatma konumuna geldiğini tespit ettiğinde, yüksek gerilim kondansatöründe depolanan elektriksel enerji sürücü bobinine transfer edilmektedir [31].

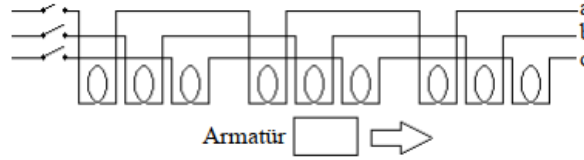


Şekil 1.16: 5 kademeli darbeli indüksiyon fırlatıcı [31].

1.1.2.2.2. Yürüyen Dalga İndüksiyon Fırlatıcı

Bir yürüyen dalga fırlatıcıda armatür akımı, armatürün hızı ile yürüyen manyetik alanın hızı arasındaki fark nedeniyle indüklenir. Yürüyen dalga fırlatıcıların yapısı lineer indüksiyon motorların yapısı gibidir. Armatür silindirik metal bir borudur. Namlu

ise silindirik bobinlerden oluşur. Bobin uyarımı jeneratörle ya da anahtarlanan kondansatörlerle sağlanır [32]. 3 fazlı bir jeneratörle sürülen bir fırlatıcı Şekil 1.17’de gösterilmiştir.

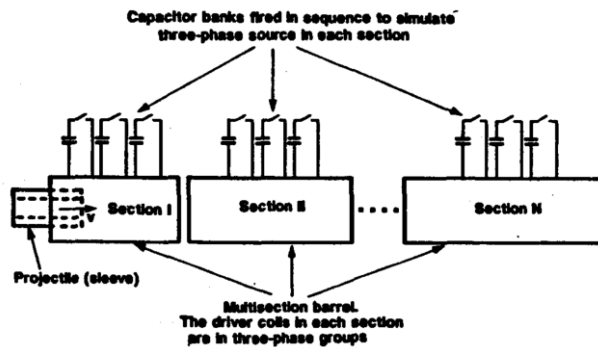


Şekil 1.17: Üç fazlı yürüyen dalga indüksiyon fırlatıcı.

Namlu ile armatür arasında kontak ve bağlantı yoktur. Namlu bobinleri, namlu etrafında yaklaşık olarak sinüzoidal dağılıma sahip bir manyetik alan üretecek şekilde uyarılır. Bobin akımlarının, namlu boyunca manyetik alanı hızlandırması için zamanla değişmesi gerekir. Armatür manyetik alanda daha yavaş hareket eder. Armatür ve manyetik alanın hızının arasındaki fark (kayma hızı) armatürde çevresel akımların indüklenmesine neden olur. Armatürde indüklenen bu akımlarda manyetik alan değişimine neden olarak hızlandırıcı kuvveti oluşturur. Eğer armatür yürüyen dalganın hızında hareket ederse, yürüyen dalga ile armatür arasında bir hız farkı olmadığı için aynı hızda hareket ediyor gibi olacağından, armatürde gerilim indüklenmez [33].

1.1.2.2.3. Lineer İndüksiyon Fırlatıcılar

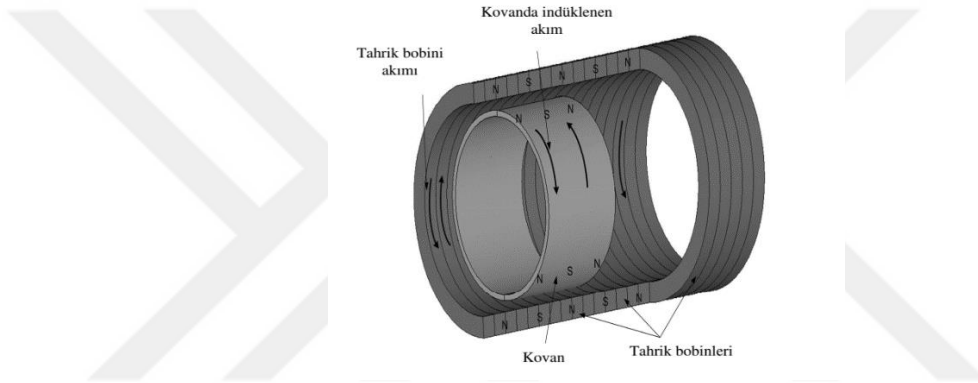
1989’da Zabar ve arkadaşları bobinli fırlatıcılara yeni bir yaklaşım getirmiş ve Lineer İndüksiyon Fırlatıcı tasarımı ortaya koyulmuştur [34], [37].



Şekil 1.18: Kondansatör anahtarlanması ile sürülen lineer indüksiyon fırlatıcı [36].

Lineer indüksiyon fırlatıcı, hava nüveli bobinlerden oluşan sabit bir namludan ve hareket eden iletken silindirik biçimli bir mermiden oluşmakta; tristörler anahtarlanarak kapasitörlerdeki enerji ile hareket eden dalga, merminin fırlatılmasını sağlamaktadır [35].

Bu tasarımla mermi ile bir temas olmadan ve hareket eden dalga ile mermi arasında bir senkronizasyona ihtiyaç duyulmadan fırlatmanın yumuşak bir hızlanma ile gerçekleştirilmesi sağlanmıştır [39]. Ayrıca yapılan çalışmalarda mermide oluşan radyal kuvvetler ile fırlatıcı yüzeyi ile levitasyon kararlılığının yüksek olduğu görülmüş ve sürtünmeden kaynaklı problemler elemine edilmiştir [40].

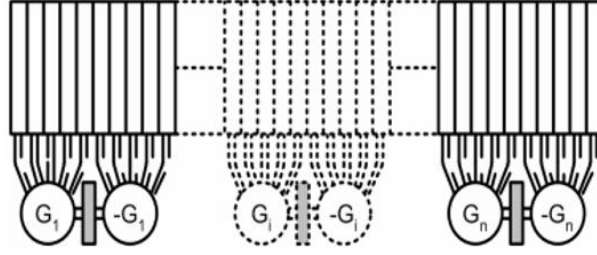


Şekil 1.19: Lineer indüksiyon fırlatıcı [26].

Lineer indüksiyon fırlatıcılar önerildikten sonra Balıkçı ve arkadaşları tarafından performansının artırılması için çalışmalar yapılmıştır. Senkron jeneratör ile sürülen 4 bölmeli bir fırlatıcı 3 faz yerine 5 faz ile sürülerek ivmelendirme kuvvetindeki dalgalanma azaltılmış ve daha yumuşak bir hızlanma ile faz sayısına bağlı olarak verimli bir fırlatma işlemi yapılabileceği sonucu elde edilmiştir [43]-[46].

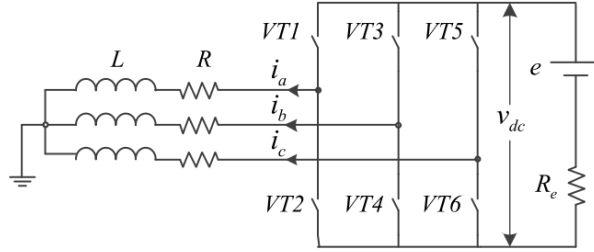
Bir diğer çalışmada fırlatıcının bobinlerinin seri bağlama yerine paralel bağlama ile jeneratör tarafından sürülerek performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Paralel bağlama ile daha düşük giriş gerilimi ile daha düzgün bir hızlanma elde edildiği görülmüştür [47].

Fırlatıcı içerisindeki merminin sıcaklık artışının düşürülmesi ve ivmelenme eğrisinde daha yumuşak geçişlerin elde edilmesi için fırlatıcının her bir parçası bağımsız bir alt-fırlatıcı olarak çalışma yapılmış, jeneratör frekans ve gerilimi sürekli artırılarak fırlatıcı performansının geliştirilmesi sağlanmıştır [45].



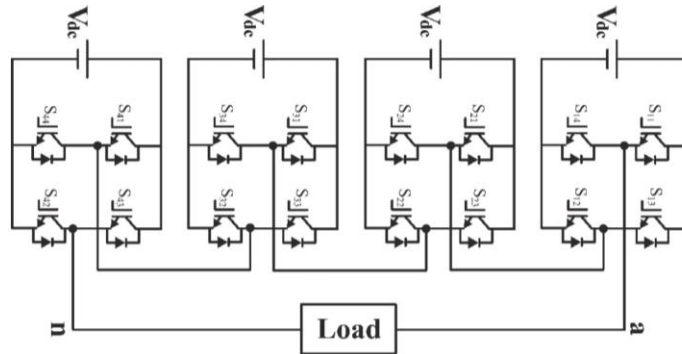
Şekil 1.20: Bağımsız alt bölümlerden oluşan lineer indüksiyon fırlatıcı [45].

Asenkron indüksiyon motor sürücülerinde olduğu gibi iki seviye eviricilerle sinüzoidal akımların tüm fırlatıcı bobinlerine uygulanmasıyla itme kuvvetinde önemli ölçüde iyileştirmeler sağlamıştır [48]. Bu yöntemlerde kontrol stratejisi olarak değişken gerilim değişken frekans yöntemi uygulanmış ve simülasyon çalışmaları ile birlikte deneysel sonuçlar ortaya konulmuştur.



Şekil 1.21: İki seviyeli evirici ile tüm fırlatıcının enerjilendirilmesi [48].

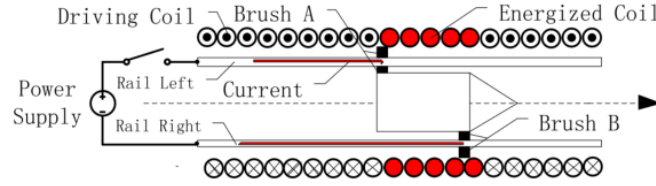
Evirici teknolojisinin fırlatıcılara uygulanmasıyla birlikte çok seviyeli eviricilerle daha yüksek gerilimde anahtarlama gibi avantajlar sunan güç sistemleri de önerilmiştir. [49]. Çok seviye eviriciler ile de tüm fırlatıcı tek bir yük olarak sürülmüş ve tüm bölümler aynı anda enerjilendirilmiştir.



Şekil 1.22: Çok seviyeli evirici ile tüm fırlatıcının enerjilendirilmesi [49].

1.1.3. Relüktans Fırlatıcılar

Relüktans fırlatıcılar ise ferromanyetik malzemeden yapılmış bir merminin fırlatılması ilkesine dayanır. Şekil 1.23'te görüldüğü gibi sürücü bobin ile bir manyetik alan oluşturulduğunda ferromanyetik mermi bobinin içine doğru çekilir ve hızlanması sağlanır [50].



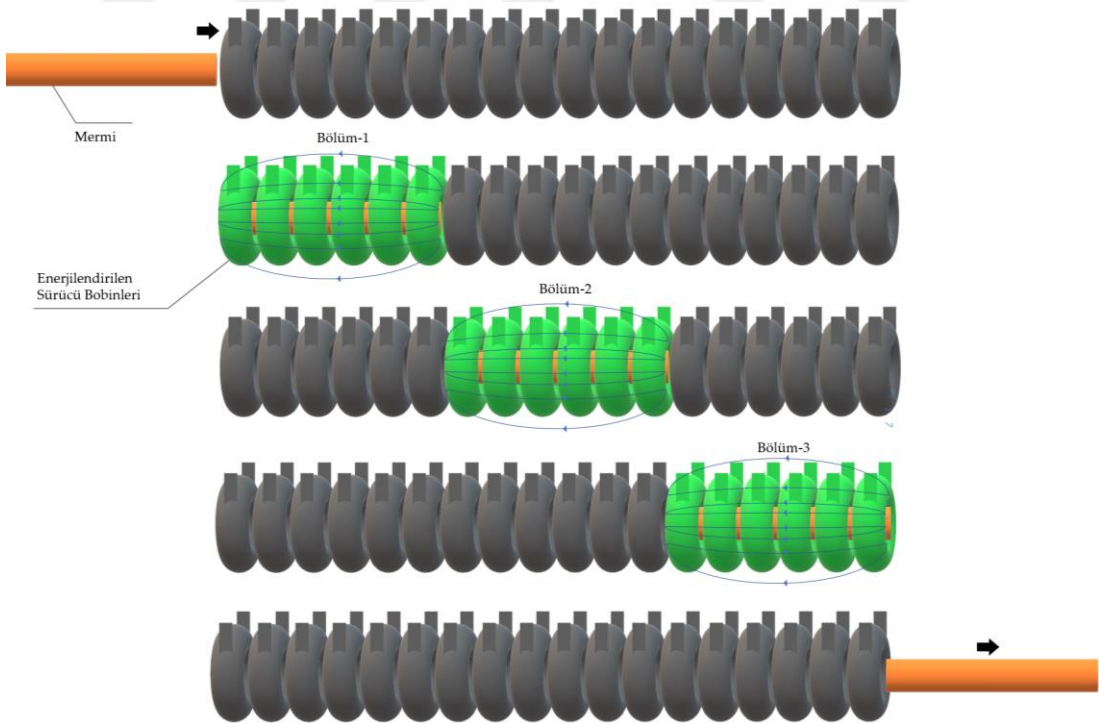
Şekil 1.23: Relüktans bobinli fırlatıcı yapısı [51].

1.2. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Lineer elektromanyetik fırlatıcıların güç sistemleri yüksek gerilim ve yüksek güçlü sistemlerdir. Kullanılan bu sistemlerin fırlatıcının ve merminin tipine göre farklı frekans ve genlikte akım uygulayabilmeleri çok önemlidir. Ayrıca bu tip fırlatıcılarda yüksek hızlara ulaşabilmek adına gerektiğinde daha fazla bölüm eklenmesi gerekebilir. Bunun için ise kullanılan güç sisteminin modüler olması büyük önem taşır. Buna ek olarak uygulamaya bağlı olarak mermi veya faydalı yükün hızının kontrol edilebilmesi gerekmektedir [54]. Bu tezde modern motor kontrol sistemlerinde kullanılan eviriciler fırlatıcı sistemine modüler bir yöntemle uygulanmış ve geleneksel güç sistemlerinin yüksek enerji kaybı, düşük verim, düşük fırlatma sıklığı vb. dezavantajları giderilmiştir. Tezin ana hedefi, verimi yükselterek yüksek atış sıklığına sahip daha az yer kaplayan bakım maliyeti düşük hız kontrollü modüler bir fırlatıcı güç sistemi gerçekleştirmektir.

Güç sisteminin kontrolünde FPGA tabanlı bir kontrol sistemi kullanılarak fırlatıcıdaki tüm bölümler paralel olarak kontrol edilmiş ve istenilen akım dalga formlarının uygulanması sağlanmıştır. Fırlatıcı sistemlerindeki bozucuların simülasyon ortamında modellenmesi ile elde edilen dalga formu gereksinimleri gerçek deney ortamındaki fırlatıcıya uygulanmıştır. Elde edilen bilimsel verilerle hem esnek hem de verimli bir güç sistemi tasarlandığı kanıtlanmıştır.

Bu çalışmada, mevcut güç koşullandırma sistemlerindeki dezavantajların üstesinden gelmek için modüler bir bobin enerjilendirme yöntemi tasarlanmıştır. Lineer indüksiyon fırlatıcı bölümlere ayrılmış ve her bölümdeki bobin çiftleri sinüzoidal PWM yöntemiyle birbirinden bağımsız yüksek güçlü H-köprülü evirici tarafından sürülmektedir. FPGA tabanlı kontrol ünitesi, bağımsız evirici modülleri için gerekli PWM sinyallerini üretir. Bu sinyaller, merminin konumuna bağlı olarak bölüm bölüm artan bir frekansa sahip hareketli bir manyetik dalga oluşturur. Mermideki indüklenmiş akımlar, merminin bu dalganın biraz gerisinden gitmesine neden olur. FPGA'daki kontrol algoritması, 3 boyutlu FEM (sonlu elemanlar yöntemi) analizi yardımıyla merminin fiziksel özelliklerine ve istenen namlu çıkış hızına göre optimize edilir. Bu sayede **Şekil 1.24**'te gösterildiği gibi namluda merminin olmadığı yerlerdeki bobinlere enerji verilmesine gerek kalmamakta ve fırlatıcının verimliliğine önemli katkı sağlamaktadır. Ayrıca fırlatıcıda VVVF yöntemini uygulamak için gereken yüksek akım ve frekans değişiklikleri fiziksel bir yöntem (kondansatör değerlerini veya bir jeneratörün hızını değiştirmek gibi) kullanılmadan sadece yazılım algoritmasına dayalı olarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.24: Fırlatıcı bölümlerinin ayrı ayrı enerjilendirilerek sürekli yürüyen dalga oluşturulması.

Bu tezin temel amaçları ise şu şekilde sıralanabilir:

- i) Modüler ve yüksek verimli bir fırlatıcı sistemi sunmak, evirici güç devrelerini analiz ve simüle etmek ve eviricileri kontrol etmek için FPGA tabanlı bir merkezi kontrol ünitesi donanımı ve VVVF algoritmaları geliştirmek;
- ii) Yüksek güçlü IGBT H-köprü modülleri, FPGA kontrollü fiber-optik alıcı-vericiler, yüksek voltajlı kapasitör şarj devresi ve lazer konum algılama sistemi içeren laboratuvar ölçekli bir lineer indüksiyon fırlatıcı prototipi geliştirmek;
- iii) 3 boyutlu FEM analizi kullanarak kuvvet dalgalanmasını en aza indirmek için uygulanacak akımların frekans, faz gecikmesi vb. özelliklerini gözlemleyerek hareket eden manyetik dalganın sürekliliğini optimize etmek;
- iv) Çift darbe test yöntemini kullanarak her bir H-köprü modülü için IGBT anahtarlarının ve sürücülerinin düzgün çalıştığını doğrulamak;
- v) Akım, voltaj ve hız ölçüm sonuçlarını kullanarak merminin amaçlanan hızla yüksek verimlilikle ulaştığını göstermektir.

Tezin akışı ise şu şekilde devam etmektedir. Tezin ikinci bölümünde önerilen sistem modeli açıklanmış ve sistem bileşenleri tanımlanmıştır. Fırlatıcı sistemi için gerekli matematiksel ve elektriksel devre modelleri elde edilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde ise güç sistemi topolojisi anlatılmıştır. Kontrol yöntemi ve FPGA üzerindeki uygulaması hakkında bilgi verilmiş ve PSIM simülasyon ortamında fırlatıcı devre modelleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tezin dördüncü bölümünde ise tam fırlatıcı modeli kurularak gerçek sistemin 3B-FEM simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda fırlatıcı bobinlerine uygulanan akımların kuvvet ve hız grafiklerine etkisi araştırılmıştır. Böylelikle gerçek sistemde uygulanması hedeflenen akımlar optimize edilmesi sağlanmıştır. Tezin beşinci bölümünde ise gerçek ortamda tasarlanan fırlatıcı ve güç sistemine yer verilmiştir. Bu bölümde eviricilerin tasarımı, üretimi ve doğrulama testleri anlatılmıştır. Ayrıca gerçek sistemdeki FPGA kontrol ünitesi, bobinler ve mermi gibi diğer bileşenler tanıtılmıştır. Fırlatma sonucunda elde edilen akım, gerilim ve hız sonuçları paylaşılmıştır. Tezin altıncı ve son bölümünde ise simülasyonlar ile deneysel sonuçlara, karşılaştırmalarına ve diğer tartışmalara yer verilmiştir.

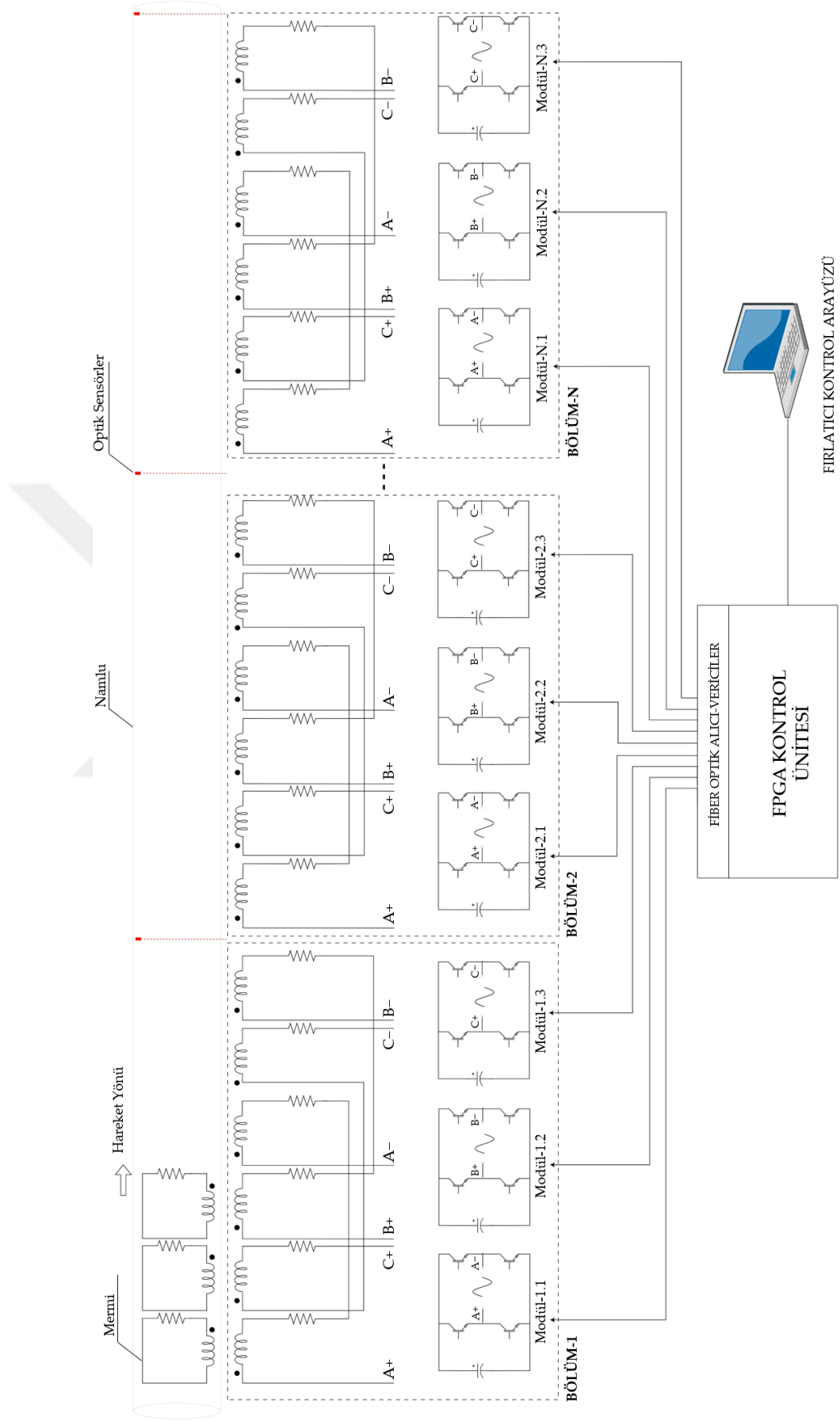
2. SİSTEM MODELİ VE YÖNTEM

Lineer elektromanyetik fırlatıcılar lineer indüksiyon motorlarla benzer prensipte çalışan hava çekirdekli sistemlerdir. Temel olarak namlu, mermi ve namluyu enerjilendiren güç sistemlerinden oluşur [55]. Mermi, yoğun manyetik alanların neden olduğu ısıya dayanabilecek kalınlıkta alüminyumdan yapılmış basit bir içi boş silindirden oluşur. Güç sistemleri mermi ve namlunun özelliklerine göre namludaki bobinlere çok fazlı akımları uygular ve hareket eden bir elektromanyetik dalga oluşturarak merminin bu dalgayı takip etmesi sağlanır. Mermi her zaman hareket eden manyetik dalganın gerisinde kalır ve bu da bir kaymaya neden olur. Bu olgu, mermi üzerinde azimut akımları indükler ve manyetik alanla etkileşimi yoluyla itme ve merkezleme kuvvetleri oluşturur.

Bu tezde önerilen fırlatıcı sistem modeli 3 ana bloktan meydana gelmektedir:

- i) Fırlatıcı düzeneği: Namlu, mermi, sürücü bobinleri ve optik hız sensörlerinden oluşur.
- ii) Güç Katı: IGBT güç anahtarlarını, sürücülerini, yüksek gerilim kapasitörleri ve şarj ünitelerini içerir.
- iii) FPGA kontrol ünitesi: Fırlatıcı kontrol algoritmasının uygulanmasını sağlar. FPGA kontrolcüsünü, eviriciler için fiber optik PWM sinyallerini, mermi pozisyon kontrolü ve bilgisayar arayüzü haberleşmelerini içerir.

Bu sistem modelinde namludaki bobinler bölümlere ayrılır ve her bir bölüm 3 fazlı bir güç sistemi tarafından tahrik edilir. Bu 3 fazlı sistem H-köprü eviricilerle oluşturulur ve FPGA kontrol ünitesi tarafından kontrol edilir. Namlu boyunca bölümlere aynı fazda akımlar uygulanarak negatif kuvvetlerin oluşması engellenmektedir. Sadece merminin olduğu bölümün enerjilendirilmesiyle de yüksek verim elde edilmesi sağlanmaktadır. FPGA kontrol ünitesi her bölümde frekansı artırmakta, aynı zamanda da V/f oranını sabit tutarak namlu boyunca sabit bir kuvvet elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.1: Sistem model diyagramı.

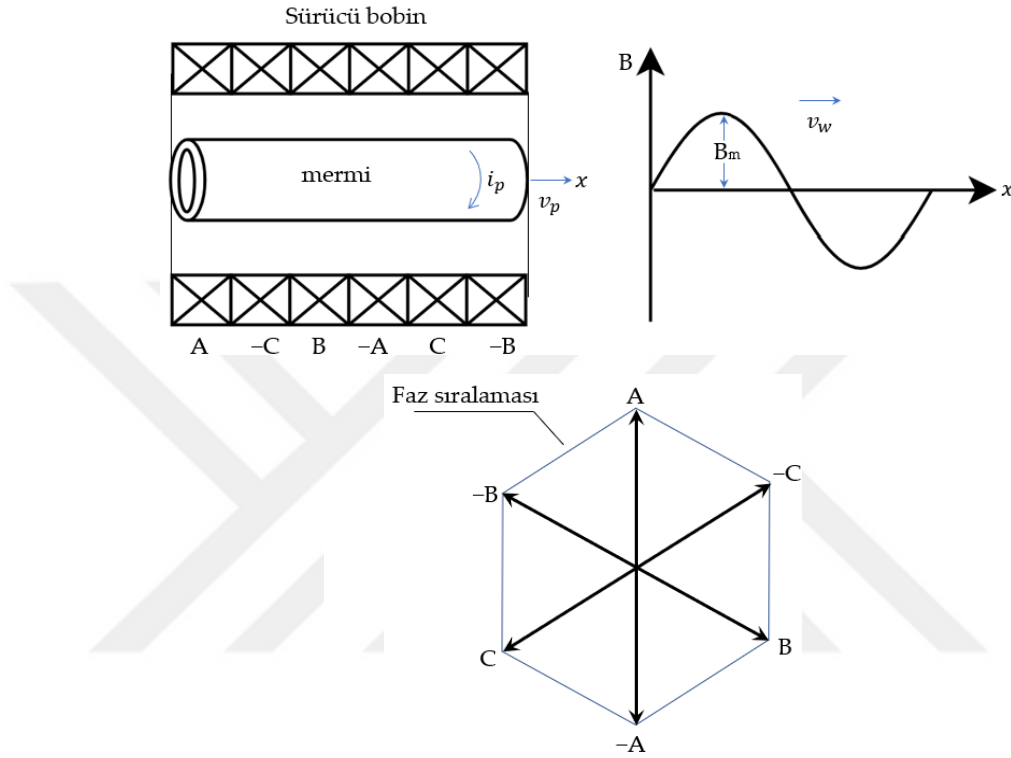
Geçici rejimde çalışan fırlatıcı sisteminde açık çevrim skaler bir kontrol gerçekleştirilmektedir. Bu kontrol yönteminde değişken frekans-değişken gerilim (VVVF) olarak da bilinen frekansın ve uygulanan gerilimin zamanla artırılması ve merminin hızlandırılması sağlanmaktadır [56]. Hızlanmada verimi artırmak ve kuvvet dalgalanmalarını en aza indirmek için ise sinüzoidal darbe geniş modülasyonu yöntemi kullanılmaktadır. Mega-watt mertebesinde güç aktarımı gerçekleştirilen bu sistemde yoğun elektromanyetik alanlar oluştuğu için sinyaller elektriksel değil fiber optik kablolar ile taşınmaktadır. Böylelikle sistemdeki uzun kontrol hatlarının elektriksel gürültülerden etkilenmemesi ve olası arızaların engellenmesi hedeflenmektedir.

Sistemdeki her bölüm 6 bobin ve 3 adet eviriciden oluşan modüler fırlatıcı yapısını oluşturmaktadır. Bu da fırlatıcıda yüksek hızlara ulaşabilmek için daha fazla bölüm ekleyebilme avantajlarını beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte sistemin kontrolünü ve dolayısıyla namlu boyunca düzgün bir yürüyen elektromanyetik dalga oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden sistemde kontrolcü olarak paralel veri ve işaret işleme kapasitesi olan FPGA kontrolcüsü seçilmiştir. Kontrolcü her bir bölüme bağımsız olarak istenilen frekans ve gerilimde güç uygulayabilmektedir.

Fırlatıcı bölümlerine uygulanan çok fazlı akımlar arasında belirli bir faz farkı oluşturulması gerekmektedir. Bu faz farkı sayesinde oluşan hareket eden dalga paketi merminin hareketini sağlamaktadır. Bu sayede içi boş alüminyumdan yapılan mermi üzerinde indüklenen akımlar, mermide çok yüksek sıcaklıklara neden olabilmektedir. Mermi, hareket eden dalganın daima arkasında kalarak kayma kavramını ortaya çıkarmaktadır. Dalga ile mermi arasındaki hız farkından kaynaklanan kaymanın optimum şekilde ayarlanması sistemin verimi açısından oldukça önemli bir parametredir. Kayma sayesinde mermi üzerinde azimut akımları oluşur ve bu akımlar itme kuvvetine sebep olur. Ayrıca merkezleme kuvvetinin oluşması ile de mermi ile namlu arasında temas oluşmaz ve sürtünme kuvvetlerinin yok edilmesi sağlanır.

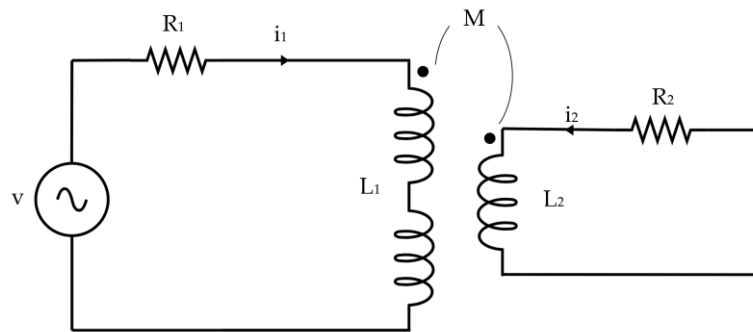
Önerilen sistem topolojisinde namludaki sürücü bobinleri bölümlere ayrılmış ve her bir bölüm A, B ve C üç fazlı güç sistemi tarafından enerjilendirilmesi sağlanmıştır [41]. Burada A, B ve C fazları arasındaki faz farkı ise H-köprü eviricilerin kontrolü ile sağlanmaktadır. Faz farkının seçilmesi ise merminin yüksek hızlara ulaşması için bir diğer kritik konudur. Lineer indüksiyon fırlatıcılar üzerine yapılan faz farkı araştırmalarında klasik 120 derecelik bir faz farkı yerine 60 derece bir faz farkı ile daha yüksek hızlar elde edilmiştir [24]. Fırlatıcıda temel hedeflerden bir tanesi yürüyen

dalga'nın olabilecek en hızlı şekilde oluşturulması olduğundan 60 derece faz farkı, itki kuvvetine pozitif etki etmiştir. Aralarında 120 derece faz farkı olan A, B ve C akımları namlu boyunca A, -C ve B şeklinde uygulanarak 60 derece faz farkı elde edilmektedir. Akımlar arasındaki ilişki, faz sıralamaları ve fiziksel olarak bir bۆlümdeki bağlantıları şekil 2.2'de gۆsterilmektedir.



şekil 2.2: şürücü bobinleri ve faz sıralamaları.

Manyetik olarak birbirine akuple edilmiş mermi ve tek bir şürücü bobini lineer indüksiyon fırlatıcının en küçük komponentini oluşturur [57]. Bu komponenti oluşturan devre elemanlarının eşdeğer devresi şekil 2.3'te gۆsterilmektedir.



şekil 2.3: Basit fırlatıcı modelinin eşdeğer devresi.

Bu devre üzerinde yapılan analiz ile elde edilen eşitlikler ise şu şekildedir:

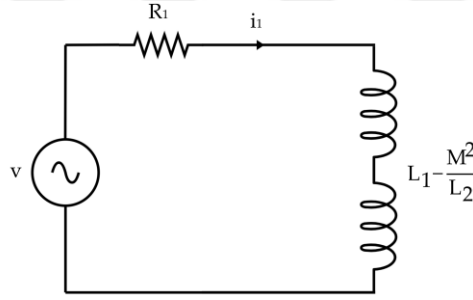
$$v = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dx}, \psi_1 = L_1 i_1 + M i_2 \text{ (coil - 1 flux linkages)} \quad (2.1)$$

$$0 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dx}, \psi_2 = L_2 i_2 + M i_1 \text{ (coil - 2 flux linkages)} \quad (2.2)$$

$$v = R_1 i_1 + \frac{d}{dt} (L_1 i_1 + M i_2) \quad (2.3)$$

$$0 = R_2 i_2 + \frac{d}{dt} (L_2 i_2 + M i_1) \quad (2.4)$$

Burada M değeri sürücü bobini endüktansı ile kısa devre edilmiş mermi arasındaki karşılıklı endüktansı ifade eder. Merminin direnci (R_2) ve başlangıç akısı ($\psi_2(0)$) ihmal edildiğinde **Şekil 2.4**'teki devre modeli elde edilir.



Şekil 2.4: Kaynak tarafından görülen eşdeğer devre modeli.

Bu devreye ait analiz sonucunda ise denklem 2.5 elde edilir.

$$v = R_1 i_1 + \frac{d}{dt} \left(\left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right) i_1 \right) \quad (2.5)$$

Güç sistemi tarafından eşdeğer devreye sağlanan güç ise

$$p = R_1 i_1^2 + \frac{dW_m}{dt} - \frac{1}{2} \frac{i_1^2}{L_2} \frac{dM^2}{dt} \quad (2.6)$$

olarak hesaplanır. Burada $R_1 i_1^2$ direnç kayıpları, $\frac{dW_m}{dt}$ sistemdeki manyetik alan ve $\frac{i_1^2}{L_2} \frac{dM^2}{dt}$ kinetik enerji girişidir.

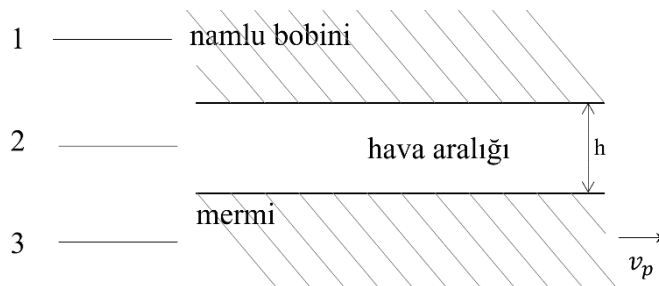
Fırlatıcıdaki mermiye namlu ekseninde uygulanan anlık kuvvet güç eşitliğindeki kinetik enerji bölümünden şu şekilde hesaplanabilir:

$$F = -\frac{1}{2} \frac{i_1^2}{L_2} \frac{dM^2}{dx} \quad (2.7)$$

Bu kuvvet tanımı evirici güç devrelerinin tasarımı ve analizi için faydalı olsa da yürüyen manyetik dalga prensibine dayalı lineer indüksiyon fırlatıcı için daha fazlasına ihtiyaç vardır. Çünkü mermiye birçok sürücü bobin tarafından üretilen kuvvet dinamik ve geçici rejimde uygulanmaktadır [58], [59]. Bu noktada kayma kavramına ve fırlatıcının fiziksel özelliklerine göre kuvvetin elde edilmesi önemlidir.

Maxwell denklemlerinden hareketle **Şekil 2.5**'te görülen fırlatıcı bobini ile mermiden oluşan düzlemsel sistem üzerinde elde edilecek kuvvet hesabı için öncelikle şu kabuller yapılabilir [28], [60]:

- Analiz için ideal düzlemsel modelin kullanılması
- İlgili bölümde frekansın sabit olması
- Merminin uzunluğu ile hava boşluğu karşılaştırıldığında uç etkilerin ihmal edilmesi
- Namlu üzerinde uygulanan akımların sadece temel bileşeninin hesaba katılması.



Şekil 2.5: Fırlatıcı bobini-mermi düzlemsel modeli.

1. ortam: namlu sürücü bobini: $k_b e^{-j(\omega t - x \frac{\pi}{\tau})}$
2. ortam: hava aralığı: μ_0 ; $\sigma = 0$
3. ortam: mermi: μ_0 ; σ

Burada, h : hava aralığı, v_p : merminin hızı, τ : namlu bobinleri kutup aralığı, σ : iletkenlik, μ_0 : havanın manyetik geçirgenliği: $4\pi 10^{-7}$, k_b : akım tabakası maksimum değeridir.

Yukarıdaki kabuller neticesinde elde edilen Maxwell denklemleri şu şekilde olur:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.11)$$

Fırlatıcı güç sisteminde kullanılan frekanslar için akım yoğunluğun değişimi ihmal edildiğinde Ampere yasası olarak da bilinen denklem 2.9 şu şekilde sadeleşir:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.12)$$

Bu formül denklem 2.11'de yerine konulduğunda ise,

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \sigma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.13)$$

elde edilir. Çözümü kolaylaştırmak için $\vec{A}$ manyetik vektör potansiyeli tanımlanır:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (2.14)$$

Denklem 2.13 ve denklem 2.14 birleştirildiğinde ise eşitlik şu şekilde olur:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu_0 \sigma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.15)$$

Denklem 2.15 vektör laplasyeni ile çözüldüğünde,

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} = \mu_0 \sigma(-\frac{\partial \vec{K}}{\partial t} + \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A})) \quad (2.16)$$

bulunur.

Burada $\nabla \cdot \vec{D} = 0$ olur ve $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ kabul edildiğinde denklem 2.17 elde edilir.

$$\nabla^2 \vec{A} = \mu_0 \sigma \left(\frac{\partial \vec{K}}{\partial t} - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) \right) \quad (2.17)$$

Akım tabakası y ekseninde hareket ettiği için denklem 2.17 şu şekilde yazılabilir:

$$\nabla \times \vec{A} = -\frac{\partial K_y}{\partial z} \vec{x}_0 + -\frac{\partial K_y}{\partial x} \vec{z}_0 \quad (2.18)$$

Mermi x ekseninde hareket ettiği için kayma değerine bağlı olarak hız ve $\vec{A}$ vektörü,

$$\vec{v} = v_x \vec{x}_0 = (1 - s)v_s \vec{x}_0 \quad (2.19)$$

$$\vec{A} = A_y(t, x, z) \vec{y}_0 = A_y(z) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} \vec{y} \quad (2.20)$$

olarak elde edilir. Burada s kayma miktarı ve v_s senkron hızdır. Denklem 2.17 yeniden yazıldığında şu şekilde bulunur.

$$\frac{\partial^2 K_y}{\partial z^2} - \alpha^2 A_y = 0 \quad (2.21)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau} \sqrt{1 + \frac{j\sigma\mu_0 v_s s}{\frac{\pi}{\tau}}} \quad (2.22)$$

Hava aralığında $\sigma = 0$ olduğu için,

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau} \quad (2.23)$$

bulunur. Denklem 2.23 denklem 2.21'de yerine konulduğunda,

$$\frac{\partial^2 K_y}{\partial z^2} - \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 A_y = 0 \quad (2.24)$$

elde edilir.

Bu eşitlik sınır koşul değerleri dikkate alınarak hava aralığı için çözüldüğünde,

$$A_y^h = e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} (X e^{\frac{\pi}{\tau} z} + Y e^{-\frac{\pi}{\tau} z}) \quad (2.25)$$

mermi için çözüldüğünde ise,

$$A_y^m = e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau}x)}(Ze^{\alpha_z} + Te^{-\alpha_z}) \quad (2.26)$$

bulunur. Sınır koşulları için X , Y , Z ve T katsayıları elde edilir ve bunlara göre H ve B değerleri hesaplanır:

$$H_x^h = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial K_y}{\partial z} = -\frac{k_b}{4\Delta} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau}x)} (e^{\frac{\pi}{\tau}(z+h)} \left(1 + \frac{\pi}{\alpha}\right) - e^{-\frac{\pi}{\tau}(z+h)} \left(1 - \frac{\pi}{\alpha}\right)) \quad (2.27)$$

$$B_z^h = \frac{\partial K_y^h}{\partial z} = -j \frac{\mu_0 k_b}{4\Delta} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau}x)} (e^{\frac{\pi}{\tau}(z+h)} \left(1 + \frac{\pi}{\alpha}\right) + e^{-\frac{\pi}{\tau}(z+h)} \left(1 - \frac{\pi}{\alpha}\right)) \quad (2.28)$$

Burada,

$$\Delta = \cos\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) + \frac{\pi}{\alpha} \sinh\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) \quad (2.29)$$

Temel harmonik bileşeni tarafından mermideki birim alana etkiyen kuvvet ise,

$$F_s = \text{Re}\{B_z^h H_x^{h*}\}_{z=-h} = \text{Re}\{B_z^h H_x^{hx}\}_{z=0} \quad (2.30)$$

$$F_s = \frac{\mu_0 k_b^2}{4} \text{Re}\left\{-j \frac{\sinh\left(\frac{\pi}{\tau}h\right) + \frac{\pi}{\alpha^*} \cosh\left(\frac{\pi}{\tau}h\right)}{\cosh\left(\frac{\pi}{\tau}h\right) + \frac{\pi}{\alpha^*} \sinh\left(\frac{\pi}{\tau}h\right)}\right\} \quad (2.31)$$

$$F_s = \frac{\mu_0 k_b^2}{4} \text{Re}\left\{-j \frac{\tanh\left(\frac{\pi}{\tau}h\right) + \frac{\pi}{\alpha^*}}{1 + \frac{\pi}{\alpha^*} \tanh\left(\frac{\pi}{\tau}h\right)}\right\} \quad (2.32)$$

olarak elde edilir [34].

Fırlatıcıdaki namlu boyunca hareket eden manyetik dalganın hızı ise senkron hızdır:

$$V_s = 2\tau f \quad (2.33)$$

burada τ kutup aralığı ve f sürücü bobinlerine uygulanan akımın frekansıdır.

Mermi üzerinde akımlar indüklemek için senkron hız V_s ile merminin gerçek hızı V_p arasında bir fark olması gerekmektedir. Fırlatıcının normal çalışma koşullarında

mermi hızı yürüten dalga hızından daha yavaş olmalıdır. Bu iki hız eşit olduğunda ise mermiye uygulanan kuvvet sıfır olur. Kayma (s) hesabı ise şu şekilde yapılabilir:

$$s = \frac{V_s - V_p}{V_s} \quad (2.34)$$

Her bir sürücü bobini tarafından üretilen hareket eden dalga ile içi boş alüminyum silindir mermi arasındaki kuvvet ilişkisi ise şu şekildedir:

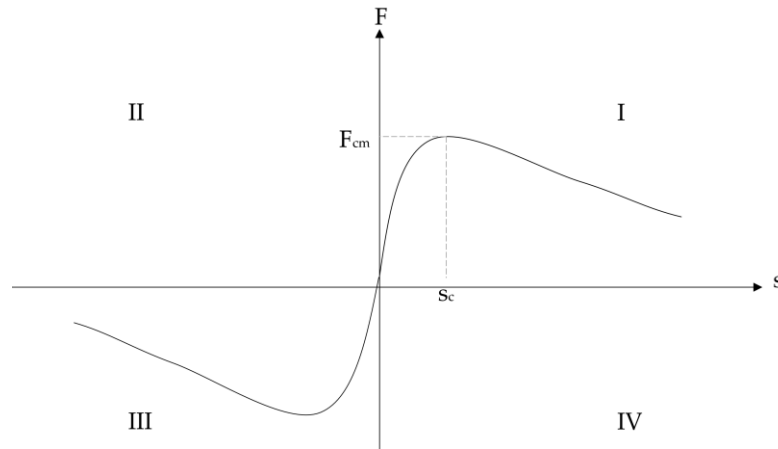
$$F = \frac{2F_{cm}}{\frac{s}{s_c} + \frac{s_c}{s}} \quad (2.35)$$

burada F_{cm} maksimum kuvvet değeri ve s_c mermiye uygulanan maksimum kuvvetin elde edildiği kritik kaymak miktarıdır.

F_{cm} değeri fırlatıcıdaki denklem 2.31'deki parametrelerin lineer olmayan bir fonksiyonudur. Bu parametrelerden bazıları,

- Sürücü bobinlerinin eksenel uzunluğu,
- Sadece kutup adımına ve fırlatıcının boyutlarına bağlı olan ancak boyutsal olmayan fonksiyonlar,
- Sürücü bobinlerinin sarım oranı ve uygulanan akım, gerilim değerleri.

Kuvvet ve kayma arasında tanımlanan denklem 2.10'daki ilişki **Şekil 2.6**'da gösterilmiştir.



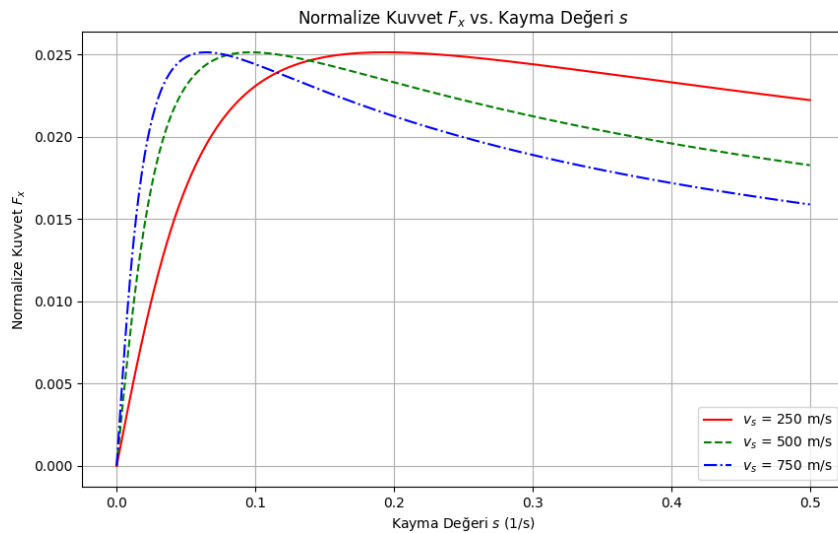
Şekil 2.6: Fırlatıcıda kuvvet-kayma arasındaki ilişki.

Fırlatıcıda hedef mermiye daima pozitif, sürekli ve az dalgalı bir kuvvet uygulamak olduğu için grafiğin birinci bölgesinde çalışması gerekmektedir. Eğer fırlatıcı bölümleri arasında yanlış bir kontrol ve geçiş uygulanırsa üçüncü bölgede çalışma durumu oluşur. Bu bölgede fırlatıcıdaki yürüyen dalga merminin gerisinde kalır ve negatif kuvvetlere neden olur.

Kuvvet ve kayma parametreleri için kritik değerler fırlatıcının performansı için oldukça önemlidir. Şekil 2.6'daki dalga formu denklem 2.10'daki parametrelerin değişimine bağlıdır ve kaymanın değişimi ile maksimum kuvvete olan etkileri bulunmaktadır. Burada 4 adet parametre için kuvvet-kayma arasındaki ilişki incelenmiştir:

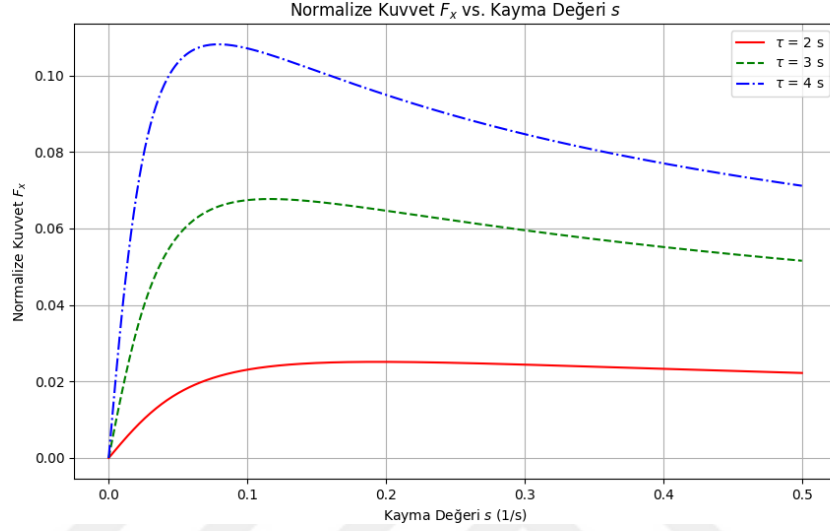
- hava aralığı: h
- senkron hız: v_s
- namlu bobinleri kutup aralığı: τ
- iletkenlik: σ

Senkron hızın kuvvet-kayma grafiğine olan etkisini incelemek için $h = 1 \text{ cm}$, $\tau = 2$ ve $\sigma = 1e7 \text{ S}$ parametreleri sabit tutularak $v_s = 250, 500, 750 \text{ m/sn}$ değerleri için Şekil 2.7'deki grafik elde edilmiştir. Bu grafik incelendiğinde senkron hızın maksimum kuvvete etkisi görülmemekle birlikte maksimum kuvvetin elde edildiği kritik kayma değeri artmaktadır.



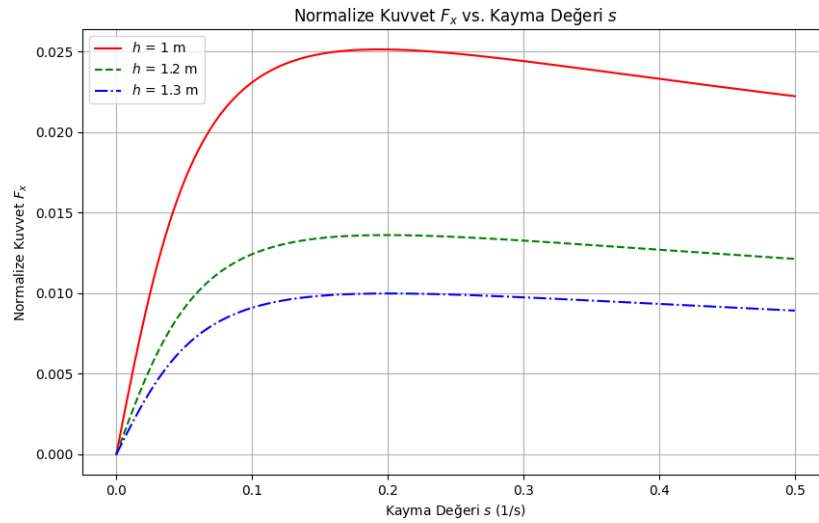
Şekil 2.7: Kuvvet-kayma grafiğinde senkron hızın etkisi.

Kutup aralığının kuvvet-kayma grafiğine olan etkisini incelemek için $v_s = 250 \text{ m/sn}$, $h = 1 \text{ cm}$ ve $\sigma = 1e7 \text{ S}$ parametreleri sabit tutularak, $\tau = 2, 3, 4$ değerleri için Şekil 2.8'deki grafik elde edilmiştir. Bu grafik incelendiğinde kutup aralığı arttıkça maksimum kuvvet de artmak ancak maksimum kuvvetin elde edildiği kritik kayma değeri değişmemektedir.



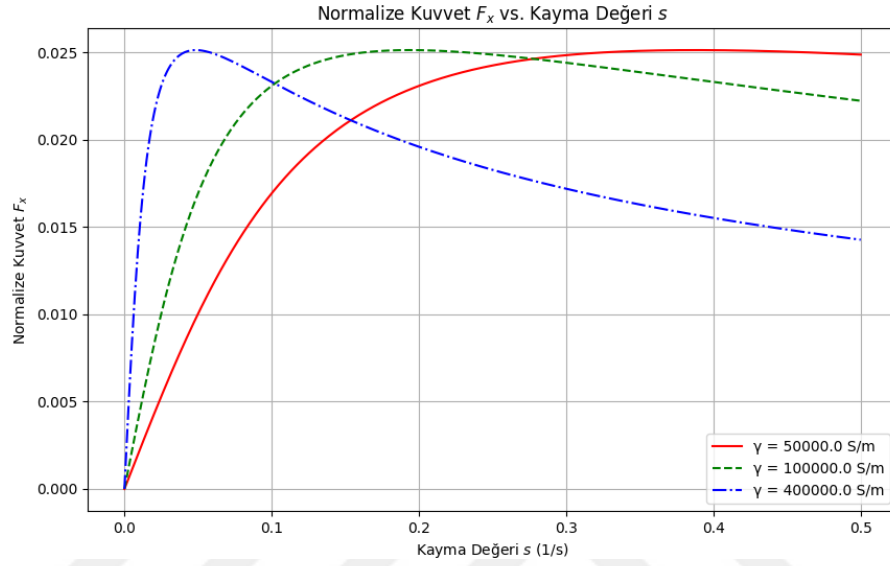
Şekil 2.8: Kuvvet-kayma grafiğinde kutup aralığının etkisi.

Hava aralığının kuvvet-kayma grafiğine olan etkisini incelemek için $vs = 250 \text{ m/sn}$, $\tau = 2$ ve $\sigma = 1e7 \text{ S}$ parametreleri sabit tutularak, $h = 1, 1.2, 1.3 \text{ cm}$ değerleri için Şekil 2.9'daki grafik elde edilmiştir. Bu grafik incelendiğinde hava aralığı arttıkça elde edilebilecek maksimum kuvvet azalmaktadır.



Şekil 2.9: Kuvvet-kayma grafiğinde hava aralığının etkisi.

İletkenliğin kuvvet-kayma grafiğine olan etkisini incelemek için $h = 1 \text{ cm}$, $\tau = 2$ ve $v_s = 250 \text{ m/sn}$ parametreleri sabit tutularak, $\sigma = 0.5e7, 1e7 \text{ ve } 4e7 \text{ S}$ değerleri için **Şekil 2.10**'daki grafik elde edilmiştir. Bu grafik incelendiğinde iletkenliğin maksimum kuvvete etkisi görülmemekte; iletkenliğin azalmasıyla birlikte maksimum kuvvetin elde edildiği kritik kayma değeri artmaktadır.



Şekil 2.10: Kuvvet-kayma grafiğinde iletkenliğin etkisi.

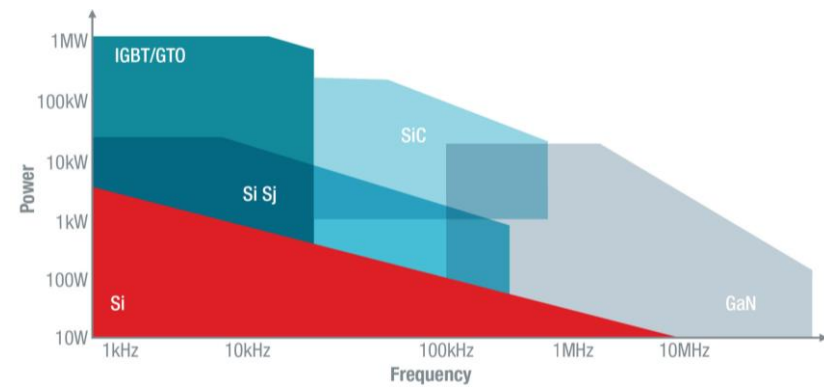
3. FIRLATICI GÜÇ KATI VE KONTROL

Hedeflenen fırlatıcı sisteminde yürüyen dalga oluşturabilmek için çok fazlı ve bu fazların arasında faz farkı olan bir güç katı gerekmektedir. Bu güç katının ayrıca fırlatıcının ihtiyacı olan akım, gerilim ve frekans değerlerini belirli bir kontrol algoritması içinde ayarlayabiliyor olması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için FPGA kontrol ünitesi ile kontrol edilen tek-fazlı H-köprü eviricileri kullanılmıştır.

Tek fazlı eviriciler temelde doğru akımı (DA) alternatif akıma (AA) çeviren yapılardır ve alternatif akımın istenilen genlik ve frekansta olmasını sağlarlar. Eviriciler iki ana kategoriye ayrılmaktadır: gerilim kaynaklı (GKE) ve akım kaynaklı (AKE) eviriciler.

Bir GKE girişinde çok düşük bir empedansa sahip bir DA gerilim kaynağı olan ve çıkış dalga formu genliği ve frekansı ayarlanabilir AA gerilim olan bir eviricidir. AKE ise girişi sabit veya kontrollü bir DA akım kaynağıdır ve çıkışında yüksek empedans ile AA akım elde edilir. GKE çıkış kontrolü dinamik uygulamalarda daha kolay olduğundan dolayı fırlatıcı güç katında bu tip eviriciler tercih edilmiştir.

Tek fazlı eviricilerin kontrolünde harici bir devreye gerek olmadan Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) çıkış kontrolü yapılabilmektedir. GKE girişinde kondansatörler sabit bir gerilim ile şarj edilir ve eviricideki yarı iletken anahtarların açık ve kapalı zamanlarının ayarlanmasıyla istenilen AA çıkış akımı elde edilmektedir.



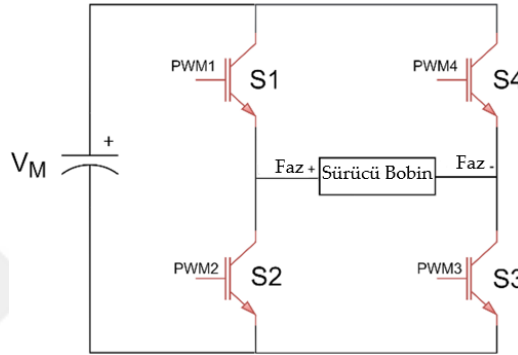
Şekil 3.1: Güç anahtarları sınıflandırılması [61].

Fırlatıcıda hedeflenen akım ve gerilim değerleri göz önünde bulundurulduğunda 20 kHz anahtarlama frekansı ve mega-watt seviyesindeki güç aralığına uygun anahtarlar

seçilmelidir. **Şekil 3.1**'de gösterilen güç anahtarları teknolojisine göre IGBT (insulated-gate bipolar transistor) anahtarların güç katında kullanılması en optimum seçenek olarak değerlendirilmiştir.

3.1. H-Köprü Gerilim Kaynaklı Evirici

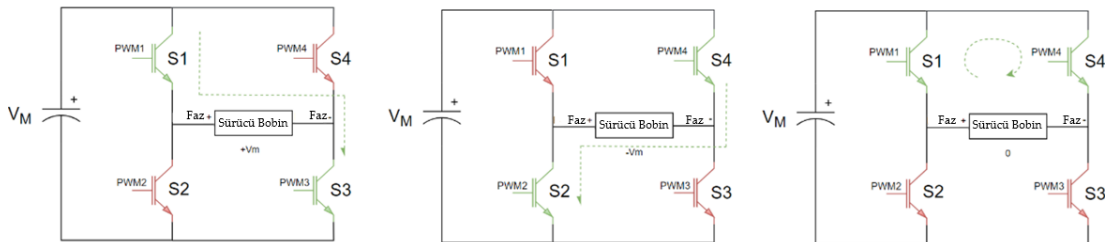
H-köprü topolojisindeki tek fazlı bir evirici **Şekil 3.2**'de gösterildiği gibi 4 adet IGBT anahtarlama elemanı ve giriş kondansatöründen meydana gelir [33].



Şekil 3.2: H-köprü evirici topolojisi.

IGBT anahtarlar aşağıdaki düzende anahtarlandığında akım sürücü bobinlerin üzerinde **Şekil 3.3**'teki gibi akmaktadır:

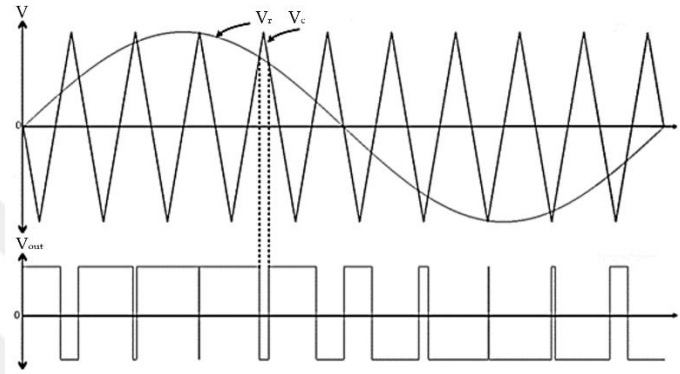
- IGBT-1 (S1) ve IGBT-3 (S3) iletimde, çıkış gerilimi: $+V_m$;
- IGBT-2 (S2) ve IGBT-4 (S4) iletimde, çıkış gerilimi: $-V_m$;
- IGBT 1 & IGBT 4 veya IGBT 2 & IGBT 3 iletimde, çıkış gerilimi: $0V$.



Şekil 3.3: H-köprü evirici çalışma durumları.

H-köprü evirici ile çıkış gerilimindeki temel bileşenin etkin değeri ve frekansı ayarlanabilir. Bu amaçla en çok kullanılan yöntemlerden bir tanesi sinüzoidal darbe

genişlik modülasyonudur (SPWM) [62]. Bu yöntemde çift kutuplu ve tek kutuplu anahtarlama mümkün olmakla birlikte; fırlatıcı sürücü bobinlerindeki endüktans değerleri küçük olduğundan, çok yüksek di/dt değerlerini kontrol etmek için fırlatıcıda çift kutuplu kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde referans (V_r) and taşıyıcı (V_c) sinyalleri karşılaştırılır ve çapraz IGBT anahtarları (S1-S3 veya S2-S4) aynı anda iletim veya kesimde bırakılır. Bu karşılaştırma işlemi FPGA algoritması tarafından gerçekleştirilir ve elde edilen sinyal **Şekil 3.4**'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4: SPWM ile karşılaştırma sonucunda elde edilen çıkış gerilimi.

İki kutuplu SPWM eviricide referans sinyalin tepe değerinin taşıyıcı sinyalin tepe değerine oranı modülasyon indeksi olarak tanımlanır ve m_a ile gösterilir. Modülasyon genliğinin (indeksinin) birden küçük veya eşit olduğu değerler doğrusal bölge olarak tanımlanır ve çıkışta elde edilen gerilimin tepe değeri modülasyon indeksi olarak tanımlanan değere yeniden oranlanır:

$$m_a = \frac{v_r}{v_c} \quad (3.1)$$

$$V = m_a * V_d \quad (m_a \leq 1.0) \quad (3.2)$$

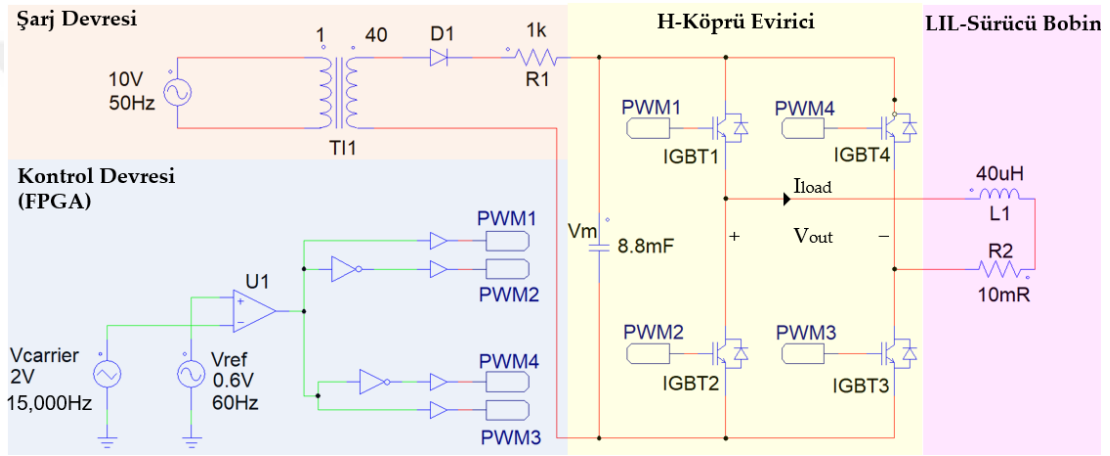
$$V_d < V_o < \frac{4}{\pi} V_d \quad (m_a \leq 1.0) \quad (3.3)$$

$$m_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (3.4)$$

Modülasyon indeksinin birden büyük olduğu değerler aşırı modülasyon bölgesi olarak tanımlanır ve artık bu bölgede çıkış gerilimi modülasyon indeksi ile doğrudan ilişkili değildir [63].

Bazı uygulamalarda frekans modülasyon indeksi (m_f) alt harmonikleri azaltmak için tek ve tam sayı olarak seçilir, böylece taşıyıcı ve referans sinyalleri senkronize olur. Yazılım tasarım zorlukları ve indüksiyon fırlatıcıda alt harmoniklerin sistemin verimliliği üzerinde çok fazla etkisi olmaması nedeniyle çift kutuplu SPWM kontrollü eviricide asenkron modülasyon uygulanacaktır.

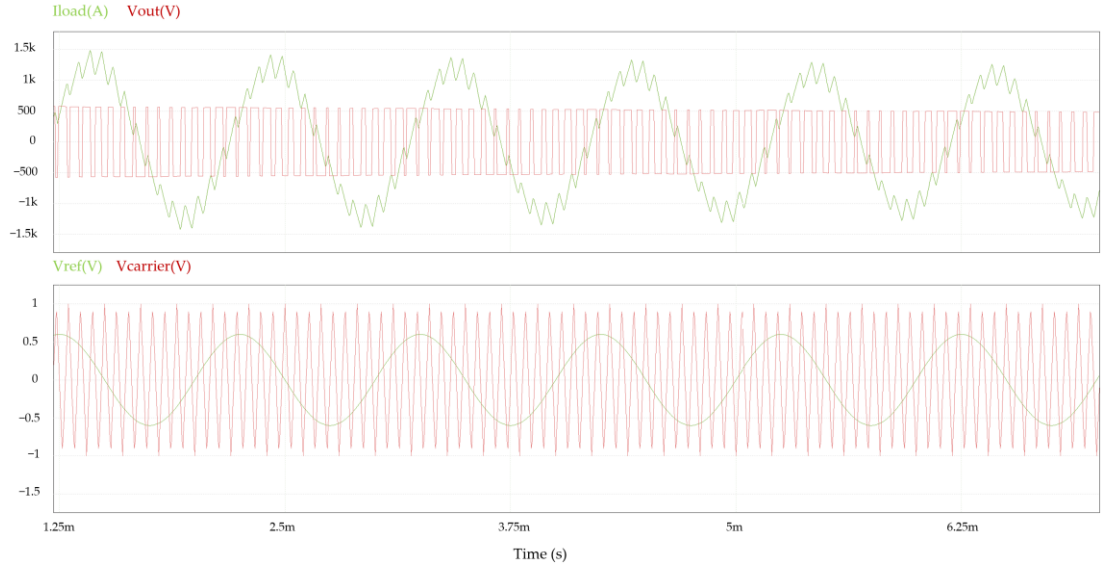
Tek bir evirici için elektriksel simülasyonlar ikinci bölümde elde edilen eşdeğer devre modeli ile gerçekleştirilmiştir. PSIM programında geçici rejim simülasyonları gerçekleştirilmiştir. H-köprü evirici, giriş kondansatör şarj devresi, kontrolcü ve sürücü bobinlerinden oluşan devre modeli **Şekil 3.5**'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Tek bir güç katı için oluşturulan simülasyon modeli.

Modülasyon indeksi 0.6 ve frekans oranı 15 seçilerek elde edilen çıkış akım ve gerilim dalga formları **Şekil 3.6**'da gösterilmiştir. Devre analizini basitleştirmek için eşdeğer devredeki karşılıklı endüktans ve kısa devre edilmiş alüminyum ihmal edilmiştir. Fırlatıcı bobinlerine uygulanacak olan akım ve frekans değerleri FPGA tarafından üretilerek V_{ref} ve $V_{carrier}$ sinyallerinin oluşturulması sağlanmıştır.

Fırlatıcı bobinindeki endüktans değeri düşük olduğundan uygulanan çift kutuplu SPWM akım dalga formunda dalgalanmalar görünmektedir. 15 kHz anahtarlama frekansı ile sinüzoidal referans sinyaline en yakın akım dalga formu elde edilmiştir. Bununla birlikte fırlatıcı geçici rejimde düşük bir süre çalıştığı için bu dalgalanmaların namlu hızına olan etkisi çok azdır.

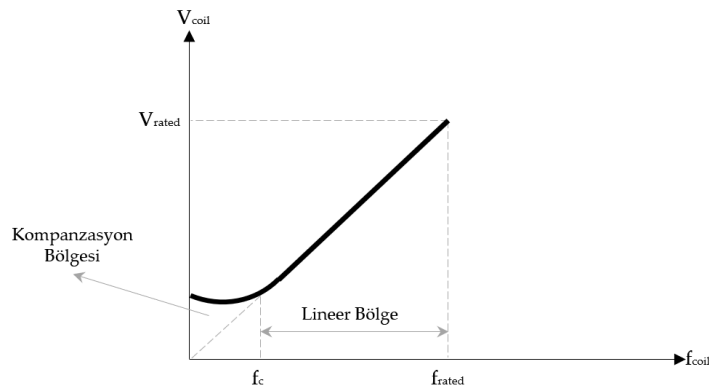


Şekil 3.6: Tek evirici akım ve gerilim simülasyon sonuçları.

Bu devre topolojisinde kondansatörleri şarj etmek için basit bir doğrultucu devresi kullanılarak fırlatıcılarda kullanılan karmaşık güç sistemlerine olan ihtiyaç da ortadan kaldırılmıştır.

3.2. Skaler V/f Kontrol

Fırlatıcıda sabit bir kuvvet ile merminin hızlanmasını sağlamak için namlu boyunca sabit bir akı elde etmek gerekmektedir. Bunun için önerilen güç sisteminde yazılım algoritmasına bağlı olarak her bir eviricinin çıkış gerilimi ve frekansı değiştirilebilmektedir. Bu yöntemle **Şekil 3.7**'de görüldüğü gibi lineer bölgede gerilim-frekans oranı sabit tutularak yumuşak bir kuvvet grafiği elde edilmesi amaçlanmaktadır.



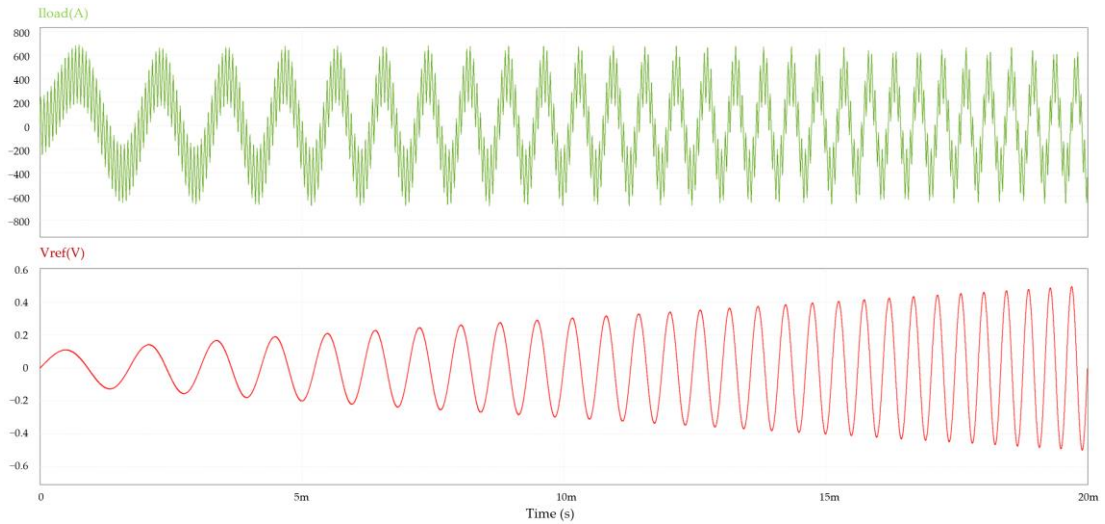
Şekil 3.7: Fırlatıcı V/f profili.

0-fc Hz frekans aralığında sürücü bobinlerindeki direnç değeri ihmal edilemeyecek büyüklükte gerilim düşümüne sebep olur ve bu bölge lineer olmayan bir karakteristik gösterir. Fırılaticının bu bölgede çalışması algoritma tarafından engellenmektedir. Fırılaticı için asıl çalışma bölgesi olan fc-frated Hz aralığında ise V/f oranı sabit tutularak lineer bir artış elde edilir. Bu da güç katındaki her bir evirici çıkışında gerilim ve frekans oranı sabit tutularak artırılmasıyla gerçekleştirilir. Böylelikle namlu boyunca sağlanan sabit akı ile kuvvet, denklem 2.35'te olduğu gibi kayma değerine bağlı olarak elde edilir.

Simölasyon ortamında sabit V/f oranı ile kontrol algoritması çalışması yapmak için denklem 3.5'te olduğu gibi referans değerinin zamana bağlı olarak değıştirilmesi sağlanmış ve buna göre sonuçlar gözlenmiştir. Burada k_1 ve k_2 parametrelerinin değeri fırlaticı karakteristiğine göre belirlenmekte olup 3B elektromanyetik analizler sonucunda belirlenmesi hedeflenmiştir.

$$v_{ref} = (V_{start} + k_1 t) \sin(2\pi(f_{start} + k_2 t)t + phasedelay) \quad (3.5)$$

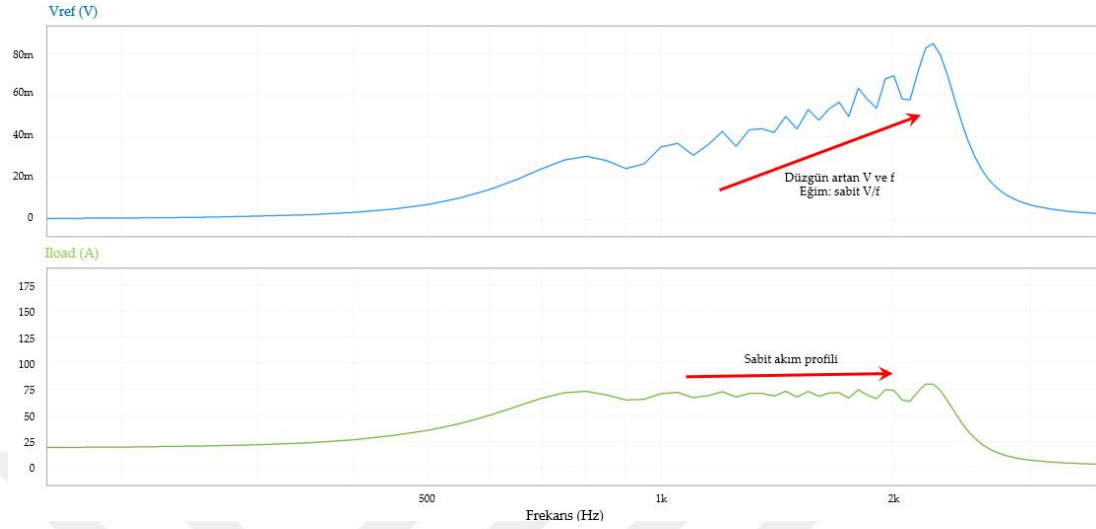
Fırılaticıda namlu boyunca elde edilmesi hedeflenen tek bir faz için (örn. A fazı) yapılan simölasyon sonuçları Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: V/f kontrol ile açık çevrim çıkış gerilim, akım ve frekans kontrolü.

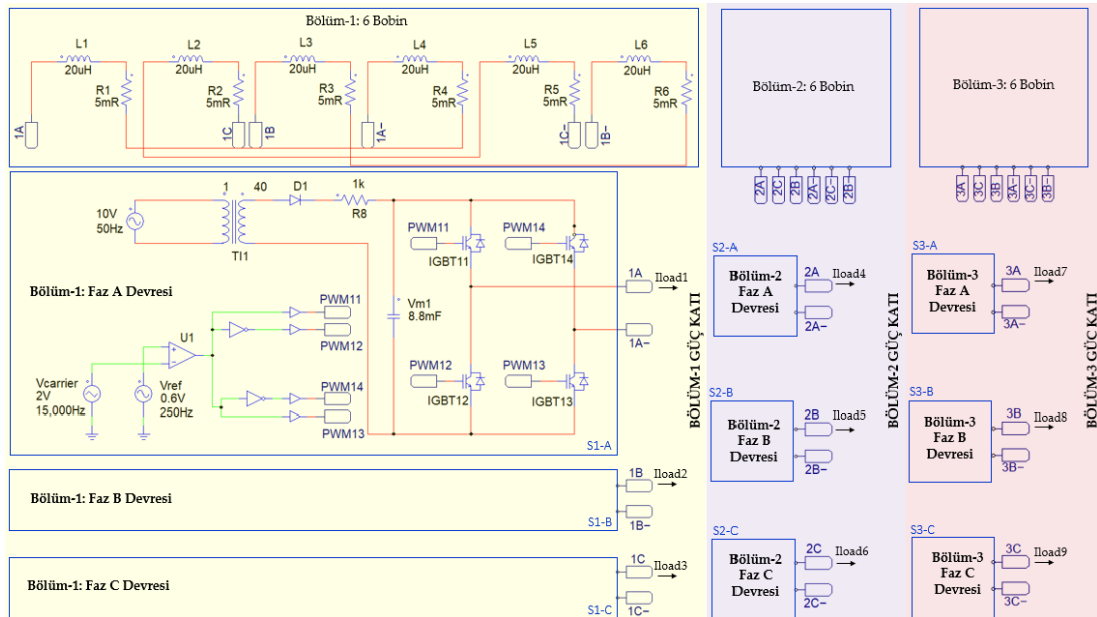
Çıkış gerilim sinyalinin Hızlı Fourier Dönüşümü yapıldığında istenilen çalışma frekans aralığında sabit V/f oranının elde edildiği görölmektedir. Aynı şekilde akım sinyalinin dönüşümü ile de namlu boyunca artan frekansta bununla birlikte sabit

genlikle bir akım grafiği elde edilmiştir. Böylelikle bir fazdan elde edilecek olan akı namlu boyunca sabit kalarak merminin hızlanması sağlanacaktır.

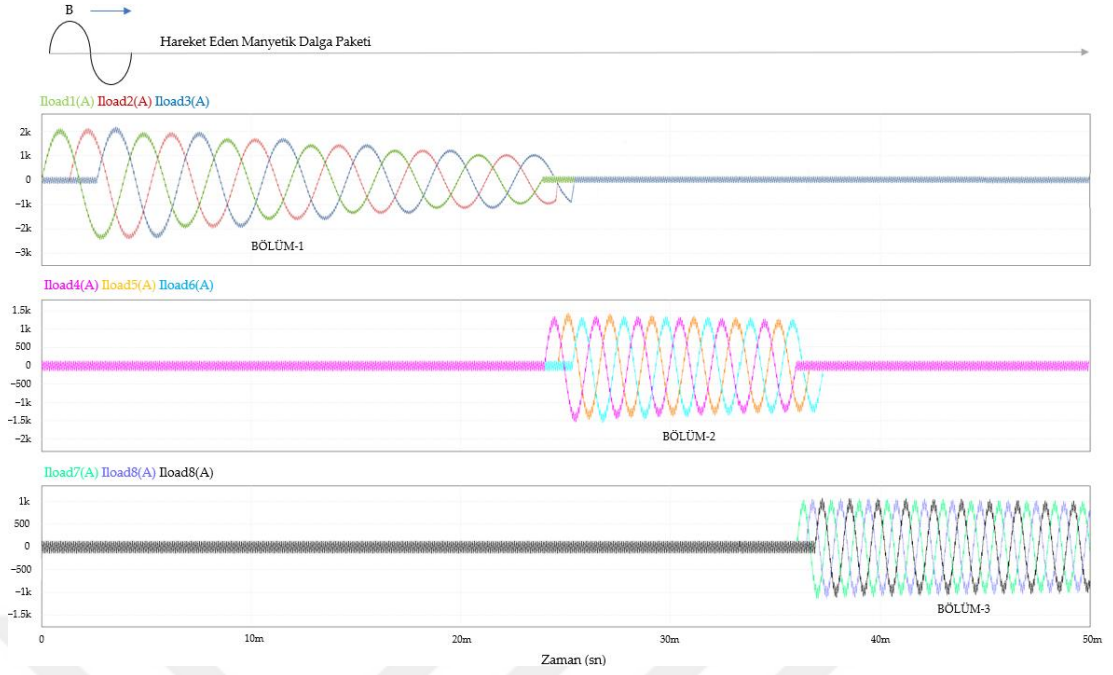


Şekil 3.9: Evirici akım ve gerilim sinyalleri için hızlı Fourier dönüşümü.

Önerilen sistemde V/f kontrolü namlu boyunca sağlayabilmek için her bölümde 3 adet olmak üzere toplamda 9 adet H-köprü evirici kullanılmaktadır. Merminin konumuna göre her bölüm enerjilendirilerek ve bölüm geçişlerinde akımların aynı fazda olması sağlanarak yüksek verimli bir güç katı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem şeması **Şekil 3.10**'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10: 9 Bölümden oluşan sistem blok diyagramı.



Şekil 3.11: Her bölüme ve ilgili faza ait akım simülasyon sonuçları.

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi önce bölüm 1’deki A, B ve C fazları enerjilendirilmektedir. Mermi bölüm 1’i tamamen terk ettiğinde bölüm 1 eviricileri kapatılır ve bölüm 2 sürücü bobinleri enerjilendirilir. Mermi bölüm 2’yi tamamen terk ettiğinde ise bölüm 2 eviricileri kapatılır ve bölüm 3 enerjilendirilmektedir. Mermi namlu ağzından çıktığı andan kısa bir süre sonra ise bölüm 3’ün enerjisi kesilir. Burada ilgili bölüm ve faz enerjilendirme sıralaması FPGA kontrol ünitesi tarafından kontrol edilir.

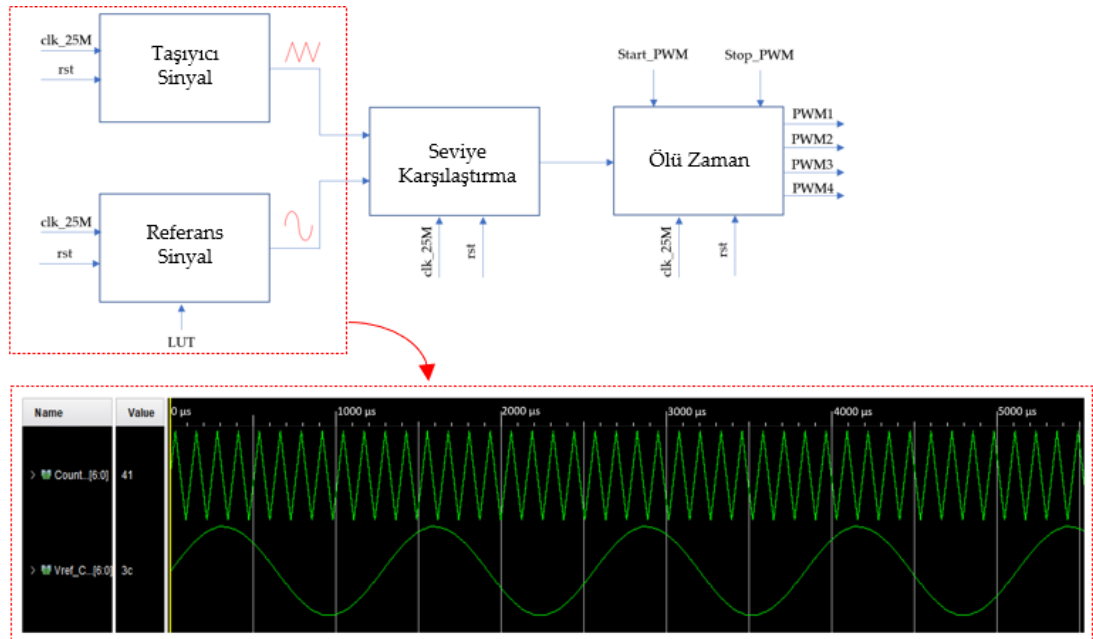
Bu akım grafikleri incelendiğinde bir bölüme enerji verilirken diğer bölümlerin enerjisiz kaldığı görülmektedir. T süresi boyunca bir bölümde tüketilen güç P olarak gösterildiğinde, tüm fırlatıcı için toplam enerji tüketimi yaklaşık $3 \times P \times T$ ’dir. Mermi hareket halindeyken merminin olmadığı bölümlere enerji verilirse (örneğin, bölüm 1’den geçerken bölüm 3, bölüm 2’den geçerken bölüm 1 ve bölüm 3’ten geçerken bölüm 1 ve bölüm 2), enerji tüketimi $7 \times P \times T$ olacaktır. Bu nedenle, önerilen sistem, tüm sisteme enerji veren fırlatıcılardan %57,1 daha az enerji tüketmektedir.

3.3. FPGA Kontrol Ünitesi

Fırlatıcı kontrol algoritması ve kullanıcı arayüzü ile haberleşme gibi fonksiyonlar Xilinx Spartan 3 serisi FPGA üzerinde uygulanmıştır. FPGA kontrolcüsünün en temel fonksiyonu H-köprü eviriciler için sinüzoidal PWM sinyallerinin üretilmesi ve bu sinyallerin eviricilere istenilen faz farkı ve sırada uygulanmasını sağlamaktır.

Eviricilerin kontrolü birbirinden bağımsız ve paralel olarak yapıldığı için modüller ve hiyerarşik bir tasarım metodolojisi izlenmiştir. Gerekli üst düzey modüller tasarlanmış ve ardından VHDL dili kullanılarak kodlanmıştır. Tasarım uygulama adımlarından (translate, map ve place&route) ve gerçek bir deney ortamında test edilmeden önce tasarım doğrulaması ISIM/Modelsim test ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.12’de sinüzoidal PWM sinyalini üreten modüllerin blok diyagramı gösterilmiştir. İlk olarak referans ve taşıyıcı sinyaller üretilmiş ve daha sonra karşılaştırma bloğunda seviye kararı verilmiştir. FPGA üzerinde sinüzoidal bir referans üretme zorlu bir işlem olduğundan veri tabloları kullanılmıştır. 50 kHz örnekleme hızında üretilen sinüzoidal sinyaller ile minimum bozulma ve harmonik oluşumu elde edilmiştir. Taşıyıcı sinyalleri üretilirken ise 25 MHz’lik bir sayıcı birimi kullanılmıştır.



Şekil 3.12: FPGA-SPWM üretim modülü ve test ortamı sonuçları.

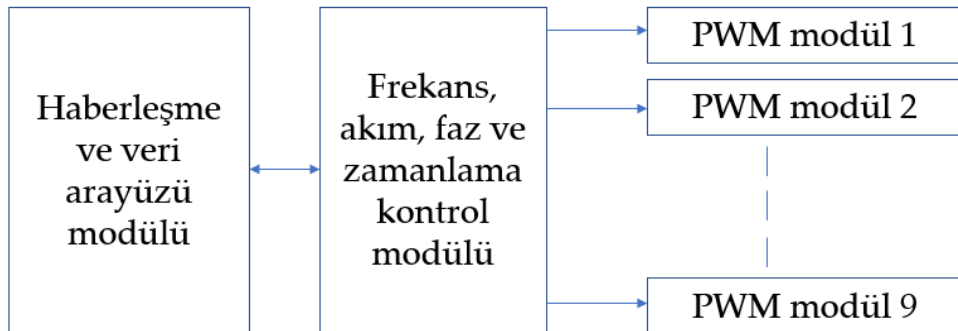
Karşılaştırma sonucunda çift kutuplu PWM sinyalinin seviyesine karar verilip direkt olarak IGBT anahtarlarına giden PWM sinyalleri üretilmemiştir. Birbirine seri olarak bağlı S1-S2 veya S3-S4 anahtarlarının aynı anda ilettime geçmesini önlemek için PWM sinyalleri arasına ölü zaman konulmuştur. Ölü zaman bölgesinde tüm anahtarlar kesim durumundadır. Ölü zamanın seçimi IGBT anahtarların özelliklerine göre ve uygulamadaki anahtarlama frekansına göre belirlenmektedir. Ölü zaman süresi mümkün olduğunca kısa olmalı, öte yandan elektriksel gürültülerden dolayı anahtarların aynı anda ilettime geçmesini önlemelidir. İdeal ölü zaman seçimi için IGBT elemanına ait gecikme değişkenlerinin minimum ve maksimum değerleri göz önünde bulundurulmalıdır:

$$t_{dead} = [(t_{d_off_max} - t_{d_on_min}) + (t_{pdd_max} - t_{pdd_min}) \times 1.2] \quad (3.6)$$

burada t_d gecikme zamanı, t_{pdd} IGBT sürücünün yayılım gecikmesi ve 1.2 güvenlik marjıdır.

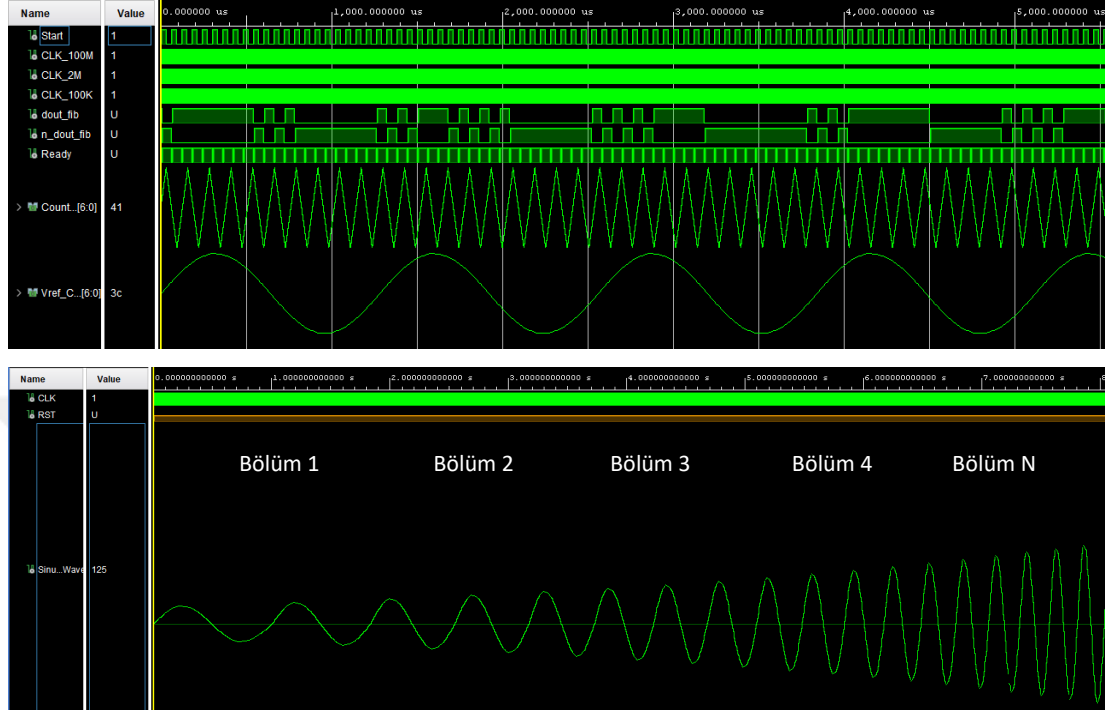
Fırılaticı bobinlerini enerjilendirmek için kullanılan 9 adet eviricinin kontrolü FPGA'daki üst modül birimi tarafından gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.13'te gösterilen üst modül birimi,

- Kullanıcı arayüzü haberleşmesi
- Frekans, akım, zamanlama ve faz farkı kontrolü
- PWM modüllerin başlama, bitiş ve sıfırlama kontrolünün yapılmasından sorumludur.



Şekil 3.13: FPGA üst modül birimi.

FPGA üzerinde gerçeklenen sinüzoidal PWM için test ortamında yapılan simülasyon sonuçları ise Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14: FPGA üzerinde uygulanan V/f kontrol paterni simülasyon sonucu.

4. 3B SONLU ELEMAN ANALİZİ

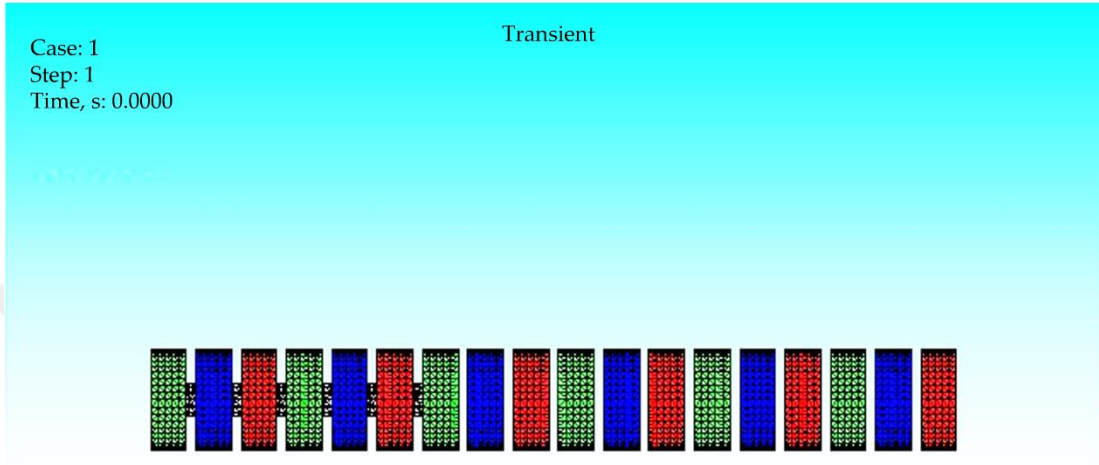
Elektromanyetik fırlatıcıların tüm güç sistemi ve sürücü bobinleri ile geçici zamanda analitik çözümleri oldukça zordur. Bu nedenle tasarlanan güç sisteminin gerçek fırlatıcı modeli ile simülasyonları üzerinden algoritmik çıkarımlar elde etmek optimum yöntem olarak belirlenmiştir. Bunun için JMAG programı üzerinde 3B sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elektromanyetik (EM) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda özellikle genlik, frekans ve faz geçişleri gözlenmiş, V/f karakteristikleri ortaya konulmuştur. Fırlatıcı ve mermi özelliklerine göre eviricilerle uygulanması hedeflenen özellikler optimize edilmiştir. Fırlatıcı boyunca elde edilen kuvvet grafikleri ile merminin konumunu takip etmeksizin en uygun kayma miktarının belirlenmesi de böylelikle mümkün olmaktadır. Gerçek deney ortamında uygulanması gereken FPGA algoritmasına girdiler, elde edilen bu bilgilerle sağlanmaktadır.

Lineer indüksiyon fırlatıcı için hedeflenen fiziksel özellikler **Tablo 4.1**'de verilmiştir. Burada fırlatıcı 3 bölüm ve her bir bölümde 6 sürücü bobini olacak şekilde toplamda 18 bobinden oluşmaktadır. Eviriciler ise her bir bölümdeki 2 adet bobini enerjilendirmektedir. Simülasyon sonuçlarının gerçek deney ortamındaki sonuçlar ile yakın olması amacıyla tüm fiziksel özellikler 3B simülasyon ortamında modellenmiştir.

Tablo 4.1: Hedeflenen lineer indüksiyon fırlatıcının fiziksel özellikleri.

	Parametreler	Değer
Namlu	Namlu Uzunluğu	0.75 m
	Bobin Sayısı	18
	Faz Sayısı	3
	Bölüm Sayısı	3
	Bobin Eksenel Uzunluğu	0.04 m
	Bobin İç Radyal Genişliği	0.04 m
	Bobin Dış Radyal Genişliği	0.09 m
	Bobin Endüktansı	20 uH
	Bobin Sarım Sayısı	2×10
	Uzunluk	0.24 m
Mermi	İç Radyal Genişlik	0.0038 m
	Dış Radyal Genişlik	0.0039 m
	Malzeme	Alüminyum

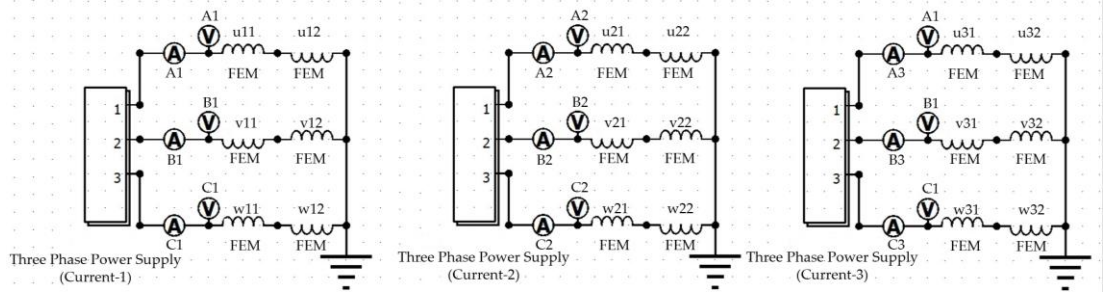
Modellenen lineer indüksiyon fırlatıcıda merminin belirli bir konumda maruz kaldığı itme kuvvetini bulabilmek için geçici rejimde manyetik alan analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ise gerekli ağ yapısı, malzeme özellikleri ve analiz sınır koşullarından oluşmaktadır [64]. Oluşturulan model **Şekil 4.1**'de gösterilmektedir. (Yeşil bobinler: A-fazı; Mavi bobinler: C-fazı; Kırmızı bobinler: B-fazı)



Şekil 4.1: 3 boyutlu fırlatıcı ağ yapısı modeli.

Bu çalışmadaki ağ yapısı modelinde hava bölgesinin boyutu fırlatıcının en uzun kenarından 1,05 kat daha büyük olacak şekilde ayarlanmıştır. Manyetik analize dahil edilen merminin hareketi esnasında ağ yapısındaki hareketli ve sabit bölümler arasında tutarlı bir ilişki kurmak önemlidir. Bununla birlikte her hareket adımı sonrasında bu tutarlılığı sağlamak oldukça zordur. Bu yüzden ağ yapısı analiz süreci boyunca yinelemeli olarak üretilmiştir. Ayrıca, manyeto motor kuvvetin zamana bağlı olarak değişen doğası ve merminin eksenel hareketi esnasında olan değişimler sebebiyle geçici rejim tepkisi üzerine analizler gerçekleştirilmiştir. Burada gerçeğe en yakın sonuç elde edilmesini sağlayacak olan 3 boyutlu model analizi için de yine 3 boyutlu geçici rejim tepkisi kullanılmıştır.

3B model ile analizde en kritik noktalardan bir tanesi de bobinlere uygulanan akım ve gerilim dalga formlarının harici devreler kullanılarak üretilmesidir. Böylelikle simülasyon ortamında elde edilen akım dalga formları ile deney ortamındaki FPGA algoritması arasında ilişki kurulabilmektedir. İlgili devre şemaları **Şekil 4.2**'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Simülasyon ortamında kullanılan harici güç kaynakları.

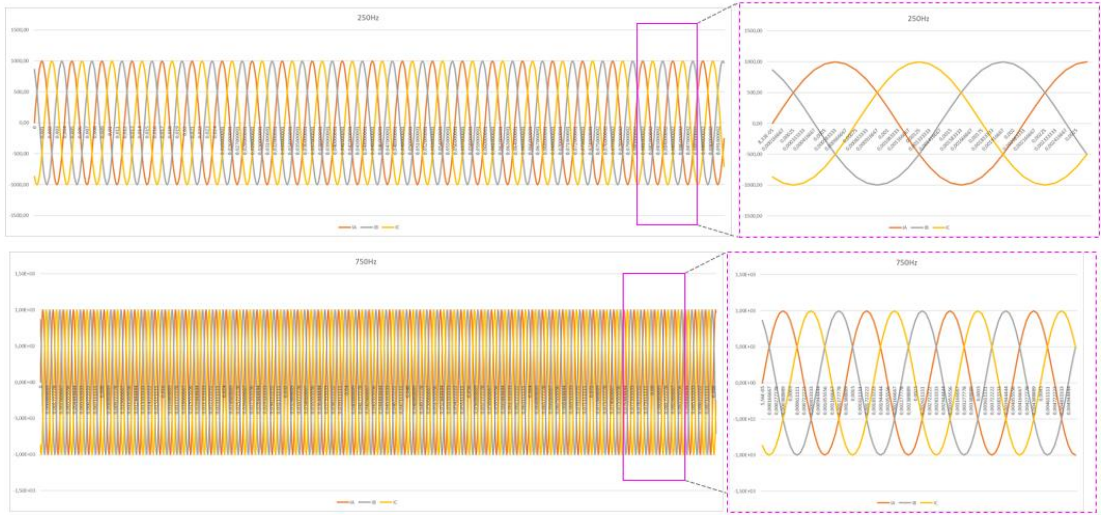
Simülasyon çalışmaları için öncelikle senaryolar belirlenmiş ve farklı akım, frekans, gerilim gibi parametre değişimlerine karşılık elde edilen kuvvet, kayma ve hız grafiklerine olan etkisi incelenmiştir. Bu şekilde fırlatıcıya deneysel ortamda uygulanacak parametreler optimize edilerek en verimli fırlatıcı güç sistemi tasarımı hedeflenmektedir. Bunun için öncelikle farklı çalışma koşullarında fırlatıcı üzerindeki parametreler gözlenmiş ve yorumlanmıştır.

4.1. Tüm Bölümler Aynı Anda Enerjili İken Sabit Frekans Koşullarında Simülasyonlar

Fırlatıcıya uygulanan frekansların çıkış parametrelerine olan etkisini gözlemleyebilmek için öncelikle sabit frekanslarda akımlar uygulamak en doğru başlangıç noktası olacaktır. Bu senaryolarda fırlatıcının 3 bölümüne de Şekil 4.3'te görüldüğü gibi 250 Hz ve 750 Hz sabit frekanslarda akımlar uygulanarak kuvvet, hız ve kayma üzerindeki etkileri incelenmiştir.

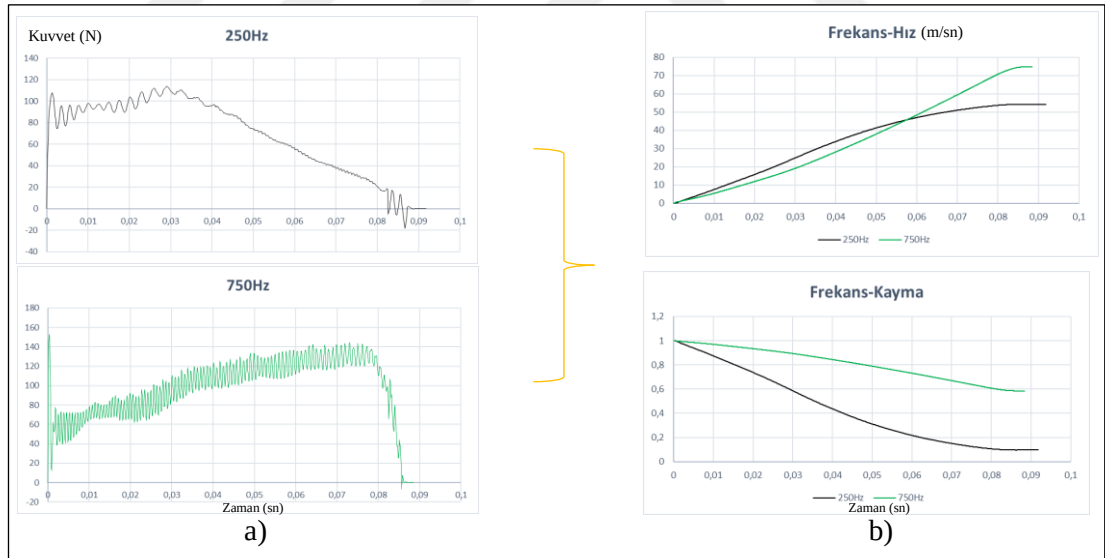
Tablo 4.2: Tüm bölümler enerjili iken sabit frekans senaryoları.

Senaryo	Çalışma Koşulları
Senaryo 1.1	Bölüm-1, 2, 3: 250 Hz, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A
Senaryo 1.2	Bölüm-1, 2, 3: 750 Hz, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A



Şekil 4.3: Fırlatıcı bobinlerine uygulanan 250 Hz ve 750 Hz frekanslarda akımlar.

Şekil 4.4'teki simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde Senaryo 1.1 içerisinde faz akımları 1000 A değerinde sabit tutulmuş ve frekans 250 Hz değerinde iken kuvvet, hız ve kayma parametreleri incelenmiştir.



Şekil 4.4: Aynı anda enerjilendirme sabit frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri b) Hız ve kayma grafikleri.

250 Hz senaryoda merminin ilk hareketi ile birlikte maksimum 105 Nm bir kuvvet uygulanmaktadır. 30 ms boyunca ortalama 100 Nm'lik bir kuvvet uygulanmakta ve sonrasında uygulanan kuvvet azalmaya başlamaktadır. Namlu boyunca kuvvet grafiği sabit bir kuvvet uygulanmasını sağlayamamıştır. Mermi namlu ağzından çıktığında ise

yaklaşık 53 m/sn'lik bir hıza ulaşabilmektedir. Mermi fırlatıcı sonlarında sıfıra yakın bir kayma değerine ulaşarak senkron hızı takip etmiştir. Fırlatıcının sonlarında ise uç etkisinden kaynaklanan negatif kuvvetler oluşmuş ve hızın daha fazla artmasına engel olmuştur.

Senaryo 1.2 içerisinde faz akımları 1000 A tepe değerinde sabit tutulmuş ve frekans 750 Hz değerinde iken kuvvet, hız ve kayma parametreleri incelenmiştir.

Fırlatıcı başlatıldığında 150 Nm bir kuvvet ile aşırı bir salınım yaparak kuvvetin düştüğü ve sonrasında tekrar artarak 140 Nm değerlerine geldiği görülmüştür. Bu frekans değerinde sabit bir kuvvet bölgesinin olmayışı istenen bir durum değildir. Namlu ağzında 75 m/sn'lik bir hıza ulaşan mermide uç etkilerin yok denecek kadar az görüldüğü ve negatif kuvvetlerin oluşmadığı gözlenmektedir.

Namlu ağzında 75 m/sn'lik bir hıza ulaşan mermide uç etkilerin yok denecek kadar az görüldüğü ve negatif kuvvetlerin oluşmadığı gözlenmektedir.

Senaryo 1.1 ve senaryo 1.2 hız grafikleri karşılaştırıldığında 750 Hz frekans değerinde daha yüksek hız elde edilmesine karşın 56 ms boyunca 250 Hz frekans uygulanan senaryoda hızın daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da fırlatıcıda ilk başta 250 Hz frekans sonrasında 750 Hz uygulanması durumunda daha yüksek hızlara ulaşabileceğini göstermektedir. Ayrıca bu durumda merminin ilk hareketinde yüksek ani kuvvetlerin oluşması engellenerek daha yumuşak bir başlangıca sahip kuvvet grafiği elde edilebilecektir.

4.2. Tüm Bölümler Sırayla Enerjili İken Sabit Frekans Koşullarında Simülasyonlar

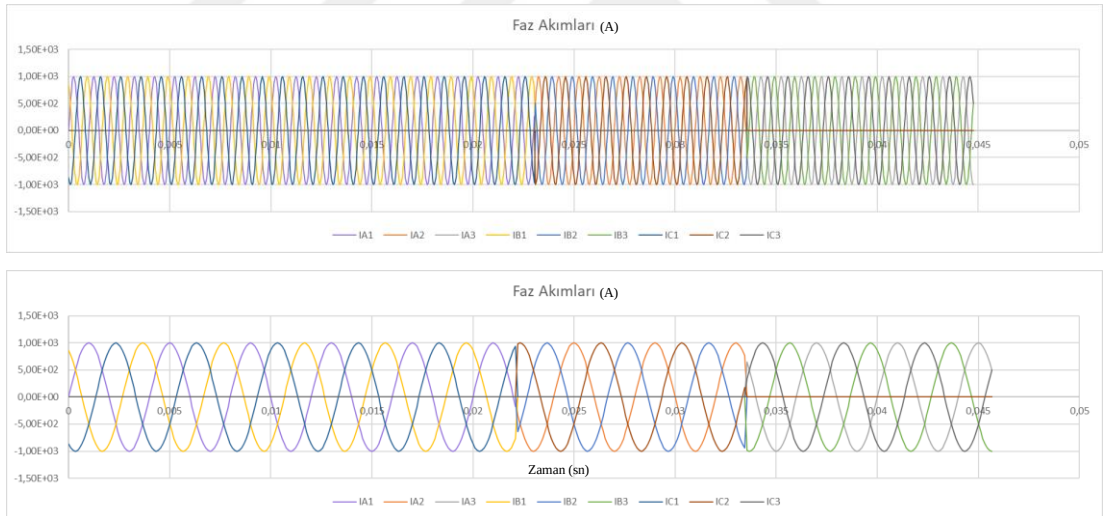
Fırlatıcının olmadığı bölümlerin enerjilendirilmesi sistemde kayıplara sebep olmaktadır. Bu yüzden önerilen güç sisteminde bölümleri sırayla enerjilendirmenin çıkış kuvvetine ve hıza olan etkilerini gözlemlemek için sabit frekans koşullarında bölümler sırayla enerjilendirilmiş aynı anda sadece bir bölüm mermiye kuvvet uygulamıştır. **Tablo 4.3**'te gösterilen bu senaryolarda sinüzoidal akımın tepe değeri önceki senaryolarla karşılaştırma yapabilmek adına yine 1000 A olarak seçilmiştir.

Her bir bölüm içerisinde 3 fazlı ve aralarında 120 derece faz farkı olan akım dalga formları ise **Şekil 4.5**'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Tüm bölümler sırayla enerjili iken sabit frekans senaryoları.

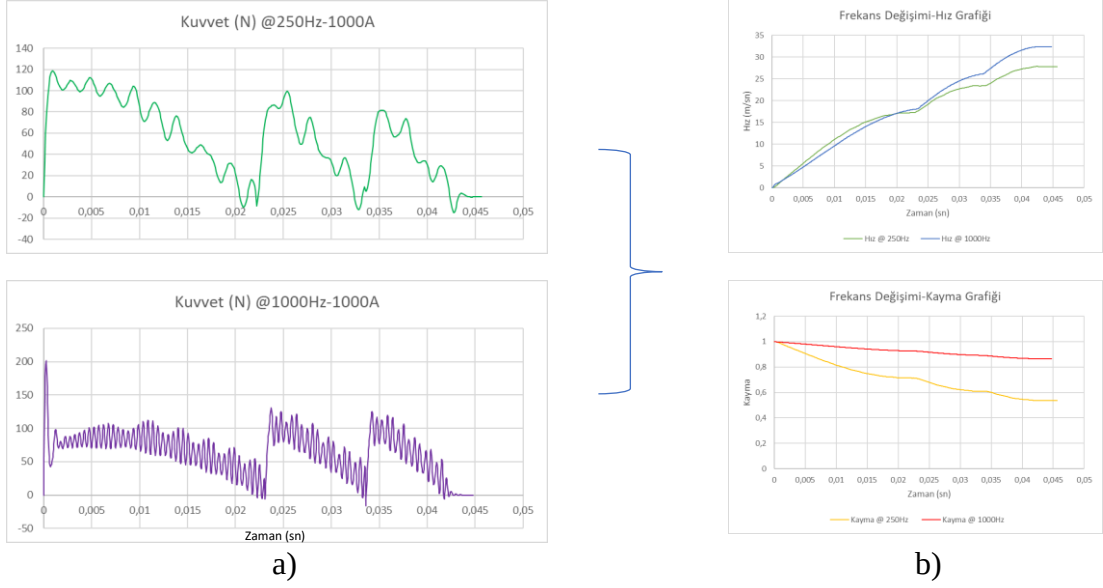
Senaryo	Çalışma Koşulları
Senaryo 2.1	Bölüm-1, 2, 3: 250 Hz, Faz A, B, C (sırayla) Akım (Maks): 1000 A
Senaryo 2.2	Bölüm-1, 2, 3: 1000 Hz, Faz A, B, C (sırayla) Akım (Maks): 1000 A

Bu grafiklerden de görüleceği üzere mermi bölüm 1 içerisinde iken sürücü bobinlere IA1, IB1 ve IC1 akımları uygulanmaktadır. Mermi bölüm 1'den çıkıp bölüm 2'ye girdiğinde ise bölüm 2 içerisinde iken sürücü bobinlere IA2, IB2 ve IC2 akımları uygulanmaktadır. Benzer şekilde bölüm 2'den çıkıp bölüm 3'e girdiğinde ise bölüm 3 içerisinde iken sürücü bobinlere IA3, IB3 ve IC3 akımları uygulanmakta ve mermi bölüm 3'ten çıktığı anda bölüm 3 bobinlerinin de enerjilendirilmesi kesilmektedir.



Şekil 4.5: Sırayla enerjilendirme durumunda 250 Hz ve 1000 Hz akım grafikleri.

Bu akımlar ile enerjilendirilen fırlatıcı simülasyonlarında elde edilen sonuçlar **Şekil 4.6'**da gösterilmiştir. Senaryo 2.1'de 250 Hz ile enerjilendirilen bobinler mermiye 120 N değerinde bir başlangıç kuvveti uygulamaktadır. Sonrasında ise mermi ilgili bölümde hareket ettikçe uygulanan kuvvet sıfıra düşmekte hatta negatif kuvvetler oluşmasına sebep olmaktadır. Yüksek kayma miktarı ile elde edilen maksimum namlu çıkış hızı ise 28 m/sn olmuştur.



Şekil 4.6: Sırayla enerjilendirme sabit frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri b) Hız ve kayma grafikleri.

Senaryo 2.2’de 1000 Hz uygulanan mermiye etki eden başlangıç kuvveti 200 N olmuş ve ani bir yükselişten sonra ortalama 80 N değerinde yüksek bir kuvvet dalgalanmasına sahip grafik elde edilmiştir. Bölüm geçişlerinde negatif kuvvetler oluşmamış bu da yüksek mermi hızının elde edilmesine fayda sağlamıştır.

Senaryo 2.1 ve 2.2 karşılaştırıldığında 32.5 m/sn’lik namlu çıkış hızıyla 750 Hz değerinin daha efektif olduğu görülmektedir. Ancak bir önceki bölümde de tespit edildiği üzere 250 Hz ile enerjilendirilen fırlatıcıda başlangıç kuvveti ve hızı daha yüksek olmaktadır. Bu da ilk bölümlerin optimum kayma miktarı ile düşük hızla sonraki bölümlerin ise yüksek senkron hızda sürülmesi gerektiğini göstermektedir.

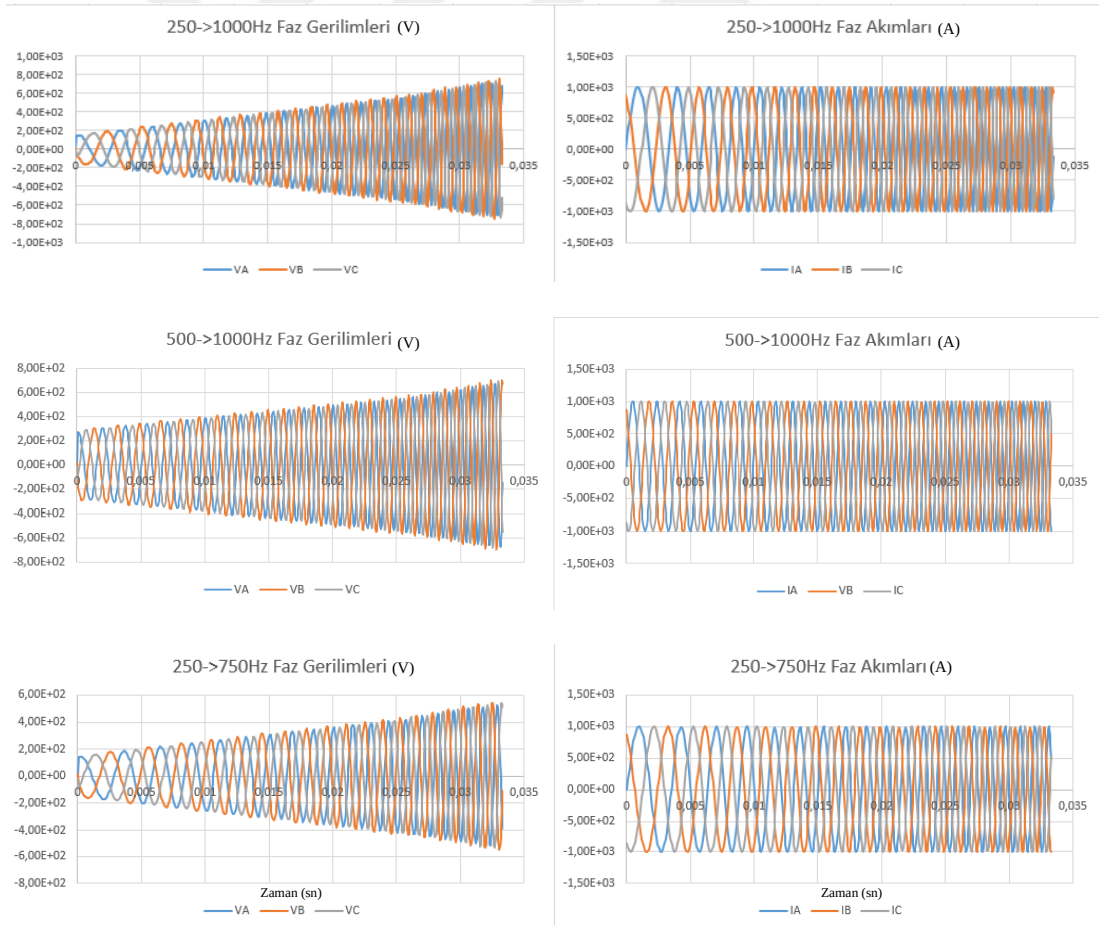
4.3. Tüm Bölümler Aynı Anda Enerjili İken Düzgün Artan Frekans Koşullarında Simülasyonlar

Frekansın fırlatıcıda elde edilen kuvvete olan etkisini gözlemlemek amacıyla bir önceki bölümde sabit frekansta uygulanan akımlar bu bölümde namlu boyunca artırılmaktadır. Bu da frekansla birlikte artan bir gerilimle sağlanmakta ve V/f oranı sabit tutulmaktadır. Bu simülasyonlar için içeren senaryolar **Tablo 4.4**’teki gibi belirlenmiştir.

Tablo 4.4: Tüm bölümler enerjili iken artan frekans senaryoları.

Senaryo	Çalışma Koşulları
Senaryo 3.1	Bölüm-1, 2, 3: 250 Hz'den 1000 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000A
Senaryo 3.2	Bölüm-1, 2, 3: 500 Hz'den 1000 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A
Senaryo 3.3	Bölüm-1, 2, 3: 250 Hz'den 750 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000A

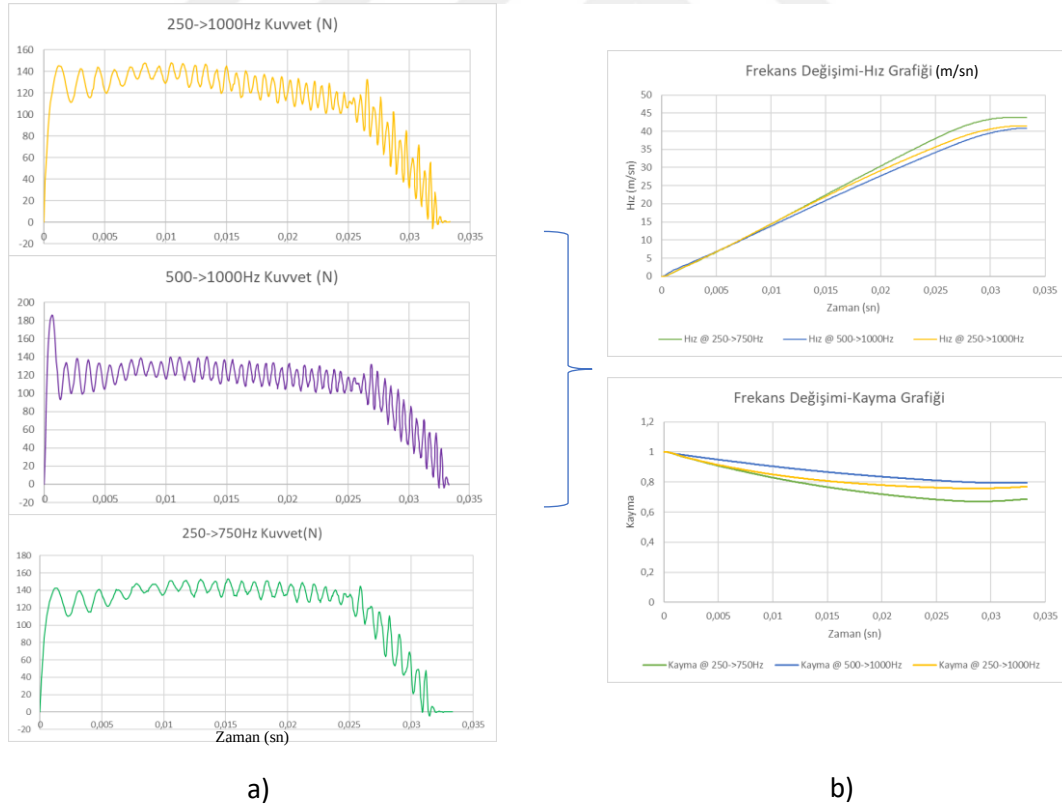
Senaryo 3.1, 3.2 ve 3.3 arasında frekans artışının elde edilen kuvvet ve hıza olan etkisi incelenirken senaryo 2.3, 2.4 ve 2.5 arasında aynı frekans artış oranlarında akımların kuvvet ve hıza olan etkisi gözlenmiştir.



Şekil 4.7: Aynı anda enerjili ilen sabit V/f uygulanan fırlatıcı akım ve gerilim grafikleri.

Senaryo 2.1, 2.2 ve 2.3 için uygulanan artan rejimde gerilim ve namlu boyunca sabit akım grafikleri **Şekil 4.7**'de gösterilmiştir. Burada fırlatıcı boyunca frekans artışının kuvvet ve hıza olan etkisini inceleyebilmek için başlangıç frekansı ve frekans artış hızları değiştirilerek ilgili parametreler gözlenmiştir. Bunun için başlangıç frekansları 250 Hz ve 500 Hz olarak belirlenmiştir. Frekans artış miktarı ise 500 Hz ve 750 Hz seçilerek frekans artışının çıkış parametrelerine etkisi incelenmiştir.

Şekil 4.8'de kuvvet grafikleri incelendiğinde Senaryo 2.2'de 500 Hz ile başlayıp namlu boyunca düzgün artışla 1000 Hz frekans değerine gelen Senaryo 2.2'de ilk başlangıçta çok yüksek ani bir artış gözlenmiş ve sonrasında ortalama 120 N değerinde 30 N bir salınımla kuvvet elde edilmiştir. 250 Hz ile başlayıp yüksek frekans artış hızı ile 1000 Hz'e ulaşan Senaryo 2.1'de ise ani artışlar gözlenmemiş olup ortalama 130 N değerinde 30 N bir salınımla kuvvet elde edilmiştir. 250 Hz ile başlayıp daha düşük frekans artış hızı ile 750 Hz'e ulaşan Senaryo 2.3'de ise ani artışlar gözlenmemiş olup ortalama 140 N değerinde 20 N bir salınımla kuvvet elde edilmiştir.



Şekil 4.8: Aynı anda enerjilendirme artan frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri b) Hız ve kayma grafikleri.

Şekil 4.8'de elde edilen hız grafiğine bakıldığında en yüksek hıza senaryo 2.3 ile ulaşılmıştır. Diğer iki senaryoda frekans ve frekans artış hızı daha yüksek olmasına rağmen daha düşük verimli fırlatma gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebinin ise grafikten de görüldüğü üzere kayma olduğu ve ilk başlarda yüksek kayma ile verimsiz bir itme kuvveti oluşturduğu görülmektedir. Fırlatıcıya uygulanan senkron hızın mermi hızı ile uyumlu olması ve merminin senkron hızdan çok uzaklaşmaması gerekmektedir. Burada en optimum senaryonun 250 Hz ile başlayan ve mermi namludan çıkarken 750 Hz'e ulaşan akım senaryosu olduğu anlaşılmaktadır.

4.4. Tüm Bölümler Sırayla Enerjilendirilirken Ayırık Artan Frekans Koşullarında Simülasyonlar

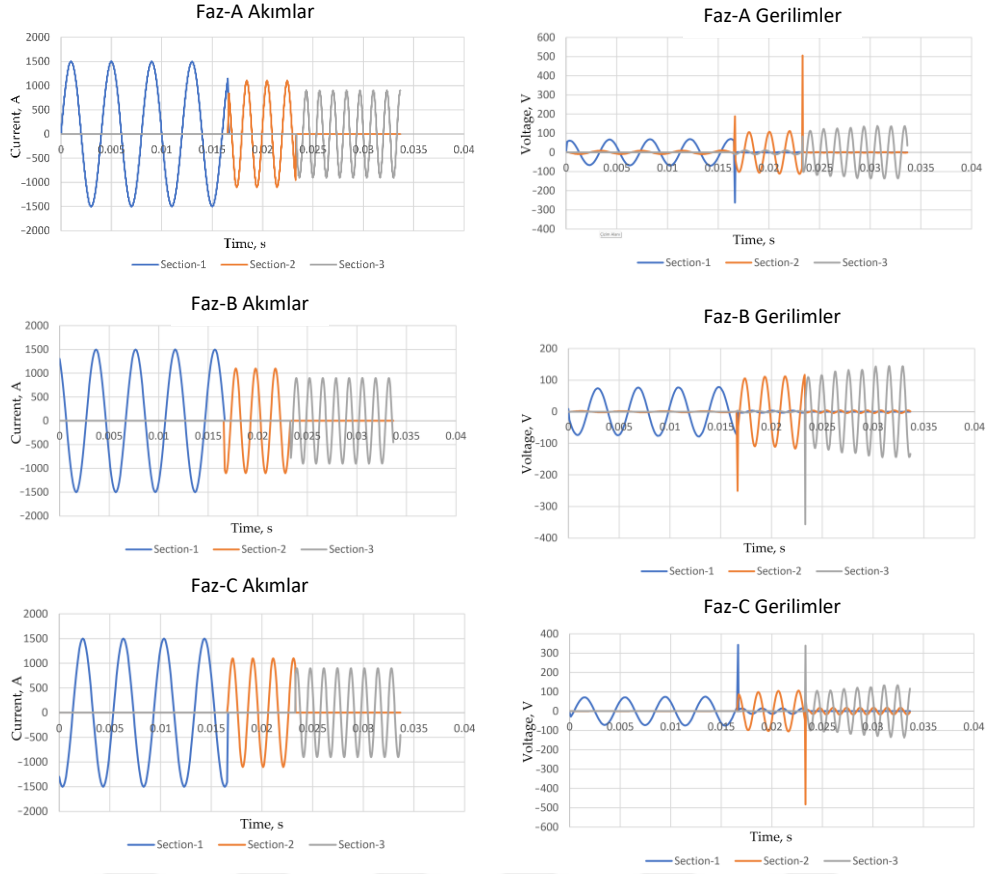
Önerilen güç sistemi modelinde fırlatıcıdaki tüm bölümleri ayrı ayrı enerjilendirerek merminin olmadığı bölümlerin enerjilendirilmesinin önüne geçilmesi ve dolayısıyla verimin artırılması hedeflenmektedir. Bu senaryoda fırlatıcıdaki her bölüm için farklı frekans değerleri belirlenmiş ve sonuçları gözlenmiştir. Ancak bölümlerin frekansı kendi içerisinde arttırılmamış ve sabit tutulmuştur.

Bu simülasyonlar için **Tablo 4.5'**teki senaryo kurgulanmış ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.5: Tüm bölümler sırayla enerjili iken ayırık artan frekans senaryoları.

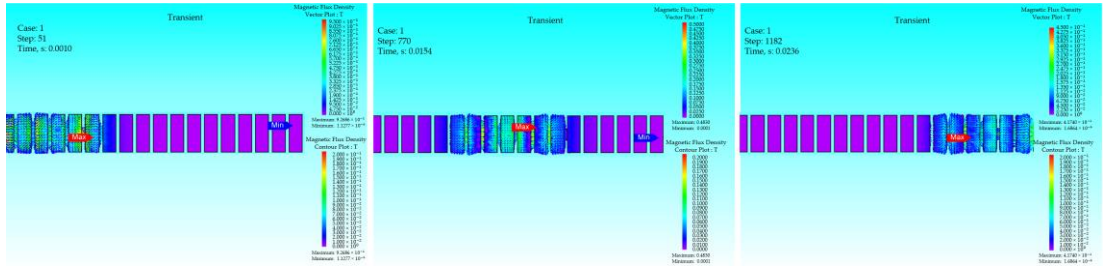
Senaryo	Çalışma Koşulları
Senaryo 4.1	Bölüm-1: 250 Hz, Bölüm-2: 500 Hz, Bölüm-3: 750 Hz Faz A, B, C Akım (Maks): 1000A

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi bu simülasyon koşullarında fırlatıcıdaki frekanslar ayırık olarak artmaktadır. Bölüm-1'de 250Hz, Bölüm-2'de 500Hz ve Bölüm-3'te ise 750Hz sabit frekans değerlerine sahip akımlar uygulanmaktadır. V/f oranı ise bölüm bölüm sabit tutulmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.9: 3 bölüm için uygulanan harici akım ve gerilim dalga formları.

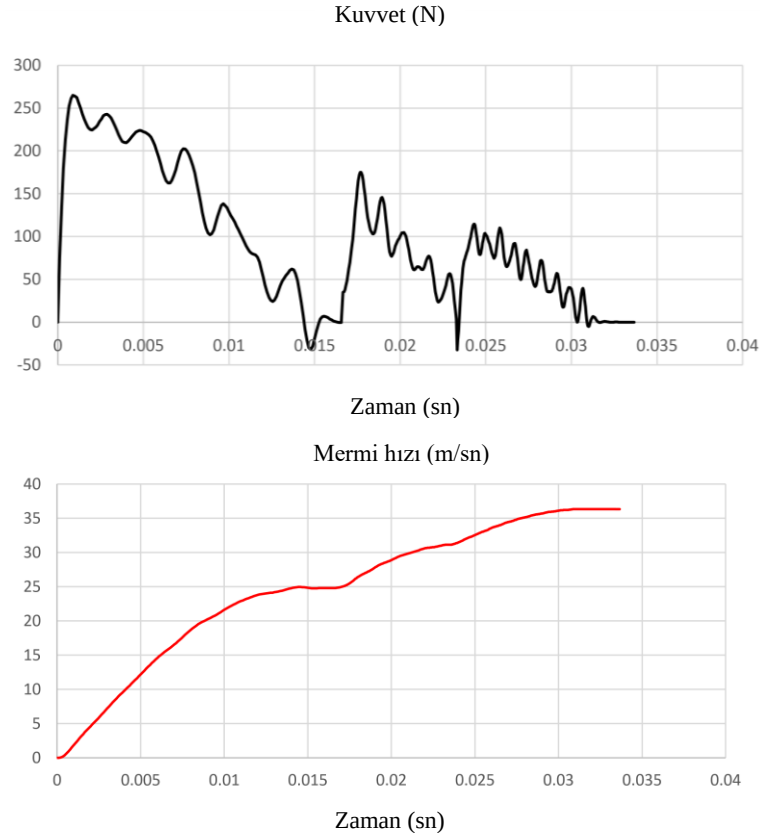
Bölüm-1’de merminin ilk hareketi esnasında diğer bölümlere göre daha yüksek bir akım çekilmekte olup merminin namlu boyunca hareketi **Şekil 4.10**’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Yürüyen manyetik dalga ve onu takip eden merminin simülasyon sonuçları.

Şekil 4.11’de elde edilen kuvvet ve hız grafikleri incelendiğinde bölüm geçişlerinde bir miktar negatif kuvvetlerin olduğu ancak bunun hıza etki etmediği görülmektedir. Mermi ilgili bölümün tam içerisinde olduğunda maksimum kuvvet elde edilmekte,

bölümden ayrılmaya başladığında ise kuvvet azalmaktadır. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre mermi namlu ağzından çıktığında maksimum 36m/sn'lik bir hıza ulaşabilmektedir.



Şekil 4.11: Kuvvet ve hızlanma simülasyon sonuçları.

4.5. Tüm Bölümler Sırayla Enerjilendirilirken Düzgün Artan Frekans Koşullarında Akım Değişimi

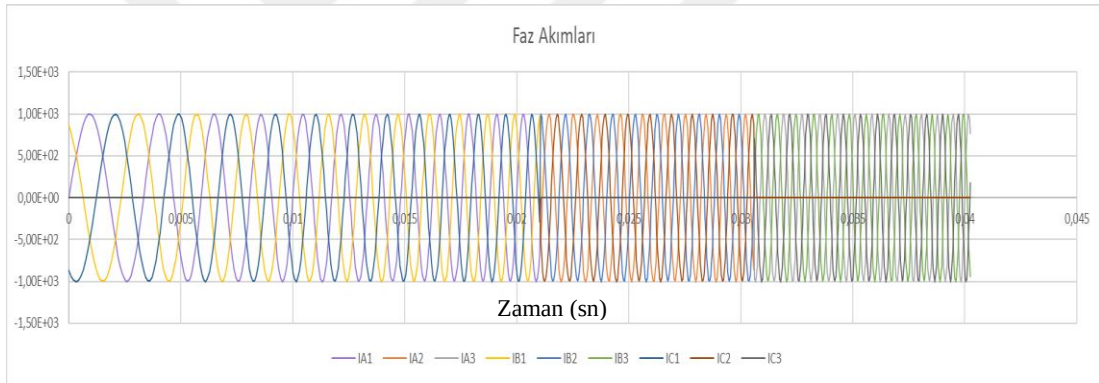
Bir önceki bölümde fırlatıcı boyunca frekans artışı namlu üzerinde bölüm bölüm yapılırken her bölümün kendi içerisinde frekans sabit tutulmuştu. Buradaki senaryolarda ise fırlatıcı üzerindeki bölümlerde namlu boyunca uygulanan akımların frekansı lineer artarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla **Tablo 4.6**'da gösterilen 3 adet senaryo oluşturulmuş ve 250 Hz'den 1000 Hz'e düzgün artan frekans koşullarında 1000 A, 1500 A ve 2000 A tepe değerlerine sahip akım dalga formlarının çıkış kuvvet ve hıza olan etkileri incelenmiştir.

Tablo 4.6: Tüm bölümler sırayla enerjili iken düzgün artan frekans senaryoları.

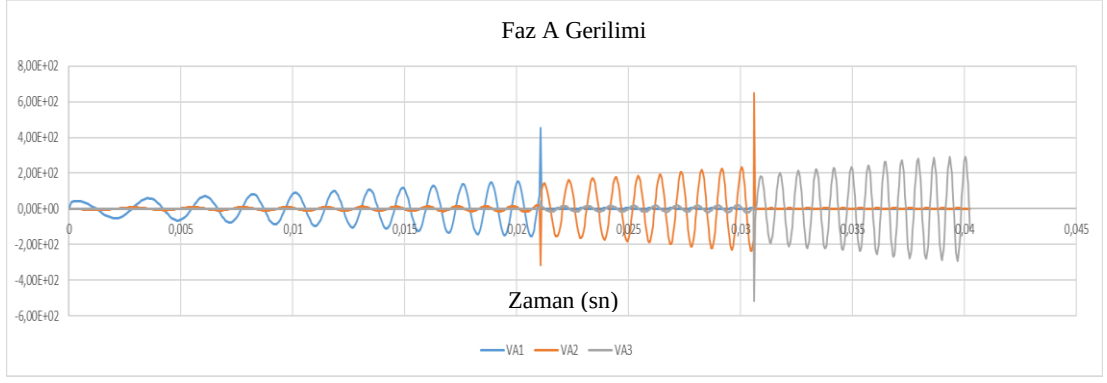
Senaryo	Çalışma Koşulları
Senaryo 5.1	Bölüm-1, 2, 3: 250 Hz'den 1000 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A
Senaryo 5.2	Bölüm-1, 2, 3: 250 Hz'den 1000 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1500 A
Senaryo 5.3	Bölüm-1, 2, 3: 250 Hz'den 1000 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 2000 A

Şekil 4.12'de gösterildiği gibi birinci bölümde 250 Hz ile başlayan akımlar mermi namı ağzından çıkarken 1000 Hz frekans değerine artırılmaktadır.



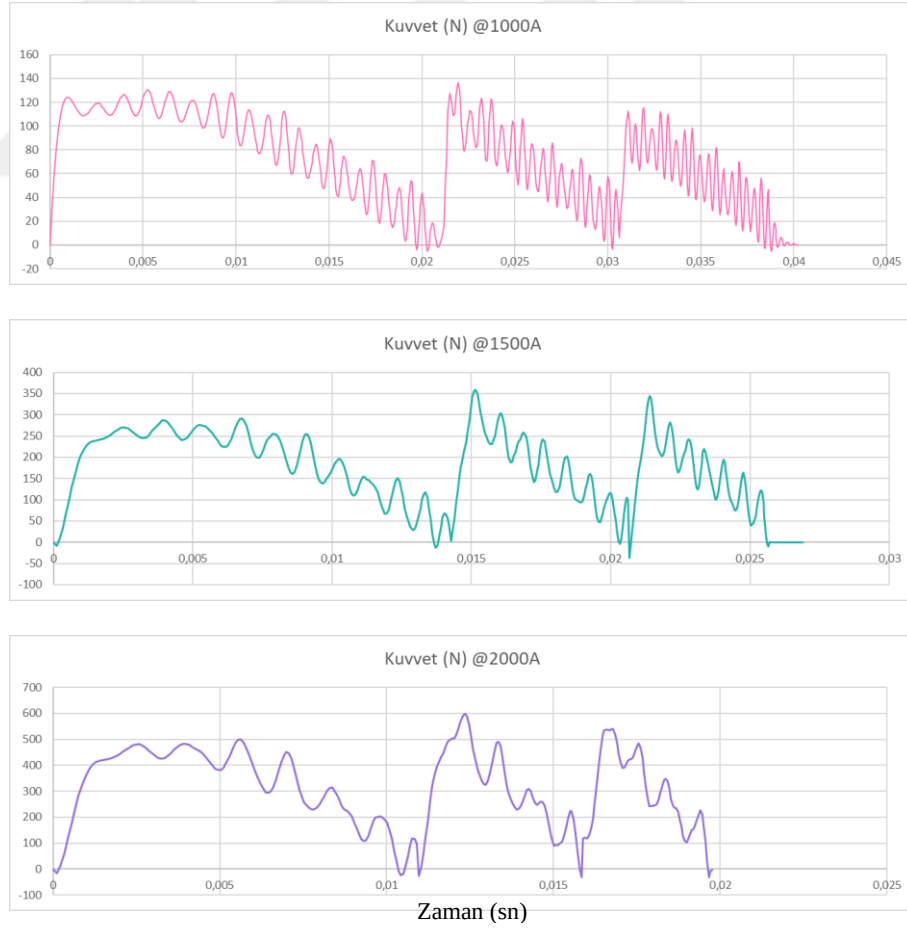
Şekil 4.12: 3 Bölüm için uygulanan artan frekansta faz akımları.

Namlu boyunca sabit akım ve artan frekanstaki faz akımlarının sürücü bobinlerine uygulanabilmesi için frekansla orantılı olarak sabit V/f ile gerilimin de artırılması gerekmektedir. JMAG programı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen Faz-A gerilimleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Frekans lineer olarak artarken gerilim de her bir bölümde hiçbir kesinti olmadan artmaktadır.



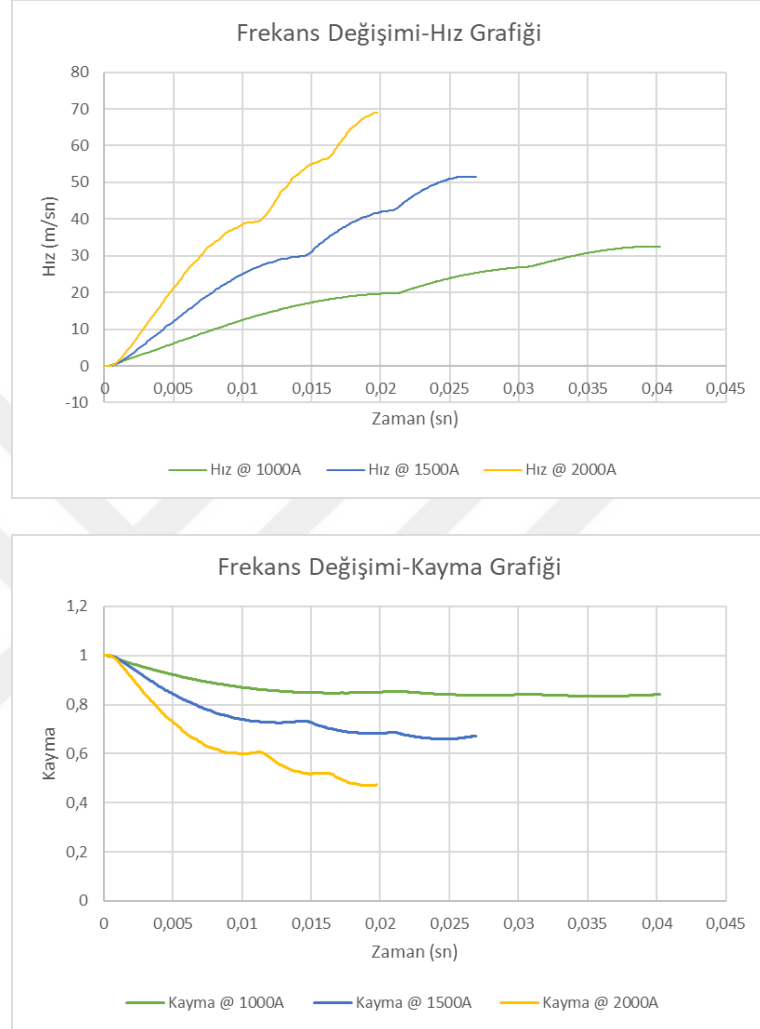
Şekil 4.13: 3 Bölüm için uygulanan artan frekansta faz gerilimleri.

Bu yöntem ile 1000, 1500 ve 2000A akım seviyelerinde elde edilen kuvvet grafikleri **Şekil 4.14**'te gösterilmiştir. Bölüm geçişlerinde aynı fazda akımlar uygulanarak negatif kuvvetlerin oluşması engellenmiş ve sırasıyla 120, 250 ve 459 N başlangıç kuvveti elde edilmiştir.



Şekil 4.14: 3 farklı akım değeri için elde edilen kuvvet grafikleri.

Bu akım değerlerinde elde edilen hız ve kayma grafikleri ise **Şekil 4.15**'te gösterilmiştir. 1000A, 1500A ve 2000A akım değerlerinde sırasıyla 32, 51 ve 69m/sn'lik hızlar elde edilmiştir.



Şekil 4.15: 3 farklı akım değeri için elde edilen hız-kayma grafikleri.

Akım 1000 A iken kaymadaki değişim daha stabil olmasına karşın yüksek bir kayma değeri ortaya çıkmıştır. 2000 A'da ise 0.5 değerlerine kadar kayma düşmüş ve yüksek hızlar elde edilmiştir.

Her bölümde sabit frekans uygulanan senaryo 3.1'e göre negatif kuvvetlerin daha az olduğu görülmüştür. Bununla birlikte tüm bölümlerin aynı anda enerjilendirildiği yöntemle göre hız düşük kalmaktadır. Bunun nedeni mermi bir bölümden çıktığı ve diğer bölüme geçtiği zaman itici kuvvetlere maruz kalmadığı için hızlanma da daha yavaş olmaktadır.

4.6. Tüm Bölümler Sırayla Enerjilendirilirken Düzgün Artan Frekans Koşullarında Frekans Değişimi

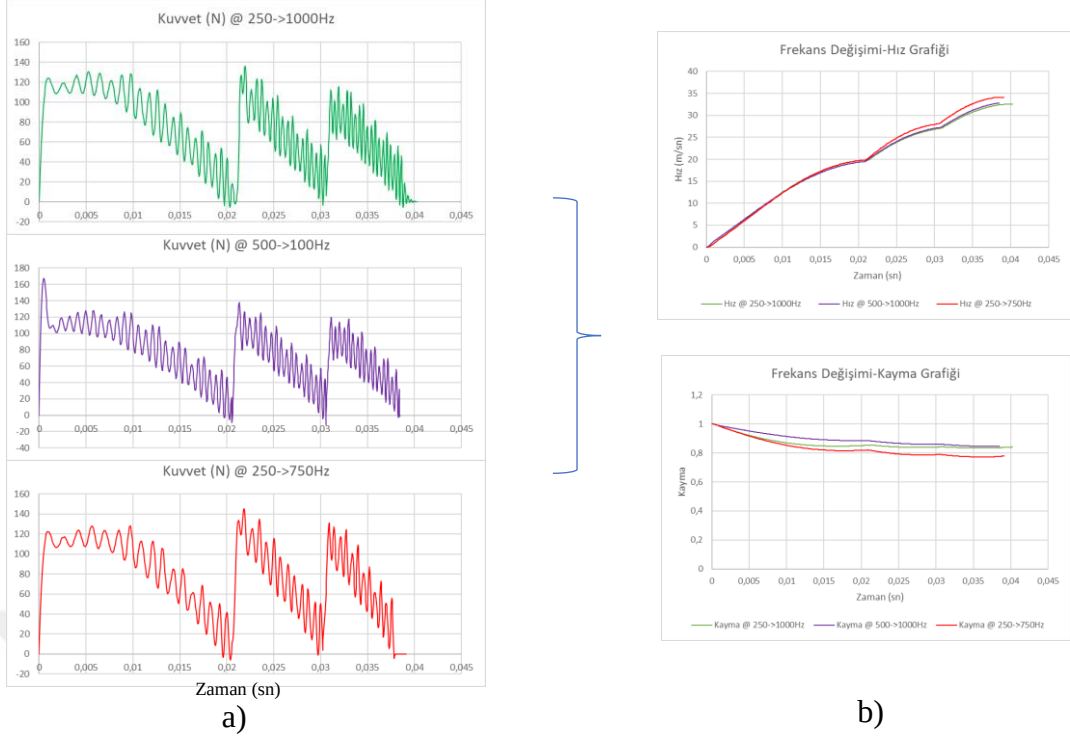
Namlu boyunca frekansın ve gerilim düzgün bir şekilde artması ile sağlanan V/f değeri fırlatıcı performansını etkileyen önemli bir parametredir. Bu bölümde bölüm bölüm enerjilendirilen fırlatıcıda frekans değerlerinin ve frekans artışının etkileri gözlenmiştir. Bunun için **Tablo 4.7**'deki senaryolar oluşturulmuş ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 4.7: Tüm bölümler sırayla enerjili iken düzgün artan frekans senaryoları.

Senaryo	Çalışma Koşulları
Senaryo 6.1	Bölüm 1, 2, 3: 250 Hz'den 1000 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A
Senaryo 6.2	Bölüm 1, 2, 3: 500 Hz'den 1000 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A
Senaryo 6.3	Bölüm 1, 2, 3: 250 Hz'den 750 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A

Şekil 4.16'da gösterilen kuvvet, hız ve kayma grafikleri incelendiğinde en optimum frekans değişiminin 250 Hz'den 750 Hz'e değiştiği senaryo olduğu görülmektedir. 500 Hz ile başlayan senaryoda 160 N ani yükselme ile başlatma görülmekte olup bu durum fırlatıcı sistemlerde istenmeyen bir durumdur.

Mermi namluyu terk etmeden önceki fırlatıcı frekansı 1000 Hz olan senaryo 6.3'te ise merminin senkron hızı takip edemediği ve yüksek kayma miktarı ile diğer senaryolara göre verimsiz bir fırlatma yapıldığı görülmektedir.



Şekil 4.16: Bölüm bölüm enerjilendirme artan frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri b) Hız ve kayma grafikleri.

4.7. Tüm Bölümlerin İkili Enerjilendirilmesiyle Düzgün Artan Frekans Koşullarında Simülasyonlar

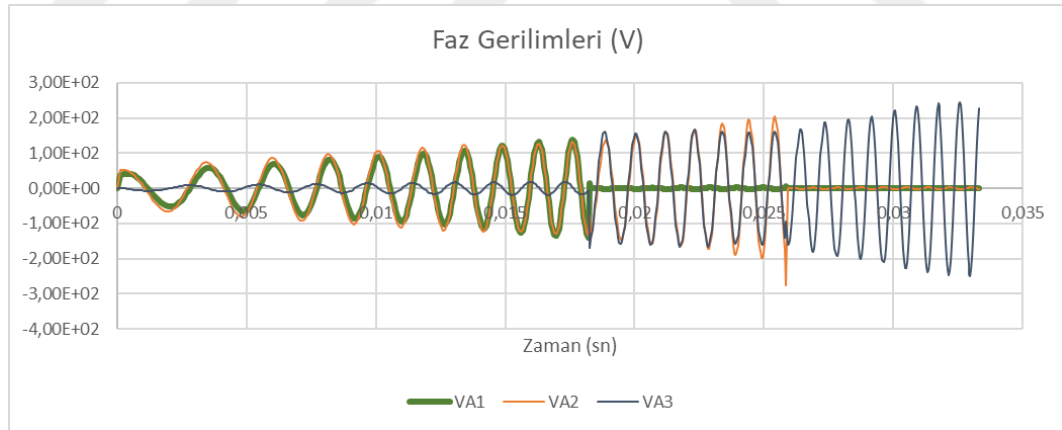
Buraya kadar yapılan simülasyon çalışmalarında frekans değerlerinin, frekans artışının, akımların çıkış kuvvetine olan etkileri gözlemlendiğinde bölüm bölüm enerjilendirilen fırlatıcıların çıkış hızının tamamı enerjilendirilene göre daha düşük olduğu görülmüştü. Bu tezde önerilen güç sistemi ile merminin tamamının namlu boyunca manyetik kuvvetlere maruz bırakılması hedeflendiğinden mermi hareket ederken aynı anda iki bölümün enerjilendirilmesi üzerine simülasyonlar yapılmıştır. Böylelikle mermiye etkiyen kuvvetlerin ve namlu çıkış hızının tüm fırlatıcının aynı anda enerjilendirildiği güç sistemleri ile aynı olması sağlanacak; bunun yanında merminin olmadığı bölümler enerjilendirilmeyerek daha verimli bir fırlatma gerçekleştirilebilecektir.

Bunun için **Tablo 4.8**'deki senaryolar oluşturulmuş ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 4.8: İki bölüm aynı anda sırayla enerjili iken düzgün artan frekans senaryoları.

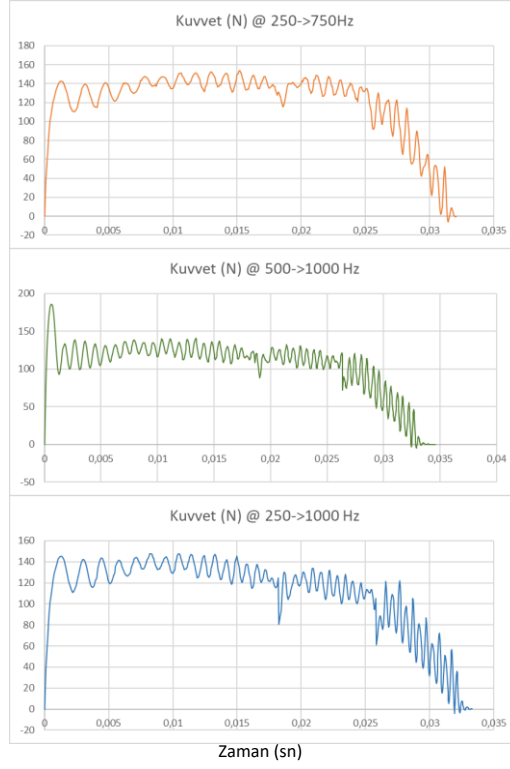
Senaryo	Çalışma Koşulları
Senaryo 7.1	Bölüm 1, 2, 3 (ikili enerjilendirme): 250 Hz'den 1000 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A
Senaryo 7.2	Bölüm 1, 2, 3 (ikili enerjilendirme): 500 Hz'den 1000 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A
Senaryo 7.3	Bölüm 1, 2, 3 (ikili enerjilendirme): 250 Hz'den 750 Hz'e, Faz A, B, C Akım (Maks): 1000 A

Şekil 4.17'de görüldüğü gibi bu senaryolarda aynı anda iki bölüm enerjilendirilmektedir. Bu sayede mermi ilk hareketini yaptığı anda bölüm 1'den bölüm 2'ye geçer ve merminin bir kısmına bölüm 1'i enerjilendiren eviriciler, diğer kısmına ise bölüm 2'yi enerjilendiren eviriciler kuvvet uygular. Bunun sonucu olarak mermi namlu boyunca sürekli kuvvetlere maruz kalır ve uygulanan kuvvetin istendiği gibi sabit kalması sağlanır.

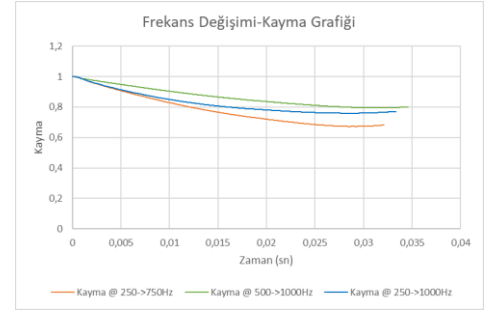
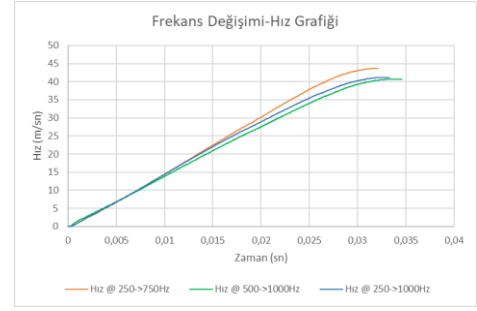


Şekil 4.17: Aynı anda iki bölümün enerjilendirildiği faz A gerilimleri.

Şekil 4.18'de elde edilen kuvvet ve hız grafiklerinde iki bölümün aynı anda enerjilendirilmesiyle namlu boyunca düşük dalgalanmaya sahip kuvvet grafiği elde edildiği görülmüştür. Tüm fırlatıcının aynı anda enerjilendirildiği Şekil 4.8'de elde edilen grafiklerle aynı sonuçların elde edilmesi önerilen güç sisteminin diğer yöntemlere göre avantajını da ortaya koymaktadır.



a)



b)

Şekil 4.18: İki bölüm enerjilendirme ile artan frekans sonuçları a) Kuvvet grafikleri
b) Hız ve kayma grafikleri.

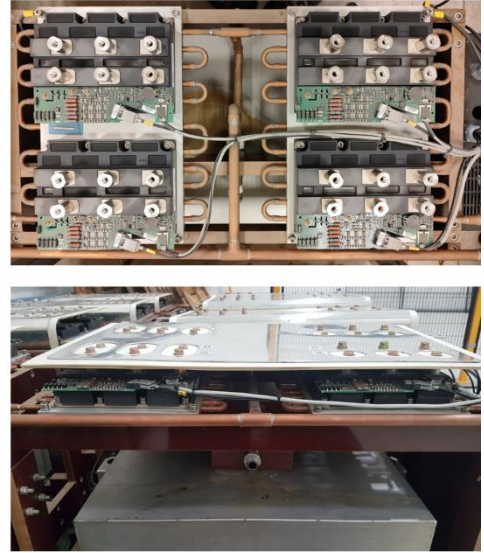
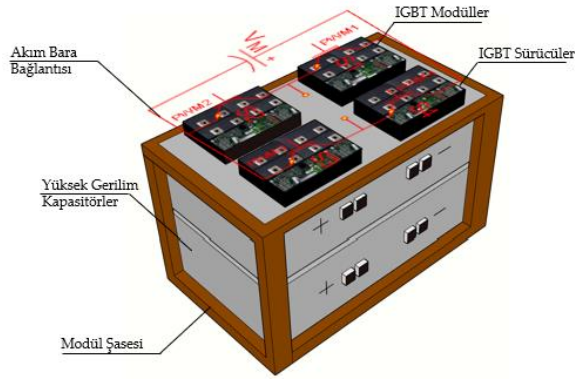
5. FIRLATICI DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Analiz ve simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen verileri deneysel ortamda gözlemleyebilmek için 0.25 Mj enerji depolama kapasitesine sahip 25 MW gücünde bir lineer indüksiyon fırlatıcı ve güç sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Fiziksel özellikleri 3B model ile birebir aynı olan bu fırlatıcı üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aynı zamanda simülasyon sonuçları ile de karşılaştırılmış ve bu sayede optimize edilen parametreler üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

5.1. Fırlatıcı ve Güç Sistemi

Lineer indüksiyon fırlatıcıyı oluşturan namlu, güç ve kontrol sistemi **Tablo 4.1**'deki özellikler ile aynı özelliklerde tasarlanmış ve üretilmiştir. Fırlatıcı bobinlerinin içerisinden fiber cam bir boru geçirilerek merminin sürtünmesiz hareket edebileceği bir namlu oluşturulması sağlanmıştır. Bu namlu fırlatıcı şasesine ise sönümleme mekanizmasıyla bağlanarak fırlatma esnasında geri tepme miktarı en aza indirgenmiştir. Fırlatıcı çıkışında ise optik sensörler ile hız ölçümü yapılmaktadır. Fırlatıcı bobinlerinin ihtiyaç duyduğu yüksek akım ve gerilim dalga formları için H-köprü evirici yapıları kullanılmıştır. Elektromanyetik fırlatıcılar doğası gereği yüksek elektriksel gürültü üretir ve bu da PWM sinyallerinin kontrolcüde üretilip IGBT sürücülerine gelinceye kadar gürültü kapmasına ve olası arızalara sebep olabilir. Bu yüzden kontrol sinyalleri elektriksel olarak değil optik olarak iletilerek bu gibi istenmeyen durumların önüne geçilmektedir.

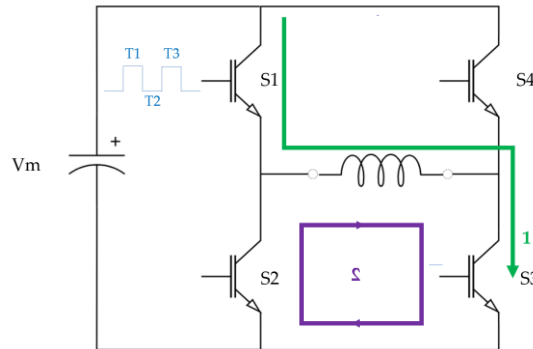
Fırlatıcı bobinlerini enerjilendirmek için tasarlanan güç sisteminin içerisindeki H-köprü eviricilerin modüler olması oldukça önemlidir. Çünkü bobinli fırlatıcı teknolojisinde özellikle yüksek hızlara çıkmak için genelde fırlatıcıya yeni bölümler eklemek tercih edilmektedir. Bu doğrultuda **Şekil 5.1**'de görüldüğü gibi kullanılan H-köprü eviriciler, 4 adet IGBT anahtar (MITSUBISHI CM1200HC-66H), anahtar sürücüler (Power Integrations -1SD536F2), 2 adet yüksek gerilim kondansatör ve topolojiyi oluşturan yüksek akım kapasiteli bara yapısından oluşmaktadır. Burada anlık olarak kilo amper seviyelerinde akım verebilen 2000 VDC ve 8.8 mF MKP tipinde kondansatörler kullanılmıştır.



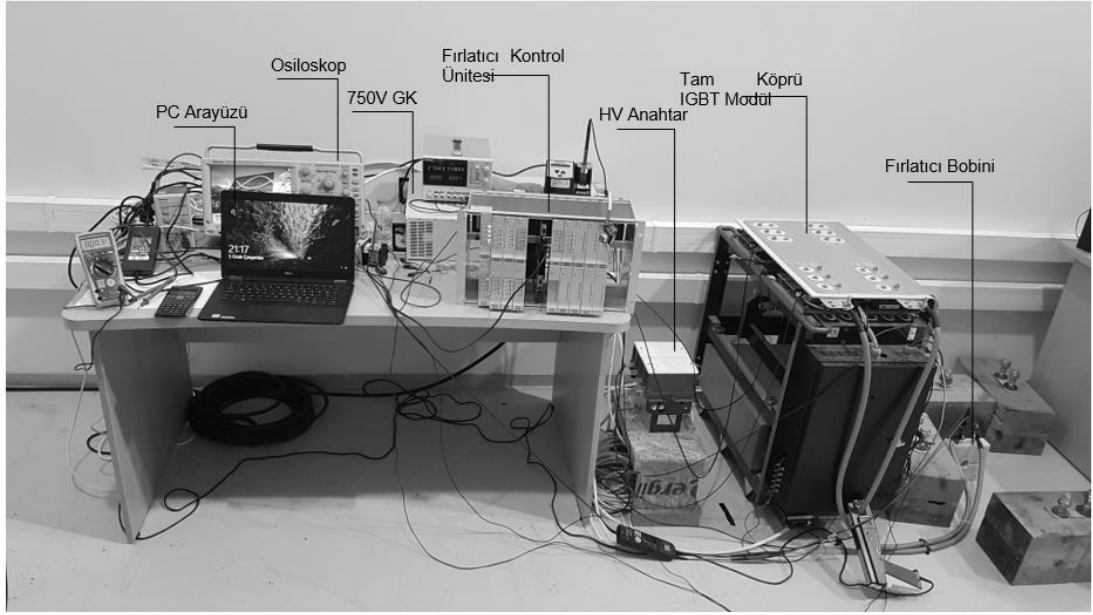
Şekil 5.1: Modüler H-köprü evirici yapısı.

Yüksek gerilim (>1000 VDC) ve yüksek güç (>1 MW) koşulları altında çalışacak olan evirici modüllerinin fırlatıcı üzerinde çalıştırılmasından önce kendi başına doğru çalıştığının doğrulanması çok önemlidir. Bu çalışmada evirici fiziksel özelliklerinden kaynaklanan parazitiklikler sonucunda oluşabilecek ani gerilim ve akım yükselmeleri, ölü zaman aralıkları, anahtar açılma ve kapanma zamanları ve en önemlisi yüksek gerilimde çalışırken gerekli izolasyon durumları gözlenebilmektedir. Bunun için literatürdeki çift darbe test düzeneği kurulmuş ve modüller buna göre doğrulanmıştır [65]. Bu test ile eviricideki bir IGBT'ye iki adet darbe sinyali gönderilerek anahtarın sırasıyla iletim, kesim, iletim ve kesim durumlarına sokulması sağlanır.

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi oluşturulan çift darbe test düzeneğinde her bir anahtar ayrı ayrı test edilmektedir. Örneğin, S1 anahtarı test edileceği zaman önce S3 anahtarı iletime sokulur ve endüktif yük üzerinden akım yolu elde edilir.

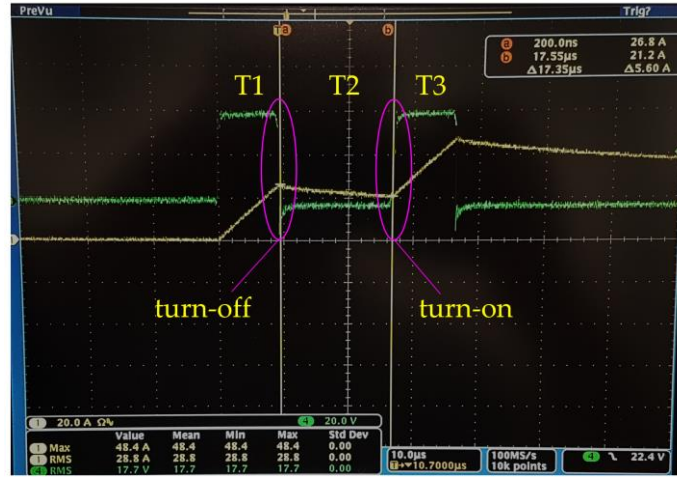


Şekil 5.2: Çift darbe deneyi devre yapısı.



Şekil 5.3: Çift darbe deneyi test düzeneği.

T1 süresi boyunca S1 anahtarı iletime sokulur ve 1 numaralı yeşil yol üzerinden akım akar. T1 süresi sonunda S1 anahtarı kesime gider ve T2 süresi sonunda tekrar iletime sokulur. T3 süresi boyunca da iletimde kalarak bu süre sonunda tekrar kesime gider. S1 anahtarı kesimde olduğu zaman ise akım 2 numaralı yol üzerinden akar. T1 süresi sonunda kapanma zamanı T2 süresinin sonunda ise açılma zamanı gözlemlenir.



Şekil 5.4: Çift darbe deneyi test sonuçları (CH1: yük akımı, CH4: yük gerilimi).

T2 süresi boyunca S3 anahtarı iletimde olmasına rağmen diğer anahtarlar kesimde olduğu için akım S2 anahtarı üzerindeki ters diyot üzerinden akmaktadır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde ölü zaman aralığının 10 µs olarak seçilmesine karar verilmiştir.

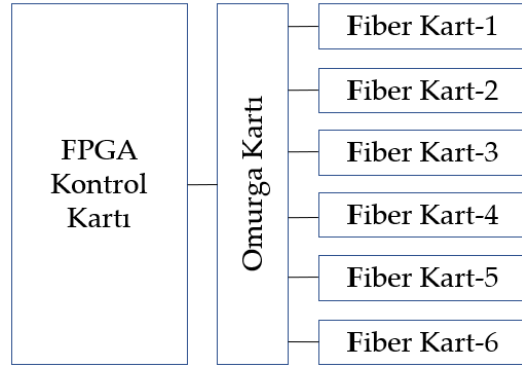
FPGA kontrolcüsü olarak XILINX Spartan 3A serisi kullanılmış olup tüm kontrol ve haberleşme algoritmaları bunun üzerinde geliştirilmiştir. FPGA programlama akışı **Şekil 5.5**'te gösterilmiştir.

3B elektromanyetik simülasyonlar ile elde edilen her bir bölüme ait frekans değeri, modülasyon indeksi, bölümlerin enerjilendirilme zamanları Python programlama dili kullanılarak veri tablolarına dönüştürülmektedir. Daha sonra bu veri tabloları VHDL dilinde FPGA projesine aktarılır ve FPGA derleme işlemleri tamamlandıktan sonra USB haberleşme protokolü kullanılarak kontrolcüye programlanır.



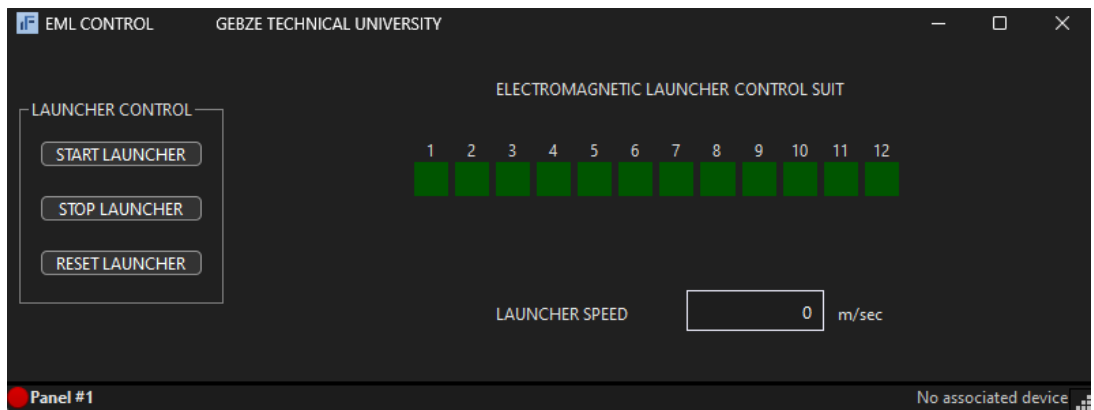
Şekil 5.5: FPGA algoritması programlama akışı.

FPGA kontrol ünitesinde kullanılan FPGA kontrolcüsünden çıkan elektriksel sinyallerin ise optik sinyallere çevrilmesi gerekmektedir. TTL seviyesindeki bu sinyalleri dönüştürmek için HFBR serisi 660 nm dalga boyuna sahip fiber optik alıcı ve vericiler kullanılmıştır.



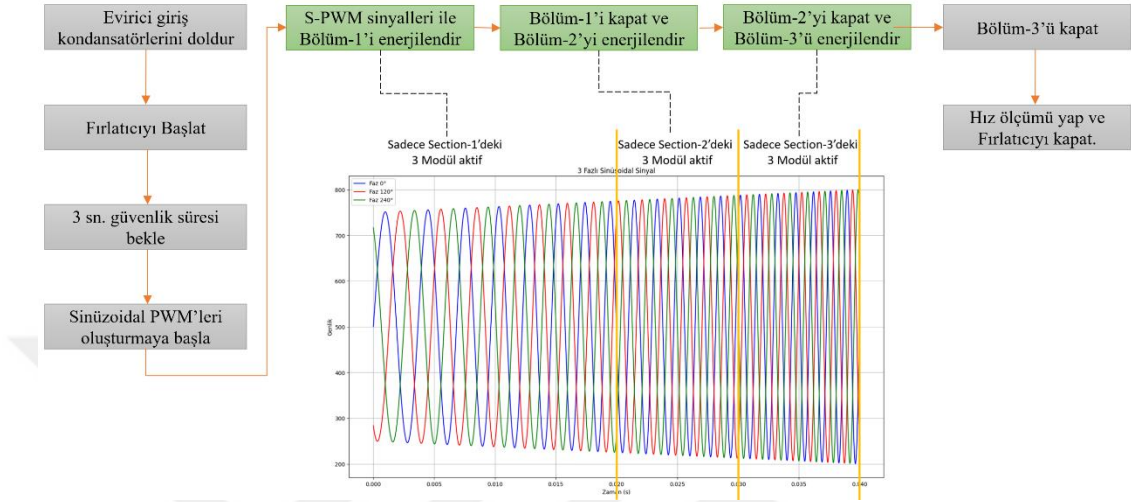
Şekil 5.6: FPGA kontrol ünitesi ve fiber optik kartlar.

FPGA kontrolcüsü ile fiber optik alıcı-vericiler arasında düzgün bir veri alışverişi yapabilmek ve gürültüleri önleyebilmek için bu sinyaller bir omurga kartı ile birleştirilmiş ve tüm kartlar 3U yüksekliğinde bir kabin içerisine yerleştirilmiştir. Ayrıca hız ölçümü için de kullanılan optik sensörler yine bu fiber optik kartlardan geçerek FPGA tarafından okunmaktadır.



Şekil 5.7: Fırlatıcı kontrol arayüzü.

FPGA kontrol ünitesi **Şekil 5.7**'de gösterilen kullanıcı arayüzü ile kontrol edilmektedir. FPGA içine gömülü arayüzle USB üzerinden gerçek zamanlı olarak değişken okunup yazılabilmektedir. Fırılaticı kullanıcı arayüzü üzerinden başlayan ve biten sistem algoritması **Şekil 5.8**'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8: Fırılaticı bölüm bölüm enerjilendirme algoritması.

Burada eviricilerle fırılaticı bobinlerine uygulanan akımların özellikleri ve bölümlerin enerjilendirilme süreleri 3B FEM simülasyonları sonucunda elde edilen veri tablolarından alınmaktadır.

Tablo 4.1'de özellikleri verilen ve simülasyonlarda kullanılan sürücü bobinleri yüksek akım taşıma kapasiteli bakır şeritlerden imal edilmiştir. Hava nüveli bobinlerin iç çapı 40 mm, dış çapı ise yaklaşık 90 mm'dir. Bobin 2 mm kalınlığında ve 15 mm genişliğinde bakır şerit ile 2x10 sarıma sahiptir. Bobine ait endüktans değerinin hesabı için ise akım tabakası yaklaşımı kullanılmıştır [66].

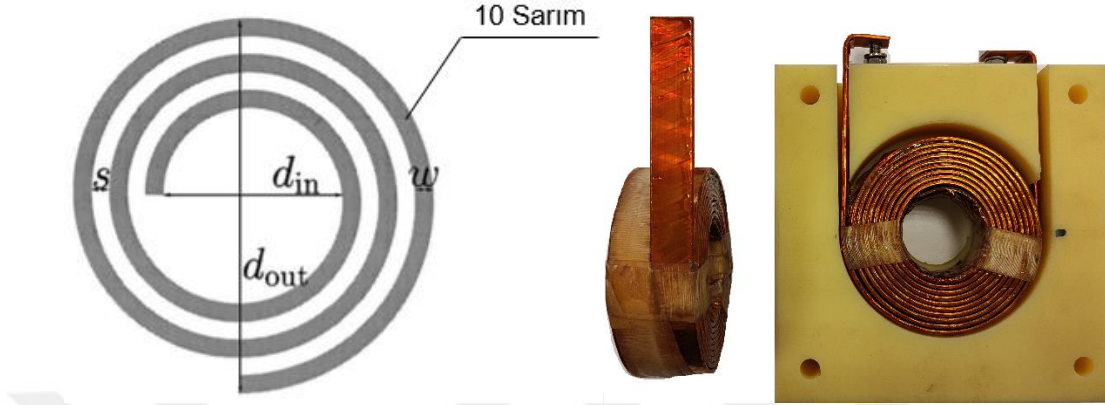
$$L = \frac{\mu n^2 d_{avg} c_1}{2} \left(\ln \left(\frac{c_2}{\rho} \right) + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right) \quad (6.1)$$

Burada,

$$d_{avg} = 0.5(d_{out} + d_{in}) \quad (6.2)$$

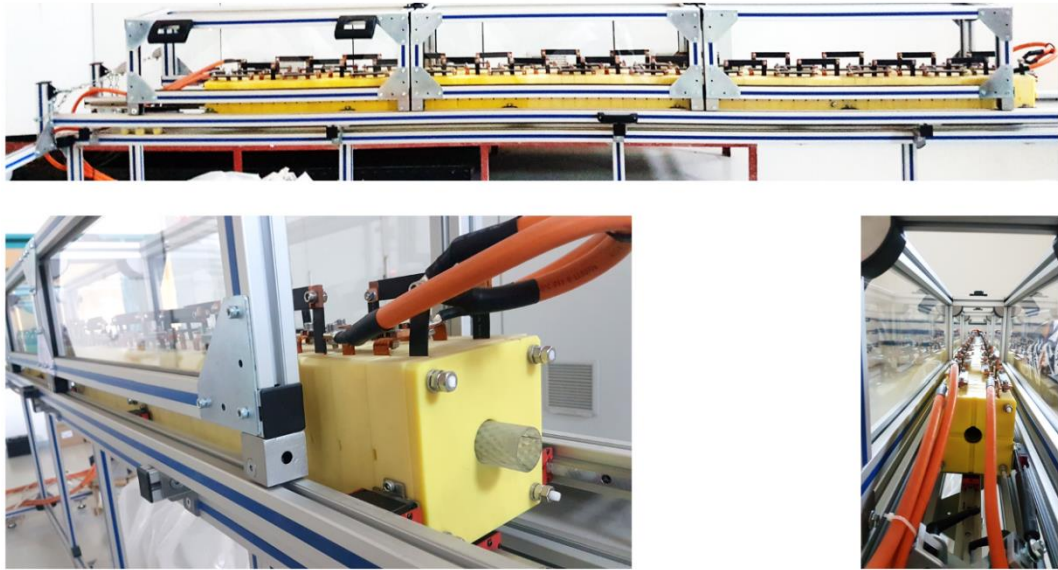
$$\rho = (d_{out} - d_{in}) / (d_{out} + d_{in}) \quad (6.3)$$

olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca c_1, c_2, c_3 ve c_4 katsayıları sırasıyla 1, 2.46, 0 ve 0.2 alınarak dairesel bobin endüktans hesabı yapılmaktadır.



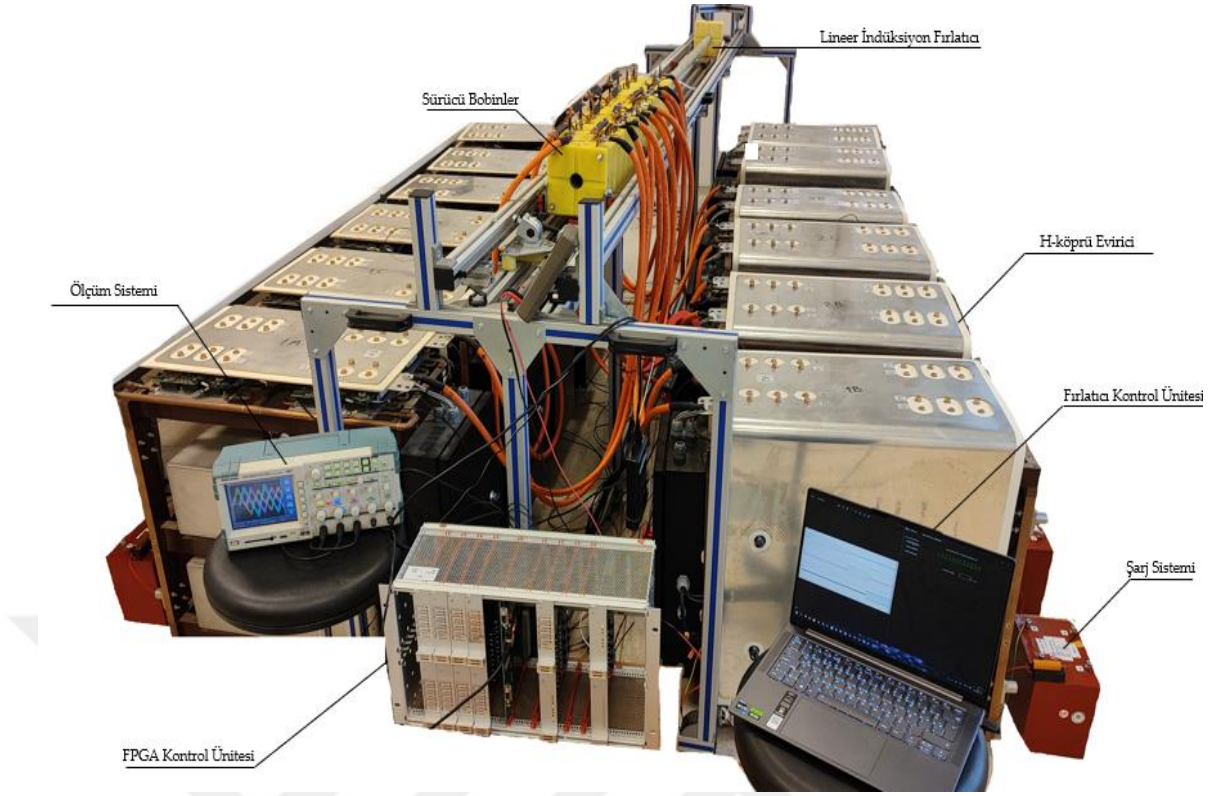
Şekil 5.9: Fırlatıcı sürücü bobini.

Elektromanyetik fırlatıcının namlusu için tasarlanan bobinin değerleri ile (5.1) eşitliği kullanılarak hesap yapıldığı zaman L değeri yaklaşık 17.75uH elde edilmektedir.



Şekil 5.10: Fırlatıcı namlusunun sürücü bobinlerle oluşturulması

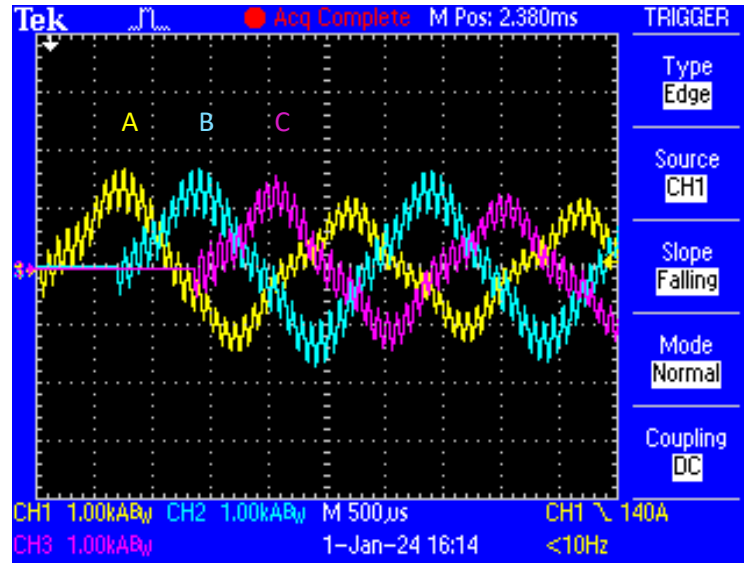
Fırlatıcı ve güç sistemini oluşturan tüm birimler **Şekil 5.10** ve **Şekil 5.11**'de görüldüğü gibi entegre edilmiştir. Böylelikle 3 bölümden oluşan modüler bir indüksiyon fırlatıcı ve güç sistemi oluşturulmuştur.



Şekil 5.11: Fırlatıcı ve güç sisteminden oluşan tam deney düzeneği

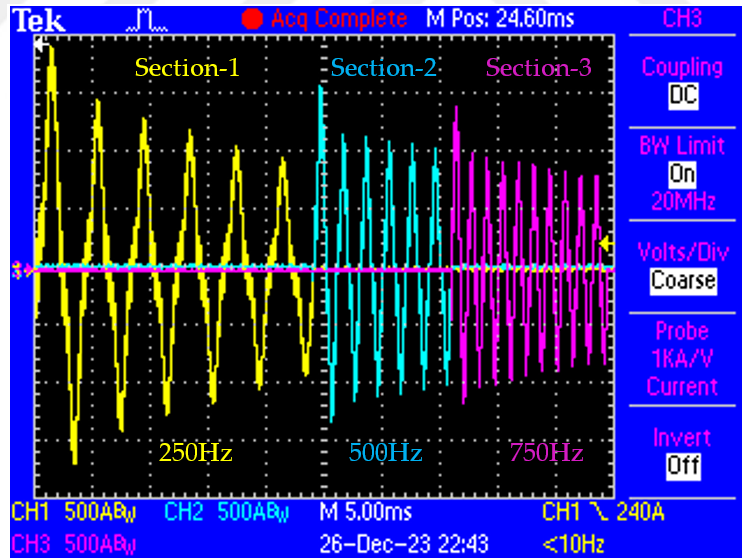
5.2. Deney Sonuçları

Önerilen güç sistemi üzerinde deneysel sonuçlar 4. bölümde verilen senaryolar üzerinden gerçekleştirilmiş ve akım, gerilim ve hız ölçümleri alınmıştır. Senaryo 4.1'deki bölüm 1, 2 ve 3'te uygulanan sırasıyla 250 Hz, 500 Hz ve 750 Hz frekans değerleri ve senaryo 6.3'te uygulanan 250 Hz'den 750 Hz'ye düzgün artan frekansta sabit V/f değerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve her bölümdeki faz akım grafiği sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 5.12: Bir bölüm içerisindeki A, B ve C fazları akım ölçümleri

Şekil 5.12’de görüldüğü gibi bir bölüm içerisindeki A, B ve C fazları arasında 120 derecelik bir faz farkı oluşturulmaktadır. Bu faz farkı ile yürüyen manyetik dalga elde edilmekte ve merminin bu dalgayı takip etmesi sağlanmaktadır.



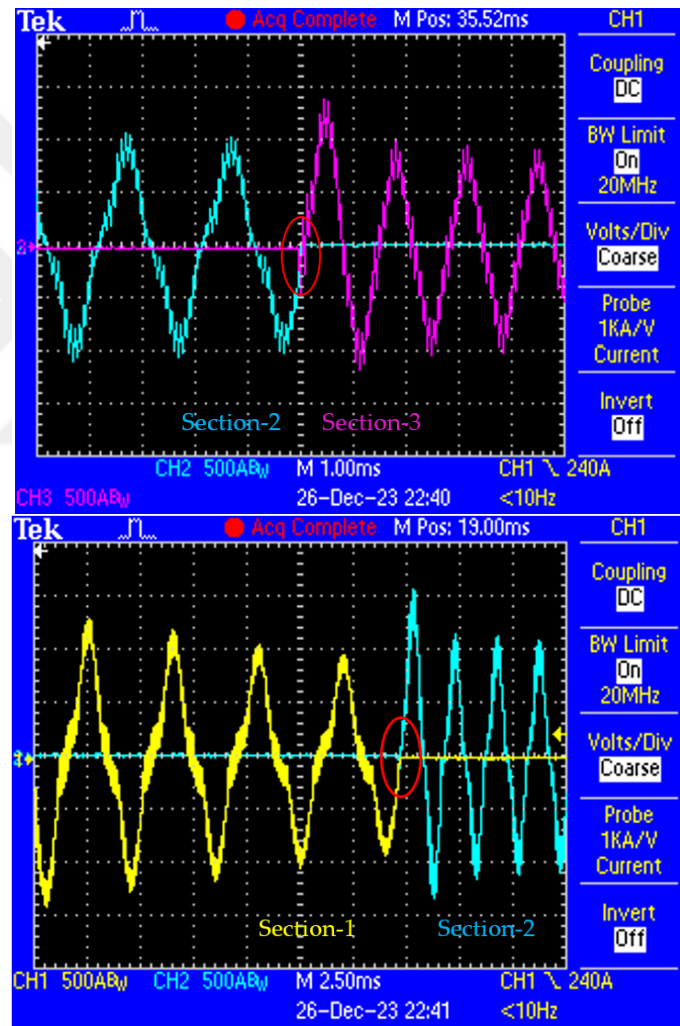
Şekil 5.13: A fazı için fırlatıcıdaki tüm bölümlerdeki akım grafikleri.

Fırlatıcıdaki 3 bölümde uygulanan faz-A akımları ise Şekil 5.13’te gösterilmiştir. Her bölümde frekans artarken modülasyon indeksi de artırılarak V/f oranı sabit tutulmaya çalışılmıştır. Burada bölümler arasında akım farklılıklarının görülmesinin sebeplerinden bir tanesi de evirici kondansatöründen gelen kısıtlamalardır. Evirici

çıkışındaki sinüzoidal akımları elde etmek için girişindeki kondansatör kullanıldığı için zamanla gerilimi düşmekte bu da akımlarda düşüşlere sebep olmaktadır.

Önerilen güç sistemindeki en büyük zorluklardan bir tanesi her bölümün farklı eviricilerle sürülmesi ve bunun sonucunda bölümler arasındaki geçişlerde negatif kuvvetlerin oluşmaması için yapılması gereken faz kontrolüdür.

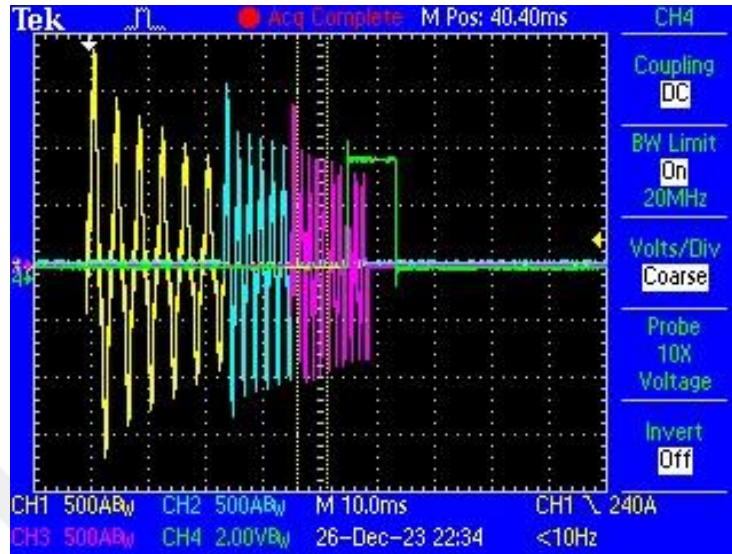
Şekil 5.14'te görüldüğü gibi bölüm 1'den bölüm 2'ye ve bölüm 2'den bölüm 3'e geçişlerde akımlar tam olarak aynı faz olarak uygulanmaktadır. Bu geçişlerle birlikte fırlatıcıda artan frekansta ve sabit V/f oranında bir dalga formu elde edilmektedir.



Şekil 5.14: Bölümler arasındaki geçişlerde faz-A akımları.

Fırlatıcı çıkışına entegre edilen optik sensörler ile fırlatıcı hızı ölçülmektedir. Hız ölçüm sinyalinin yükselen kenarında mermi namlu ağzından çıkmaktadır. Ancak bu

esnada oluşan uç etkisinden kaynaklı negatif kuvvetleri engellemek amacıyla bir süre daha bölüm-3 enerjilendirilmeye devam etmektedir.

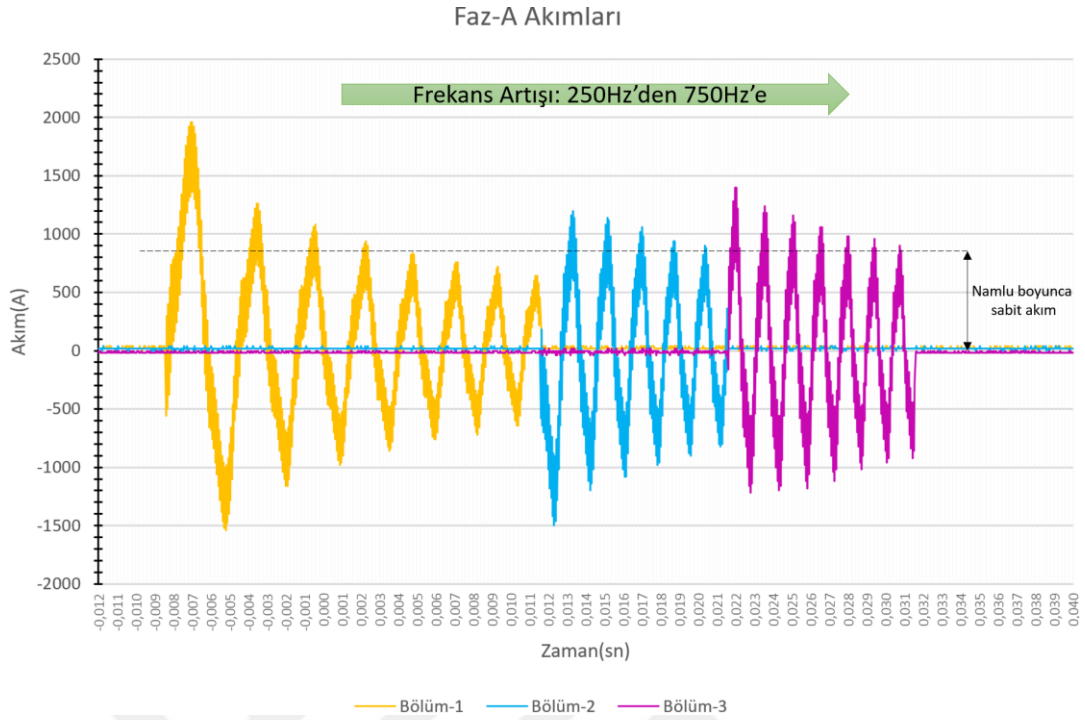


Şekil 5.15: Ayrık artan frekansta deney sonuçları (CH1: Bölüm 1, CH2: Bölüm 2, CH3: Bölüm 3, CH4: Hız Ölçüm Sinyali).

Optik hız ölçümü 24 cm uzunluğundaki merminin namlu ağzından 8 ms sürede geçmesine göre hesap edildiğinde 30 m/sn’lik bir hız değeri elde edilmektedir.

Senaryo 4.1’de gerçekleştirilen sabit V/f ile namlu boyunca 0.5 Hz artan frekansta akım uygulandığında ise **Şekil 5.15**’te grafik elde edilmiştir. Bu senaryo için yapılan FEM analizleri sonucunda ise 35 m/s hıza ulaşılmıştır.

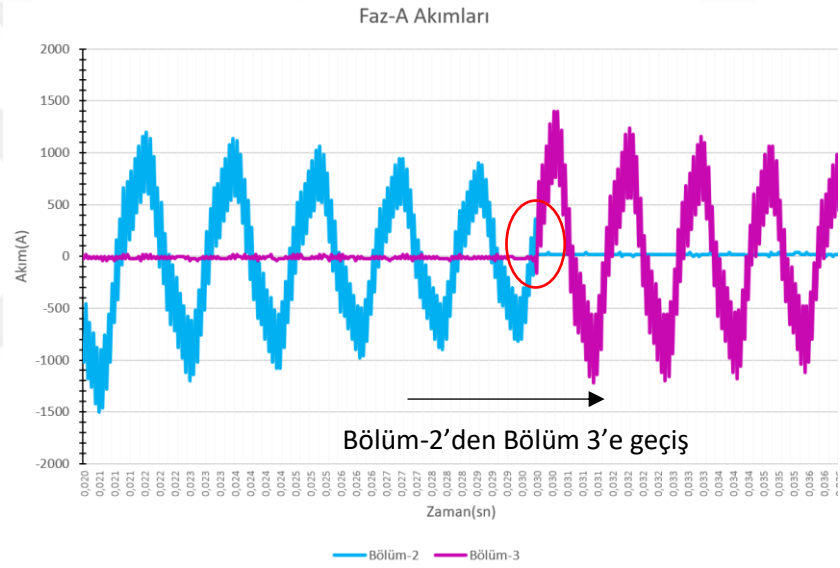
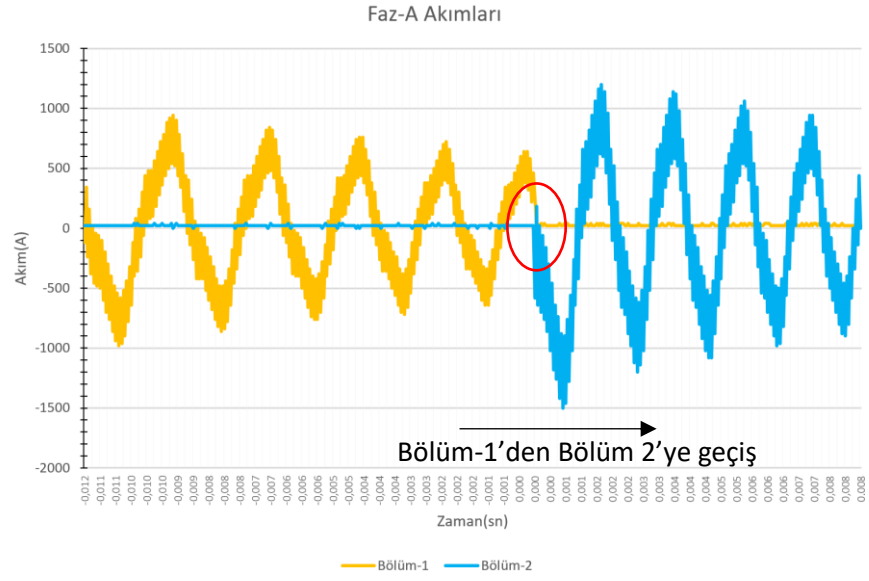
Senaryo 6.3’teki frekans ve akım değerleri dikkate alınarak sabit V/f ile namlu boyunca artan frekansta uygulanan akımlar ise **Şekil 5.16**’da gösterilmiştir. Mermi ilk hareketini sağlayan frekans değeri 250 Hz olmakla birlikte mermi namluyu terk ederken uygulanan frekans 750 Hz olmaktadır. Böylelikle bu senaryoda elde edilen akım grafikleri simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve deney sonuçları değerlendirilmiştir.



Şekil 5.16: Düzgün artan frekansta deney sonuçları (CH1: Bölüm 1, CH2: Bölüm 2, CH3: Bölüm 3).

Bu grafik incelendiğinde bölüm 1, 2 ve 3 için uygulanan akımların RMS ortalaması benzer olmakla birlikte evirici giriş kondansatöründen kaynaklı akımda zamanla düşme meydana gelmektedir. Mermi ilk başta hareketsiz olduğundan tıpkı elektrik makinalarında olduğu gibi ilk kalkış anında yüksek akımlar çekebilmektedir.

Bölüm geçişlerine bakıldığında ise geçişlerin sıfır noktalarında değil en optimum noktada olduğu görülmektedir. **Şekil 5.8**'de gösterilen algoritmanın uygulanması sayesinde sıfır geçişlerin takibinin yapılmasına gerek kalmamaktadır. Bu da namlu boyunca istenilen frekans artışının merminin konumundan bağımsız yapılabilmesini sağlar. 3B simülasyonlarda elde edilen merminin konumuna bağlı olarak istenilen zamanda istenilen bölüm enerjilendirilebilmektedir.



Şekil 5.17: Bölümler arasındaki geçişlerde faz A akımları.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında lineer indüksiyon fırlatıcılar için yeni bir güç sistemi geliştirilmiştir. Güç sistemi analizi için öncelikle eşdeğer devre modeli ortaya konulmuş ve H-köprü tek faz eviriciler ile birlikte geçici rejim simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca fırlatıcının tamamı için gerekli bölüm ve fazları temsil eden akım ve gerilim değerleri kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Kontrol ve haberleşme algoritmaları Xilinx Spartan 3A FPGA üzerinde gerçekleştirilmiş ISE test ortamında algoritmanın doğrulanması sağlanmıştır.

Elektriksel simülasyonu yapılan güç sisteminin gerçek fırlatıcı üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla tam fırlatıcı ve güç sistemi 3B elektromanyetik simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda harici güç kaynakları ile eviriciler simüle edilerek mermi üzerine etkiyen kuvvet, oluşan kayma miktarı ve elde edilen hız gibi parametreler farklı senaryolarla karşılaştırılmıştır. Böylelikle gerçek deney ortamında uygulanacak algoritma parametreleri optimize edilerek en verimli fırlatıcı senaryo ortaya konulmuştur.

3D simülasyon modeli oluşturulan fırlatıcı üzerinde gerçek deney ortamında da çalışma yapabilmek için fırlatıcı ve güç sistemi laboratuvarında kurulmuştur. FPGA kontrolcüsü tarafından SPWM yöntemi ile sürülen eviriciler 400 VDC bara gerilimi ve 1000 A maks. akım değerlerindeki dalga formu ile sürücü bobinleri enerjilendirilmiştir. 3 bölüm ve 18 sürücü bobininden oluşan fırlatıcıda her bir bölüm sırasıyla 250 Hz, 500 Hz ve 750 Hz frekanslarda ve 250 Hz'den 750 Hz'e lineer artan frekanslarda sabit V/f ile sürülmüştür. Negatif kuvvetleri ve uç etkileri en aza indirgeyebilmek için mermiye uygulanan akımların aynı fazda olması sağlanmış ve mermi namlu ağızından ayrılırken bir süre daha bölüm-3 enerjilendirilerek uç etkisinin azaltılması sağlanmıştır.

Bölümlerdeki sabit frekansın uygulandığı deneysel sonuçlarda ölçülen 30m/sn'lik hız ile 3B elektromanyetik simülasyonlar sonucunda elde edilen 35m/sn'lik hız karşılaştırıldığında sonuçların çok yakın olduğu görülmüştür. Aradaki hız farkının simülasyon ortamında giriş kondansatörün zamanla boşalmaması ve bazı kayıpların ihmal edilmesi olduğu değerlendirilmektedir [67].

Tüm bu sonuçlar ışığında lineer indüksiyon fırlatıcılar için modüler, esnek ve verimli bir güç sistemi ortaya konulmuştur. Literatürdeki diğer fırlatıcılarla karşılaştırma yapıldığında önerilen sistemin frekans ve gerilim artış hızını optimum hale getirebilmesi önemli bir avantajdır. Bunu yaparken bölüm bölüm enerjilendirme yaklaşımıyla merminin olmadığı bölümlerin enerjilendirilmeyerek doğası gereği daha yüksek verimlere ulaşmak mümkün olmaktadır. Bobinli fırlatıcılarda yüksek hızlara ulaşabilmek için gerekli olan bölümler halinde çalışma ve bölümlerin sayısının gerektiğinde artırılması amacıyla tasarlanan modüler güç sistemi yaklaşımı da bir diğer önemli özelliği olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 6.1: Önerilen sistem ile diğer fırlatıcı güç sistemlerinin karşılaştırma sonucu.

Parametre	LC Rezonans	Jeneratör	Tek Evirici	Önerilen Sistem
V/f kontrol	X	X	✓	✓
Bölüm-bölüm enerjilendirme	✓	✓	X	✓

(✓:Uygulanabilir, X: Uygulanabilir değil)

Tablo 6.1'de görüldüğü gibi darbeli güç üretici sistemlerde endüktans ve kondansatörden elde edilen rezonansla fırlatıcı enerjilendirildiğinde frekans ve akım değerleri bu devre elemanlarının fiziksel değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Jeneratör ile sürülen sistemlerde ise gerilim ve frekans yine kullanılan elektrik makinasının çalışma hızı ve diğer fiziksel özelliklerine bağlı olarak değiştirilebilmektedir [47]. Bu sistemlerde V/f uygulamak çok zor olmakla birlikte kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerinin değişimi ile mümkündür. Tek evirici ile tüm fırlatıcının enerjilendirildiği sistemler ise düşük verimle çalışmaktadır [48], [49]. Çünkü merminin olmadığı bölümler de enerjilendirilerek kayıpların artmasına sebep olmaktadır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen güç sistemi tüm fırlatıcının aynı anda enerjilendirildiği sistemlere göre %57.1 daha yüksek verimle çalışmaktadır.

6.1. Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalarda daha yüksek hızlara çıkabilmek adına fırlatıcıda bölümlerin ve her bölümdeki bobinlerin sayısının artırılması hedeflenmektedir. Ayrıca harmoniklerin etkisini azaltabilmek adına skaler kontrol yerine vektör kontrol tabanlı kontrol algoritmalarının da faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Bölüm 4.7’de simülasyonları gerçekleştirilen aynı anda bir yerine iki bölümün enerjilendirilmesi üzerine algoritma geliştirilerek gerçek deney ortamında çalışmalar yapılması planlanmaktadır. Böylelikle geliştirilen bu sistemin aynı anda tüm fırlatıcıyı enerjilendiren güç sistemlerine göre avantajları da deneysel olarak ortaya konabilecektir.

Merminin namlu boyunca sabit kuvvetlere maruz kalmasını sağlamak amacıyla H-köprü eviriciler ile iki sürücü bobini yerine tek bobinin sürülmesi ile aynı anda enerjilendirilen bobin sayısının azaltılması da hedeflenmektedir. Böylelikle enerji verimliliği artırılarak daha az enerjiyle hedeflenen hızlara ulaşılabilecektir.

3 boyutlu FEM analizleri yardımıyla elde edilen frekans, akım ve faz optimizasyonu için yapay zekâ teknolojilerinden de faydalanılabileceği düşünülmektedir. JMAG ortamında elde edilecek veri setleriyle mermi tipi ve istenilen hız gibi girdilere karşılık bu parametrelerin çok daha kısa zamanda optimizasyonun yapılması hedeflenmektedir.

IGBT gibi silikon yarı iletken anahtarın yüksek frekans kısıtları olduğundan SiC anahtarların kullanılması da gelecek çalışma hedeflerinde yer almaktadır. Bu sayede yüksek frekansta anahtarlama sağlanarak daha az dalgalı ve harmoniklere sahip akım dalga formları elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Kolm H., Mongeau P., Williams F., (1980). "Electromagnetic Launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 16 (5), 5-10.
- [2] McNab I. R., (1999), "Early electric gun research", IEEE Transactions on Magnetics, 35 (1), 250-261.
- [3] Poljak D., (2022), "Review of Least Action Principle in Electromagnetics Part I: Derivation of Continuity Equation and Lorentz Force", 2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 1-6, Split, Croatia.
- [4] Han Z., Xu J., Rui W., Liu L., (2020), "Improved vector control strategy of linear induction motors for electromagnetic launch", IET Power Electronics, 13, 4659-4664.
- [5] Egeland A., (1989), "Birkeland's electromagnetic gun: a historical review", IEEE Transactions on Plasma Science, 17 (2), 73-82.
- [6] Fauchon-Willeplee A. L., (1922), "Electric apparatus for propelling projectiles", U.S. Patent 1,422,427.
- [7] Korol'kov A. L., (1983), "Long Range Electrical Gun: Equipment and Supplies of the Red Army", Tekhnika i Snabzheniye Krasnoy Armii, 37 (68), 1-6, 8, Wright Patterson AFB Foreign Technology Division Translation FTD-ID(RS)T-1542-83, US.
- [8] MacLaren F. B., (1921), "Electric Gun", U.S. Patent 1,384,769.
- [9] Fair H. D., (2003), "Electromagnetic launch", International Journal of Impact Engineering, 29 (1-10), 247-262.
- [10] Barber J. P., Marshall R. A., Rashleigh S., (1979), "Magnetic Propulsion for Hypervelocity Launcher", Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, 2.
- [11] Anderson D., Claflin S., Winterberg F., (1971), "On the Acceleration of a Superconducting Macroparticle in a Magnetic Travelling Wave Accelerator", Zeitschrift für Naturforschung A, 26 (9), 1415-1424.
- [12] Kolm H., Miller R., (1980), "Electromagnetic Launchers and Guns Phase One Final Report of the M.I.T. Group", Francis Bitter National Magnet Laboratory and Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [13] Fair H., (1982), "Electromagnetic propulsion: A new initiative", IEEE Transactions on Magnetics, 18 (1), 4-6.
- [14] Fair H., (2003), "Electric Launch Science and Technology in the United States", IEEE Transactions on Magnetics, 39 (1), 11-16.

- [15] McNab I. R., LeVine F., Aponte M., (1995), "Experiments with the Green Farm Electric Gun Facility", IEEE Transactions on Magnetics, 31 (1), 123-130.
- [16] Mongeau P., Williams F., (1982), "Arc-Comm untated Launcher", IEEE Transactions on Magnetics, MAG-18 (1), 45-50.
- [17] McKinney K., Mongeau P., (1984), "Multiple Stage Pulsed Induction Acceleration", IEEE Transactions on Magnetics, MAG-20 (2), 239-245.
- [18] Weldon W. F., (1989), "A Taxonomy of Electromagnetic Launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 25 (1), 591-597.
- [19] Hammon H. G., Dempsey J., Strachan D., Raos R., Haugh D., Whitby F. P., Holland M. M., Eggers E., (1993), "The Kirkcudbright Electromagnetic Launch Facility", IEEE Transactions on Magnetics, 29 (1), 89-97.
- [20] Kolkert W. J., Jamet F., (1999), "Electric Energy Gun Technology: Status of the French-German-Netherlands Programme", IEEE Transactions on Magnetics, 35 (1), 150-157.
- [21] Wang Y., Ren Z., (1999), "EML Technology Research in China", IEEE Transactions on Magnetics, 35 (1), 158-165.
- [22] Akyazı Ö., (2006), "Elektromanyetik Fırlatıcılar", Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [23] Sarı V., (2015), "Elektromanyetik Fırlatıcıların Farklı Manyetik Özellikteki Çekirdeklerle Performans Analizi", Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi.
- [24] Balıkcı A., Zabar Z., Czarkowski D., Birenbaum L., (2003), "Reduction in Fluctuation of the Accelerating Force in Linear Induction Launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 39 (1), 97-103.
- [25] Guan X., Wang S., Guan S., Guo D., Liu B., (2019), "Study on the Best Trigger Position of Multistage Induction Coil Launcher", IEEE Transactions on Plasma Science, 47 (5), 2419-2423.
- [26] Hasırıcı U., (2011), "Tübüler Lineer İndüksiyon Motorlarının Manyetik Levitasyon Trenlerine Uygulanması ve Kontrolü", Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [27] Kolm H., Mongeau P., (1984), "Basic Principles of Coaxial Launch Technology", IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG-20, no. 2, pp. 227-235, March.
- [28] Mongeau P., Williams F., (1982), "Arc-commutated launcher", IEEE Transactions on Magnetics, MAG-18 (1), 1-7.
- [29] Elliott D. G., (1989). "Traveling-wave induction launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 25 (1), 159-164.

- [30] Hasirci U., Balikci A., (2009), "Design of an Electromagnetic Launcher for Earth-to-Orbit (ETO) microsatellite systems", 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 233-236, Istanbul, Turkey, 11-13 June.
- [31] He J. L., Levi E., Zabar Z., Birenbaum L., (1989), "Determination of the parameters of induction-type electromagnetic launchers", 7th Pulsed Power Conference, 602-605, Monterey, CA, USA, 10-12 June.
- [32] Driga M. D., Weldon W. F., (1989), "Induction launcher design considerations", IEEE Transactions on Magnetics, 25(1), 153-158.
- [33] Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P., (1995), "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", 2nd ed., John Wiley & Sons.
- [34] Zabar Z., Naot Y., Birenbaum L., Levi E., Joshi P. N., (1989), "Design and power conditioning for the coil-gun", IEEE Transactions on Magnetics, 25 (1), 102-106.
- [35] He J. L., Zabar Z., Levi E., Birenbaum L., (1989), "Transient analysis of multisection induction-type coil-launchers", 7th Pulsed Power Conference, 140-143, Monterey, CA, USA.
- [36] Lu X. N., Zabar Z., Levi E., Birenbaum L., (1995), "Transition between two sections in a linear induction launcher (LIL)", IEEE Transactions on Magnetics, 31 (1), 493, January.
- [37] He J. L., Levi E., Zabar Z., Birenbaum L., (1989), "Concerning the design of capacitively driven induction coil guns", IEEE Transactions on Plasma Science, 17 (3), 429-438.
- [38] He J. L., Levi E., Zabar Z., Birenbaum L., (1993), "Equivalent circuits and parameters for induction-type electromagnetic launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 29(1), 667-670.
- [39] He J. L., Zabar Z., Levi E., and Birenbaum L., (1991), "Transient performance of linear induction launchers fed by generators and by capacitor banks", IEEE Transactions on Magnetics, 27 (1), 585-590.
- [40] Lu X. N., Levi E., Zabar Z., and Birenbaum L., (1993), "Behavior of azimuthal currents induced in the projectile of the linear induction launcher (LIL)", IEEE Transactions on Magnetics, 29 (1), 696-700.
- [41] Zabar Z., Lu X. N., Levi E., Birenbaum L., and Creedon J., "Experimental results and performance analysis of a 500 m/sec linear induction launcher (LIL)", IEEE Transactions on Magnetics, 31 (1), 522-527.
- [42] Zhang T., Guo W., Su Z., Cao B., Ren R., Li M., Ge X., and Li J., "Design and evaluation of the driving coil on induction coilgun", IEEE Transactions on Plasma Science, 43 (5), 1203-1207.

- [43] Balikci A., Zabar Z., Czarkowski D., Levi E., and Birenbaum L., (2001), "Flywheel motor/generator set as an energy source for coil launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 37 (1), 61-66.
- [44] Balikci A., (2008), "High velocity linear induction launchers", International Journal of Impact Engineering, 35, 1405-1409.
- [45] Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., (2009), "Improved energy utilization of linear induction launchers by considering each section as an individual sub-launcher", IEEE Transactions on Magnetics, 45 (1), 241-247.
- [46] Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D., (2007), "On the design of coilguns for super-velocity launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 43 (1), 107-113.
- [47] Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D., (2005), "Improved performance of linear induction launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 41 (1), 171-176.
- [48] Liu K., Xiao Z., Niu X., Zhang Y., (2017), "Research of varying frequency driving scheme for asynchronous induction coil launcher", IEEE Transactions on Plasma Science, 45 (7), 1567-1574.
- [49] Gulpinar F., Balikci A., (2022), "Driving asynchronous induction launchers: Design and simulation of a novel power conditioner with a brief review", Energies, 15 (24), 9360.
- [50] Orbach Y., Oren M., Golan A., Einat M., (2019), "Reluctance launcher coil-gun simulations and experiment", IEEE Transactions on Plasma Science, 47 (2), 1358-1364.
- [51] Zhu B., Lu J., Wang J., Xiong S., (2017), "A compulsator driven reluctance coilgun-type electromagnetic launcher", IEEE Transactions on Plasma Science, 45 (9), 2511-2517.
- [52] Lehmann P., Peter H., Wey J., (2001), "First experimental results with the ISL 10 MJ DES railgun PEGASUS", IEEE Transactions on Magnetics, 37 (1), 435-439.
- [53] McNab I. R., (2019), "Brief history of the EML symposia: 1980–2018", IEEE Transactions on Plasma Science, 47 (5), 2136-2142.
- [54] Zhang Y., Gong Y., Xiong M., Niu X., and Xiao G., (2018), "Study of a Multisection Synchronous Induction Coil Launcher", IEEE Transactions on Plasma Science, 46 (8), 2959-2964.
- [55] Zabar Z., Lu X. N., Birenbaum L., Levi E., and He J. L., (1991), "A 500 m/s Linear Induction Launcher", Eighth IEEE International Conference on Pulsed Power, 58-62, San Diego, CA, USA.

- [56] Jimenez-Gonzalez J., Delgado-Quintero J. M., Perez-Gomez C. A., Lopez-Garcia I., Jimenez-Mondragon V. M., Campero-Littlewood E., (2019), “Scalar Control of Squirrel Cage Induction Motors-Fundamentals and Scope”, IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2019), Ixtapa, Mexico.
- [57] Kaye R., et al., (2007), “Induction coilgun for EM mortar”, 16th IEEE International Pulsed Power Conference, 1810-1813, Albuquerque, NM, USA.
- [58] Aksoy S., Yavuz M. F., Balikci A., (2011), “Transient modelling of a linear induction launcher-type coil gun with two-dimensional cylindrical finite-difference time domain method”, IET Electric Power Applications, 5 (1), 153-158.
- [59] Aksoy S., Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., (2011), “Numerical Investigation of the Effect of a Longitudinally Layered Armature on Coilgun Performance”, IEEE Transactions on Plasma Science, 39 (1), 5-8.
- [60] Zabar Z., Lu X. N., Levi E., Birenbaum L., He J. L., (1991), “Test results for three prototype models of a linear induction launcher”, IEEE Transactions on Magnetics, 27 (1), 558-562.
- [61] Pendharkar S., (2018), “GaN and SiC enable increased energy efficiency in power supplies”, Texas Instruments.
- [62] Wibowo P. S., Riyadi S., (2019), “SPWM Volt/Hz Based Speed Control of Induction Motor,” 2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic), 482-486, Indonesia.
- [63] Lakka M., Koutroulis E., Dollas A., (2014), “Development of an FPGA-Based SPWM Generator for High Switching Frequency DC/AC Inverters,” IEEE Transactions on Power Electronics, 29 (1), 356-365.
- [64] Hasirci U., Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., (2015), “3-D FEM Analysis of a Novel Magnetic Levitation System”, IEEE Transactions on Plasma Science, 43 (5), 1261-1265.
- [65] Ataseven I., Sahin I., Ozturk S. B., (2023), “Design and Implementation of a Paralleled Discrete SiC MOSFET Half-Bridge Circuit with an Improved Symmetric Layout and Unique Laminated Busbar,” Energies, 16 (6), 2903.
- [66] Mohan S. S., del Mar Hershenson M., Boyd S. P., Lee T. H., (1999), “Simple accurate expressions for planar spiral inductances”, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 34 (10), 1419-1424.
- [67] Dogangun S., Balikci A., (2024), “Design and Implementation of a Linear Induction Launcher with a New Excitation System Utilizing Multi-Stage Inverters”, Energies, 17 (6), 1302.

ÖZGEÇMİŞ

Serkan Doğangüneş, 2011 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Akademik yolculuğuna devam ederek Gebze Teknik Üniversitesi'nde Güç Elektroniği alanında yüksek lisans yaptı ve 2016 yılında başarıyla tamamladı. Halen Gebze Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünde doktora eğitimine devam etmekte olup, Araştırma ve Geliştirme Mühendisi olarak on yılı aşkın mesleki deneyime sahiptir. DC-DC dönüştürücüler, akü şarj sistemleri, motor sürücüler, eviriciler ve elektromanyetik fırlatıcılar alanlarında uzmanlaşarak, bilgiyi ilerletme konusundaki kararlılığı ile bu alanlardaki araştırma ve geliştirmeye aktif katkı yapmayı hedeflemektedir. Evli ve 2 çocuk babasıdır.

TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

Dogangunes S., Balıkcı A., (2024), “Design and Implementation of a Linear Induction Launcher with a New Excitation System Utilizing Multi-Stage Inverters,” *Energies*, 17 (6), 1302.

