

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK -ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOĞRUSAL HAREKETLİ ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLÜ  
MEKANİK OSİLATÖR VE EVİRİCİ İLE KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Müh. Murat KÜÇÜKALİ**

**TEMMUZ 2008  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK –ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOĞRUSAL HAREKETLİ ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLÜ  
MEKANİK OSİLATÖR VE EVİRİCİ İLE KONTROLÜ**

**Elektrik-Elektronik Müh. Murat KÜÇÜKALİ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Elektrik Yüksek Mühendisi”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.06.2008  
Tezin Savunma Tarihi : 03.07.2008**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. H. İbrahim OKUMUŞ**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN**

**Enstitü Müdür V. : Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2008**

## ÖNSÖZ

Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motorların yapılarının, motor parametrelerinin incelendiği ve mekanik bir osilatör olarak kontrolünün gerçekleştirildiği bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır.

“Doğrusal Hareketli Asenkron Motor Sürücülü Mekanik Osilatör Ve Evirici İle Kontrolü ” adlı bu çalışmada, doğrusal hareketli asenkron motorlar kısaca incelenmiş, tüpsel yapılı doğrusal hareketli asenkron motor tasarımı ve mekanik bir osilatör olarak çalışacak şekilde kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle tüm hayatım boyunca beni destekleyen, dertlerime ortak olan, mutluluklarımı paylaşan annem, babam ve kardeşlerime sonsuz minnettarım.

Tez danışmanlığımı üstlenerek, gerek konu seçimi ve gerekse çalışmaların yürütülmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı yaparken bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ ve Yrd. Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ hocalarıma ayrıca teşekkür ederim.

Gerek motor gerekse kontrol devrelerinin tasarımında bilgi ve becerilerini esirgemeyen Ömür AKYAZI ve Emre ÖZKOP başta olmak üzere Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında çalışmalarını yürüten ya da tamamlamış arkadaşlara, bölümün değerli hocalarına gösterdikleri ilgiden dolayı teşekkür ederim.

Murat KÜÇÜKALİ

Trabzon 2008

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER .....	III
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLolar DİZİNİ .....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ .....	X
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Doğrusal Hareketli Makinelerin Tarihçesi .....	3
1.3. Doğrusal Hareketli Asenkron Motorları Yapısı .....	4
1.4. Doğrusal Hareketli Asenkron Motorların Üstünlükleri .....	7
1.5. Doğrusal Hareketli Asenkron Motorlar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar .....	8
1.6. Doğrusal Hareketli Motorların Sınıflandırılması .....	10
1.7. Doğrusal Hareketli Motorların Uygulama Alanları .....	12
1.8. Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motorlar .....	14
1.8.1. Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motorların Çalışma İlkesi .....	17
1.8.2. Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motorların Eşdeğer Devresi .....	18
1.9. Matematiksel Model .....	22
1.10. Karakteristik Eğriler .....	25
1.11. Tasarım Faktörleri .....	28
1.11.1. Hava Aralığı .....	28
1.11.2. İyilik Faktörü .....	28
1.11.3. Kutup Aralığı .....	29
1.11.4. Kutup Sayısı .....	29
1.12. Tasarım Adımları .....	30
1.13. Doğrusal Hareketli Asenkron Motorlarda Değişik Etkiler .....	32
1.13.1. Uç Etkisi .....	32

1.13.2.	Kenar Etkisi.....	33
1.13.3.	Boşluk Etkisi .....	34
1.14.	Eviriciler .....	35
1.14.1.	Bir Fazlı Eviriciler .....	36
1.14.2.	Üç Fazlı Eviriciler .....	37
1.14.3.	Altı Adımlı Evirici.....	38
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR .....	43
2.1.	Tasarımın Gerçekleştirilmesi .....	43
2.1.1.	Birincil Kısım.....	43
2.1.2.	İkincil Kısım.....	47
2.2.	Kontrol Kısımının Tasarımı .....	48
2.2.1.	Evirici İşaret Üretici.....	48
2.2.2.	Tümleşik Güç Devresi .....	50
2.2.3.	Yön Değiştirme Devresi .....	51
3.	SONUÇLAR .....	57
4.	ÖNERİLER .....	58
5.	KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ		

## ÖZET

Günümüzde birçok sistemde doğrusal hareket, dairesel hareket sağlayan döner hareketli elektrik motoru ve motor tarafından hareket ettirilen bir kayış veya dişli sistemi ile kurulan mekanizmalar ile gerçekleştirilmektedir. Döner hareketi doğrusal harekete dönüştürmek için bütün bu ilave alt sistemler gereklidir. Bu ilavelerden dolayı sürtünme kayıpları, eylemsizlik momentinde ve sistemin toplam kütleinde artma olur. Fakat daha az hareketli parça, kayıpların azaltılması ve daha uzun sürede daha az bakım ihtiyacı gibi özellikler bu tür sistemlerden beklenen özelliklerdir. Bu gereksinimleri karşılamak için ilave sistemleriyle birlikte döner hareketli motor yerine bir tüpsel yapıli doğrusal hareketli asenkron motor tasarımı amaçlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

İlk bölümde, doğrusal hareketli motorların yapısı, çeşitleri ve uygulama alanları, davranış kriterleri ve tasarım detayları hakkında bazı bilgiler verilmiştir. Ayrıca motor kontrol devresi ve altı adımlı eviricilerden bahsedilmiştir.

İkinci bölümde, mekanik bir osilatör olarak Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motor tasarımının gerçekleştirilmesi ve kontrol devresi anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, bazı deneysel sonuçlar elde edilerek motor ve elektronik kontrol sisteminin nasıl daha verimli hale getirilebileceği hakkında öneriler sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal Hareketli Mekanik Osilatörler, Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motor, Altı Adımlı Evirici

## SUMMARY

### **Mechanical Oscillator Driven By Linear Induction Motor And It's Control With Inverter**

Today, linear motion in numerous systems is realized by means of a mechanism set up by a conventional (rotary) electric motor providing circular motion and a belt system or gear system activated by the motor. All these subsystems are necessary to convert rotary motion to linear motion. Because of these additions, some problems occur such as frictions losses, increment in moment of inertia and mass of total system. But fewer moving parts, reducing losses and longer system life with less maintenance are features expected in such systems.

To meet these requirements, a tubular constructed linear induction motor design has been proposed to use instead of rotary motor with other additional systems and then realized.

In the first chapter, some information is given about structures, types and applications of linear motors and actuators, performance criterions and desing tips. The circuitry of the motor control and six-step inverter are mentioned as well

In second chapter, the realization of the Tubular Structured Linear Asynchronous Motor design as a mechanic oscillator and the control circuitry are explained.

In the third chapter, some experimental results are obtained to make suggestions about how to increase efficiency of the motor and control system.

**Key Words:** Linear Mechanic Oscillators, Tubular Structured Linear Induction Motor, Six-Step Inverter

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Döner hareketli motorun kesilerek açılması.....	4
Şekil 1.2. Arka demiri ile birlikte DHAM .....	5
Şekil 1.3. TYDHAM'un elde edilişi.....	6
Şekil 1.4. TYDHAM'un enine ve boyuna kesiti .....	7
Şekil 1.5. Doğrusal hareketli motorların sınıflandırılması.....	11
Şekil 1.6. Çok eksen uygulamalarına iki örnek: (a) paketleme sistemleri (b)düzenleme ve sıralama sistemleri.....	12
Şekil 1.7. Üretim sektöründe DHM kullanımı: (a) şişe dolum işlemlerinde (b) gıda kesme ve dilimleme işlemlerinde.....	13
Şekil 1.8. TYDHAM'un bir fazına ait sarımlar.....	15
Şekil 1.9. TYDHAM sac paketlerin birincil kısım oluklarına yerleştirilmiş durumu .....	16
Şekil 1.10. TYDHAM sac paketlerin enine yerleştirilmiş durumu .....	16
Şekil 1.11. TYDHAM nin çalışma ilkesi .....	18
Şekil 1.12. TYDHAM eşdeğer devresi .....	19
Şekil 1.13. (a) Arka demirli ikincil kısım (b) Boyuna laminasyonlu TYDHAM.....	20
Şekil 1.14. Dairesel enine laminasyonlu TYDHAM .....	21
Şekil 1.15. Belirsiz uzunluğa sahip TYDHAM'un taslak çizimi .....	23
Şekil 1.16. Manyetik alanın ikincil kısım yarıçapına göre değişimi .....	26
Şekil 1.17. İtme kuvvetinin doğrusal hıza bağlı değişimi.....	26
Şekil 1.18. Değişik besleme frekanslarında itme kuvveti ile doğrusal hızın değişimi .....	27
Şekil 1.19. Makine uzunluğuna bağlı doğrusal hız ile itme kuvvetinin değişimi .....	27
Şekil 1.20. $G_o$ 'ın kutup sayısına bağlı değişimi .....	31
Şekil 1.21. Sabit akımla beslenen DHM'da motor boyunca akı yoğunluğu değişimi.....	32
Şekil 1.22. Enine yönde normal akı değişimi.....	33
Şekil 1.23. Çekme kuvvetinin hava aralığına göre değişimi.....	34
Şekil 1.24. Akım ve itme kuvvetinin hava aralığına göre değişimi.....	35
Şekil 1.25. Şebeke gerilimi ve kontrol edilen bir a.a motor içeren evirici sistemi.....	36
Şekil 1.26. Bir fazlı sisteme ilişkin tam köprü evirici.....	37



Şekil 1.27. Üç fazlı eviricinin genel şeması .....	38
Şekil 1.28. Evirici çıkış gerilimlerinin faz-nötr dalga şekilleri .....	39
Şekil 1.29. Evirici çıkış gerilimlerinin faz-faz dalga şekilleri.....	40
Şekil 1.30. Evirici çıkış faz-faz ve faz-nötr gerilimlerine göre hat akımının değişimi.....	41
Şekil 2.1. Birincil kısım sargılarından birine ait ölçüler .....	45
Şekil 2.2. Kullanılan sac paketlerin ölçüleri.....	46
Şekil 2.3. Birincil kısım faz sargılarının bağlantıları.....	46
Şekil 2.4. TYDHAM'un mekanik kısmının tamamlanmış modeli.....	47
Şekil 2.5. Evirici işaret üreteç devresi.....	49
Şekil 2.6. Evirici işaret üreticinin gerçekleştirilmiş devresi .....	49
Şekil 2.7. IRAMS10UP60B entegrasi içeren güç katı devresi.....	50
Şekil 2.8. Yön değiştirme devresi.....	51
Şekil 2.9. Elektronik anahtarlama devresi ile mekanik kısmın bağlantıları.....	52
Şekil 2.10. Evirici frekansı $f = 15$ Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli ( $P= 37,5$ Watt, $v=27,10$ volt, $i = 2,15$ Amper ).....	53
Şekil 2.11. Evirici frekansı $f = 20$ Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli ( $P= 27,5$ Watt, $v=27,80$ volt, $i = 1,68$ Amper ).....	53
Şekil 2.12. Evirici frekansı $f = 25$ Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli ( $P= 22,5$ Watt, $v=28,10$ volt, $i = 1,39$ Amper ).....	54
Şekil 2.13. Evirici frekansı $f = 30$ Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli ( $P= 20$ Watt, $v=28,10$ volt, $i = 1,16$ Amper ).....	54
Şekil 2.14. Evirici frekansı $f = 40$ Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli ( $P= 17,5$ Watt, $v=27,83$ volt, $i = 1,02$ Amper ).....	55
Şekil 2.15. Evirici frekansı $f = 50$ Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli ( $P= 13,75$ Watt, $v=28,08$ volt, $i = 0,87$ Amper ).....	55
Şekil 2.16. Evirici frekansı $f = 60$ Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli ( $P= 11,25$ Watt, $v=28,09$ volt, $i = 0,78$ Amper ).....	56
Şekil 2.17. Evirici frekansı $f= 60$ Hz iken motora uygulanan $120^\circ$ faz farklı iki faz-faz geriliminin dalga şekli .....	56

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1. İlave soğutma olmaksızın sürekli çalışma durumunda DHM'ların nominal güçleri.....	12
Tablo 1.2. DHM'ların kullanım alanları .....	14
Tablo 1.3. Parametre Değişikliklerinin Performansa Etkileri .....	30
Tablo 1.4. Anahtarların kapalı durumları.....	38
Tablo 1.5. Çıkış gerilimleri genliklerinin aralıklara göre değişimi .....	39
Tablo 2.1. Tel çapına göre, 1cm <sup>2</sup> alana sığacak sarım sayısı .....	44

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A$	Vektörel manyetik potansiyel
$A_{tel}$	Tel kesit alanı
$B$	Manyetik akı yoğunluğu
$C$	Kapasite
$d$	İkincil kısım et kalınlığı
$F_x$	İtme kuvveti
$G$	İyilik faktörü
$G_e$	İyilik faktörünün etkin değeri
$H$	Manyetik akı şiddeti
$i$	Akım
$k_w$	Sargı faktörü
$k_c$	Carter katsayısı
$L$	İndüktans
$N$	Sarım sayısı
$R$	Direnç
$s$	Kayma
$U$	Doğrusal hız
$W$	Sarım sayısı
$X_m$	Manyetik reaktans
$\nabla$	Nabla Operatörü
$\mathfrak{S}$	Yüzey akım yoğunluğu
$\mu_0$	Manyetik geçirgenlik (hava)
$\eta$	Verim
$\sigma$	İletkenlik
$\tau$	Birincil kısım kutup adım aralığı

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Teknolojideki gelişmelere bağlı olarak doğrusal hareket elemanlarına alternatif çözümler eklenmektedir. Gelenekselleşmiş doğrusal hareket sistemleri olan hidrolik, pnömatik, vidalı mil ve diğer elektromekanik çözümlere alternatif olarak doğrusal motorların kullanımı giderek artmaktadır [1].

Tipik doğrusal hareket elemanları, Doğrusal Hareketli Motor (DHM)'lar, hidrolik silindirlere ve kontrol valfleridir. Her birinin kendine özgü üstünlükleri-sakıncaları ve çeşitli kullanım alanları vardır. Elektriksel, hidrolik ve pnömatik üç değişik doğrusal hareket sistemi içinde en az donanım ve bakım gerektiren kısım elektriksel olanlardır [1].

En yaygın doğrusal hareket elemanları, etkili ve çok yönlü bir elektriksel enerjinin mekanik enerjiye dönüştürücüsü olan elektrik motorlarıdır. DHM'ların birçok uygulaması özellikle robotik alanı içinde, kontrol sistemlerinde görülebilir. Doğrusal hareketli motor ve selonoid gibi bazı cihazlar elektrik enerjisini doğrusal harekete doğrudan dönüştürebilirler.

Hidrolik tabanlı doğrusal hareket elemanları genelde ağır iş makineleri ve benzer sistemlerde kullanılır. Hidrolik teknolojisi bu tür uygulamalar için uygundur çünkü gerekli hidrolik basınç makinenin motor gücüyle rahatlıkla elde edilebilir. Fakat tepki süresinin çok uzun olması uygulama alanlarını kısıtlamaktadır.

Pnömatik tabanlı doğrusal hareket elemanları güç yoğunluğu yüksektir fakat yüksek güç yoğunluğuna bağlı olarak hassasiyeti düşmektedir.

Diğer bir çeşit doğrusal hareket kaynağı, öncülük yapan vidaya sahip döner hareketli elektrik motorları veya döner hareketi doğrusal harekete çeviren diğer dönüştürücü bağlantılara sahip döner hareketli motorlardır. Bazı zorluklara rağmen vidalı doğrusal motorlar bariz bir şekilde doğrusal hareket gerektiren uygulamalarda en çok kullanılan motorlardır.

Doğrusal hareketi elde etmenin en uygun ve en doğal yolu doğrusal hareketli motorlardır. DHM'lar cazip avantajları ile diğer sistemlere karşı ciddi bir alternatif konumuna gelmektedir. Araştırmacıların çalışmalarını doğrusal hareketli motorlar üzerinde yoğunlaştırmasını sağlayan iki ana etken vardır.

Bunlardan birincisi manyetik temelli malzemelerin işlenmesi ve maliyetlerinin eskiye göre çok daha makul olmasıdır. İkinci olarak da sayısal kontrol ve güç elektroniği teknolojisindeki gelişmeler, yüksek performanslı cihazların yüksek hassasiyetlerde ölçülebilir ve kontrol edilebilir hale gelmesini sağlamıştır.

Diğer taraftan hidrolik sistemlerde enerjinin yağ basıncına, pnömatik sistemlerde hava basıncına dönüşmesi ve olası arızalarda ve normal seyrindeki gürültü dâhil kirlilikler, doğrusal motorları daha da tercih edilir kılmaktadır. Elektromekanik sistemlerin içerdiği vidalı mil, kayış, kremayer dişli v.b aktarma ve çevrimlerden kaynaklanan mil yatağı ve boşluk sorunları doğrusal motorlara ilgiyi giderek artırmaktadır [1].

DHM kullanılmayan sistemler, içerdikleri enerji çevrimleri ve mekanik detaylar potansiyel arıza ve dolayısı ile bakım ihtiyacı gerektirmektedir. Özellikle döner hareketten doğrusal hareketin elde edildiği elektromekanik sistemlerde performansla direk etki eden geri besleme sistemlerinde algılayıcı-dönüştürücü, kodlayıcı v.s harici olarak sağlanması, mekanik ve elektronik harici bağlantıları da beraberinde getirmektedir [1].

Genel olarak her yeni eleman ve bağlantı noktası hem sisteme ek yük getirmekte hem de sistemi daha karmaşık hale getirmektedir. Oluşan bu karmaşıklıklar sonucu sistemlerde boşluklar, geri tepmeler meydana gelmekte ve döner hareketi doğrusala çevirmek için kullanılan dişli, redüktör gibi elemanlar sistemin kütlesini artırmaktadır.

DHM'ların hidrolik ve pnömatik sistemlere göre belirgin üstünlükleri vardır. Bunlar:

1. Bağlantı için sadece kablo gerektirir, borularla bağlantı gerektirmez.
2. Pompa ve tank gibi destekleyici ilave donanım gerektirmezler
3. Hidrolik sistemlere göre daha az karmaşıktırlar.

Bütün bu tespitler ışığında karar verilen bu tezin amacı, Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motor (TYDHAM) tasarımı yapmak ve bu motorun bir mekanik osilatör olarak kontrolünü sağlamaktır. İlk önce TYDHAM tasarımı gerçekleştirilip daha sonra evirici ile ileri-geri yönlerde periyodik bir hareket yapmasını amaçlanmıştır. Ayrıca bu hareketin hızı, şebeke geriliminin frekansından bağımsız olarak değiştirilebilen bir frekans ile ayarlanabilecektir.

## 1.2. Doğrusal Hareketli Motorların Tarihçesi

Doğrusal Hareketli Motor tarihi 19. yy sonlarına dayanmaktadır. Bu makineler daha sonraki 30–40 yıl boyunca pratikte kullanılmadı fakat DHM konusunda çeşitli araştırmalar yapıldı [2].

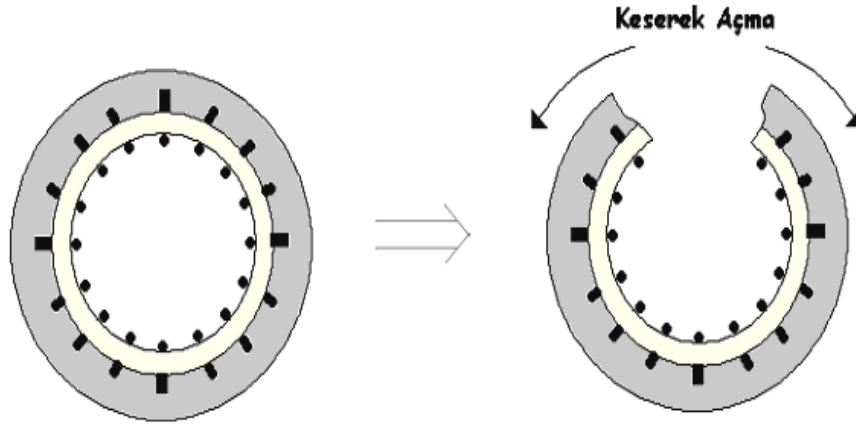
Literatürdeki çalışmalardan yapılan derlemelerde – bir kısım araştırmacılar konu ile ilgili farklı tarihler vermesine rağmen- Doğrusal Hareketli Asenkron Motor (DHAM) fikri Tesla, Dolivo-Doborovolsky ve Ferrari'nin 1885 yılında döner alanlı makineyi icat etmesiyle hemen hemen aynı zamana denk gelmektedir. İlk DHM, Charles Wheatstone tarafından 1845 de yapılmış olan bir relüktans makinesidir ve hemen ardından benzer makine Henry Fox Talbert tarafından yapıldı. Nicola Tesla 1888'de indüksiyon motorunu icat etti. İlk asenkron motor patenti 1895 yılında Pittsburgh belediye başkanı tarafından alındı. İlk elektromanyetik silah 1918 yılında yapılan 'Birkeland Silahı' isimli bir relüktans makinesiydi ve bu makine, belirli bir periyotta doğru gerilimle enerjilendirilen bobinlerin kullanıldığı ilk tüpsel yapılı motordur. 1946 yılında Westinghouse şirketi tarafından uçak fırlatıcı olarak ilk geniş amaçlı doğrusal hareketli asenkron motor kullanılmıştır.

Doğrusal hareketli elektrik makinelerinin topolojisi yaklaşık son 30 yıldır bilinmekte ve kavramsal olarak motorların bütün tiplerinin (doğru akım, asenkron, senkron ve relüktans) doğrusal konfigürasyonları mümkündür. Bununla beraber doğrusal hareketli doğru akım motoru ve doğrusal hareketli senkron motorlar, donanım uygulamasını karmaşık hale getiren çift uyartım (alan ve endüvi) gerektirir. Relüktans motor ise endüklenmiş veya harici olarak ikincil uyartıma sahip olmadığından dolayı zayıf itici karakteristiğe sahiptir. Bundan dolayı dikkatin çoğu DHAM üzerinde yoğunlaştırılmıştır[1].

Günümüzde doğrusal hareketli makinelerin kullanım alanı, teknolojiye gelişmeler dâhilinde çok daha fazla yaygınlaşmıştır. Trenlerde, yürüyen merdivenlerde, asansörlerde, yazıcılarda, fotokopi makinelerinde, fabrikalardaki ürün işleme ayırma ve paketleme süreçlerinde v.b. birçok alanda artık DHM'lar kullanılmaktadır.

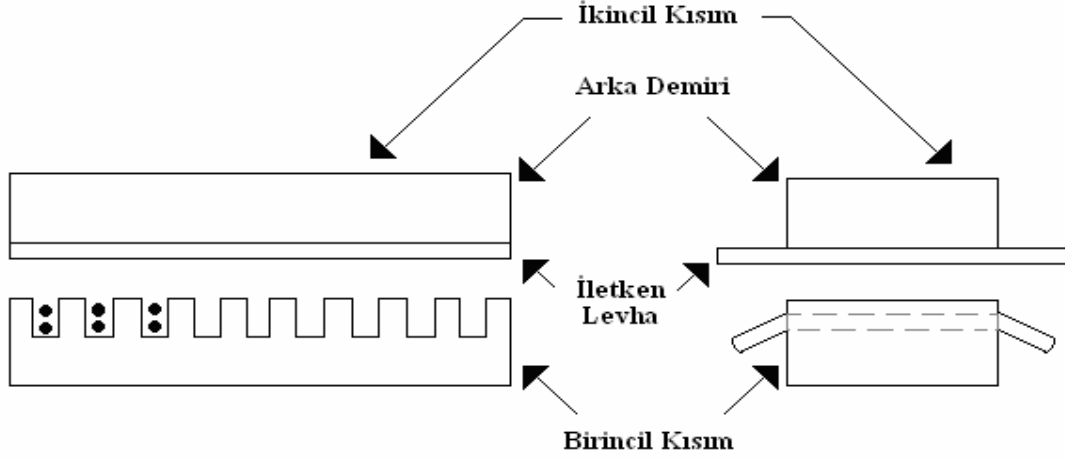
### 1.3. Doğrusal Hareketli Asenkron Motorların Yapısı

DHM, Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi döner hareketli bir sincap kafes asenkron motorun kesilip açılmasıyla oluşan durum dikkate alınarak düşünülebilir. Böylece düzlemsel yapıya sahip doğrusal hareketli motor elde edilebilir. Bu motor, ikincil kısmı sincap kafesli bir motorun doğrusal gösterimidir. Burada sincap kafes sac paketindeki demire gömülü ve her iki ucundan kısa devre çubukları ile kısa devre edilmiş parçalı iletkenlerden oluşur [2].



Şekil 1.1. Döner hareketli motorun kesilerek açılması [2].

Diğer taraftan Şekil 1.2.'de ikincil kısmı, arkasına demir konulmuş iletken levha malzemeden oluşan basit bir konfigürasyondur. Normalde levha şeklindeki ikincil kısmın oluşturulması için alüminyum gibi bir malzeme kullanılmasına rağmen demir gibi bir manyetik malzeme de kullanılabilir. Arka demiri yekpare veya sac paket olabilir veya eğer iletken malzemesinin kendisi manyetik malzemeden yapılırsa ayrıca arka demirine gerek kalmayabilir [2].

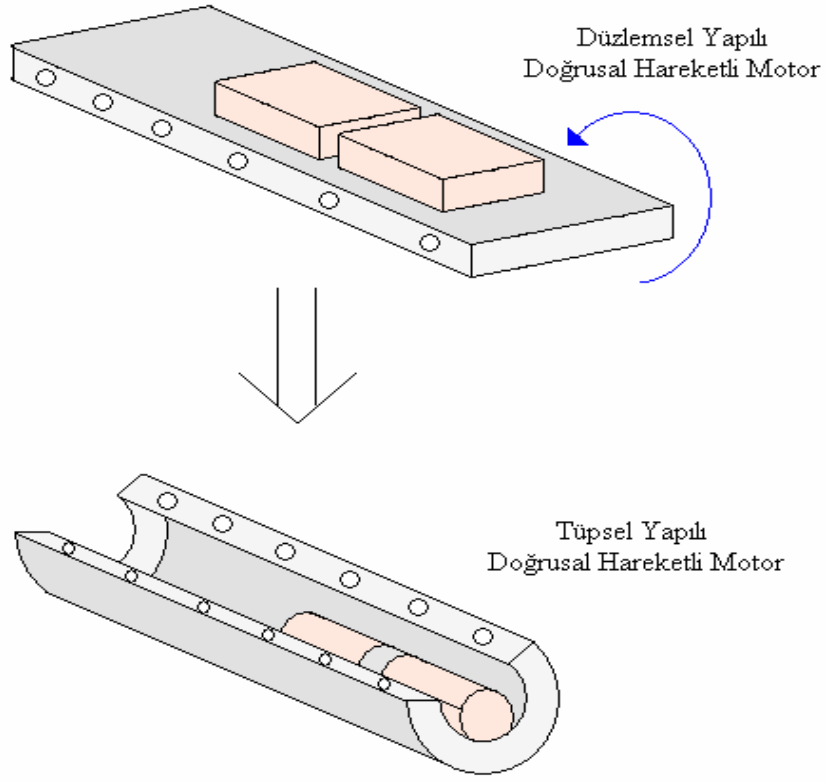


Şekil 1.2. Arka demiri ile birlikte DHAM [2].

DHM'un çalışma prensipleri ve karakteristikleri temelde döner motorunkine benzemektedir. Döner hareketli motorda birincil kısım sargıları kendileri üzerine konulduğundan, hava aralığındaki elektromanyetik alanların yarım periyotları kutup adımına eşit olarak uzaya göre periyodiktir. Bununla beraber DHM'nin kısa elemanı sonlu uzunluğa sahip ve açık uçludur dolayısıyla öncü ve kuyruk kenarları açıkça tanımlanabilir. Bundan dolayı DHM'nin hava aralığındaki elektromanyetik alanlar uzaya göre sürekli olarak periyodik olmayıp motorun uzunluğu boyunca değişir ve her iki uçta motorun uzunluğundan daha ileri gider. Bu kavram genelde DHM'lerde uç etkileri olarak adlandırılır. Uç etkisi (kuyruk kenarının daha ilerisine uzandığından) simetrik değildir. Doğrusal hareketli motor ve döner hareketli motorun her ikisi enine yönde sonlu genişliğe sahiptir fakat kenar etkisi olarak adlandırılan etki, büyük hava aralığından dolayı DHM'lerde daha yüksektir. Bir DHM'nin verimi ve güç faktörü de genelde büyük hava aralığından dolayı döner makinelerle karşılaştırıldığında daha zayıftır [2].

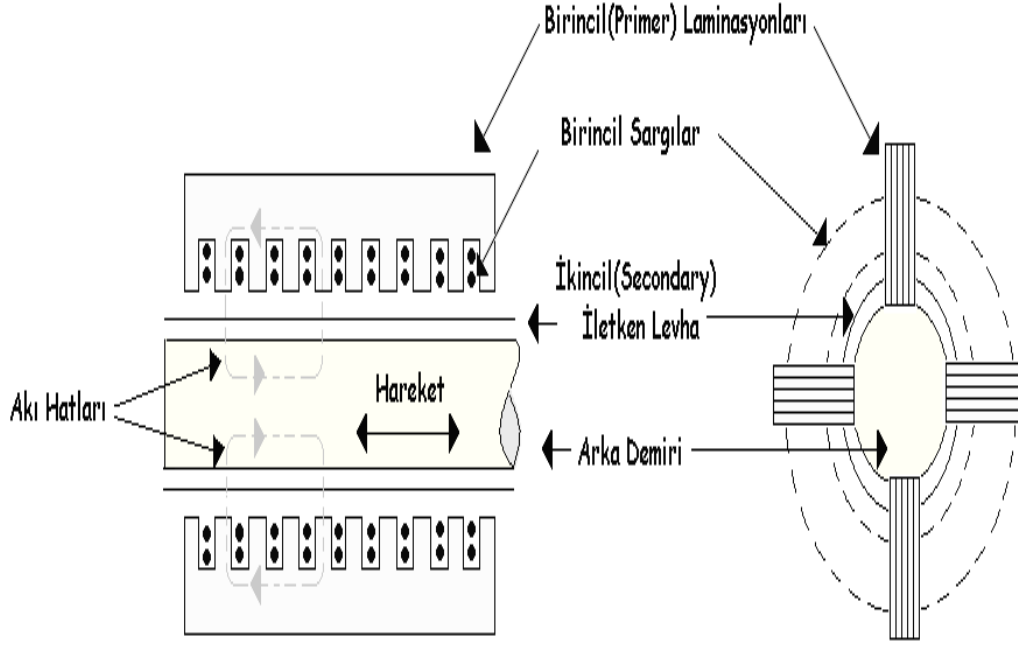
DHM'nin topolojisi incelendiğinde döner hareketli asenkron motorun açılarak DHAM'yi oluşturduğu görülmüştü. Bu durumda döner motorun çevresi DHM'nin uzunluğu olur. Eğer kutup adımı DHAM'nin genişliği ile karşılaştırıldığında büyük ise birincil sargısının omik direnci ve kaçak reaktansı uzun sargı uçlarından dolayı artar ve etkin sargı uç sargı direnci de artar. Bundan dolayı motor doğal olarak verimsiz olacaktır. Bazı uygulamalar için DHAM'nin enine yönde yeniden yuvarlanması ile farklı bir topoloji geliştirilebilir [2]. Genişlik, Şekil 1.3.'de görüldüğü gibi çember şeklini alacak şekilde yuvarlanırsa TYDHAM elde edilir.





Şekil 1.3. TYDHAM'un elde edilişi [2].

Burada birincil kısım sargılarının sürekliliğinin sürdürülmesi için uç sargılarının gerekli olmadığı hemen anlaşılacaktır. İletkenlerin kendileri kesintili sargıların oluşturulması için yuvarlanabilir. Motor hala doğrusaldır çünkü serbestlik derecesi çevrimsel harekettir. Böyle DHAM türü Şekil 1.4.'de görülmektedir. Manyetik akı çizgileri boyuna veya eksenel yön boyunca bir düzlemde kendileri üzerine kapanır. Bu motor bundan dolayı Eksenel Akı veya Boyuna Akılı Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motor (BATYDHAM) olarak adlandırılır [2].



Şekil 1.4. TYDHAM'un enine ve boyuna kesiti [2].

Dairesel birincil kısımda sac paketlere sahip olunmasına gerek olmadığı görülebilir; şekilde görüldüğü gibi birincil kısmın çevresi etrafında sınırlı sayıda sac paketi kullanılabilir.

#### 1.4. Doğrusal Hareketli Motorların Üstünlükleri

Daha önce de kısaca bahsedildiği gibi doğrusal hareketli motorlar, kullanıldıkları sistemin hem maliyetini azaltmakta hem de verimini artırmaktadır. Doğrusal hareketli motorların üstünlükleri genel olarak şöyledir [3]:

- Yüksek hız: Doğrusal Hareketli Motorlarda hız besleme gerilimine ve kontrol devresine bağlıdır. Tipik olarak DHM lar, saniyede 3 mt (1 mikron hassasiyet), daha düşük hassasiyetlerde 5 mt/sn ye ulaşmaktadır.
- Yüksek hassasiyet: DHM sürücülü sistemlerde doğruluk, kararlılık ve tekrarlanabilirlik gibi değişkenler geri besleme devresine sistemine bağlıdır. Geri besleme devresinin elverdiği nispete doğruluk ve kararlılık öncelikle maliyete ve kontrol devresinin limitlerine bağlıdır.

- Yüksek Tepki Hızı: DHM sürücülü sistemlerde tepki hızı mekanik iletimli sistemlerdeki tepki hızından yaklaşık 100 kat daha fazladır.
- Mekanik bağlantılar (aktarma, kavrama, redüktör gibi) olmadığı için verim daha yüksektir.
- Yine mekanik iletim(aktarma) olmadığı için makinede boşluk (salgı)oluşmaz.
- Günümüz DHM lerinde temas parçaları olmadığı için aşınma çok azdır.
- Aynı noktalara tekrar hareketinde mükemmel sonuçlar verir.
- Uzun ömürlü ve daha az bakım gerektiren bir çalışma sergiler
- Yaptığı iş diğer sistemlerle karşılaştırıldığında; çok kompakt bir yapıdadır.
- Sınırsız uzunluklarda aynı hız ve hassasiyet değerlerini yakalar.

Bununla birlikte DHM'lar bazı olumsuzluklara sahiptir. Bunlar [1]:

- Motor sıcaklığı performansını direk etkiler.
- Motorun, stator ve rotor arasındaki çekim kuvvetinin büyüklüğü yatay da elde edilen kuvvetin 2 ila 5 katı kadardır. Motor seçimi yapılırken göze alınacak en önemli faktördür.
- Yüksek hassasiyet mekanikle birlikte sağlanabileceğinden, tasarımın da bunu destekler şekilde olması gerekir.
- Manyetik alan demiri çeker. Büyük güçte manyetik alan oluştuğu bilindiğinden uygulamada bu kritere dikkat edilmelidir.
- Makine kontrol elemanı ile motor arasında bir ara yüz birimine ihtiyaç vardır.

### 1.5. Doğrusal Hareketli Motorlar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Doğrusal hareketli motorların uygulama alanları hakkında birçok araştırma yapılmıştır. Genel olarak incelendiğinde yapılan bazı çalışmalar, doğrusal hareketli motorların birçok uygulama alanı olduğunu ve bazı uygulamalarda da döner hareketli motorlardan daha verimli olduklarını göstermişlerdir.

Budig, doğrusal hareketli motorların uygun olduğu birçok uygulama alanı önerdi [4]. Doğrusal hareketli motorlar, tekstil sektöründe iplik sarma gibi yüksek güç uygulamalarından mikroskop veya lazer ışınına maruz kalan ve hassas hareketlerle yönlendirilen birçok makinede sürücü olarak kullanılmaktadır. Doğrusal hareketli motorların birçok türü bulunmaktadır ve kullanılacağı sistemin gereklerine göre en uygun

motor çeşidi belirlenir. Doğrusal hareketli motorlar düz veya tüpsel (silindirik) yapılı olabilirler veya döner hareketi doğrusala çevirmek için kullanılabilirler.

Pandian, pnömatik aktüatörlerin sahip olduğu bazı avantajlardan söz etmiştir ve klasik elektrik motorlarının kullanıldığı bazı uygulamalarda kullanılması için bir döner hareketli pnömatik motor tasarımı önerdi [5].

Takamera, pnömatik ve klasik elektrik motorlarının avantajlarını artırmak için her ikisinin bir birleşimini önerdi [6].

Lequesne, 5 mm.'den 20 mm.'ye kadar doğrusal hareket gerektiren uygulamalarda kullanılacak doğrusal hareketli motor tasarımı için birçok performans kriteri keşfetti [7].

Kim ve çalışma arkadaşları, demir çekirdeği olmayan tüpsel yapılı doğrusal hareketli sürekli mıknatıslı asenkron motorlarında Halbach mıknatıs dizisi kullanımını incelediler [8].

Ishiyama, görüntü okuma cihazı ve diğer bazı uygulamalar için bir tüpsel yapılı doğrusal hareketli sürekli mıknatıslı motor tasarladı [9]. Bu tasarım, ilk kısmı birbirine zıt kutuplarda ardı sıra yerleştirilmiş sürekli mıknatıslı hareketsiz yapıdan oluşur. Diğer kısım, bir seri halka şeklinde bobin iç kısmında hareketli bir silindire sabitlenmiştir. Mıknatıs dizisini sabitlemek için her iki ucuna mil yatakları yerleştirilmiştir.

Zhu, bir tüpsel yapılı sürekli mıknatıslı doğrusal hareketli motor tasarımından söz etmiş ve oluk etkisini en aza indirme konusunu inceledi [10].

Ikeda, dijital işaret işleme teknolojisini kullanarak DHM'ler için bir kontrol metodolojisi geliştirdi [11].

Liaw, daha sağlıklı konum kontrolüne sahip doğrusal hareketli sürekli mıknatıslı motor tasarımı konusunda çalışmalar yaptı [12].

Shieh ve Tung, imalat sanayisinde kullanılacak doğrusal hareketli sürekli mıknatıslı motor tasarımı konusunda çalışmalar yaptılar [13].

Brückl, yüksek hassasiyetli makine ekipmanlarında doğrusal hareketli motor kullanımını inceledi [14].

Lee, oluklu yapıya sahip silindirik doğrusal hareketli motor prototipi yaptı [15]. Burada oluklu yapı hem kurulumu kolaylaştırmakta hem de aşırı ısınmaları engellemektedir.

Jaroslav ve çalışma arkadaşları, DHAM ile yaptıkları deney sonuçlarında, uygun motor ekipmanları ve elektriksel devreler kullanıldığında DHAM'ların çok güvenilir olduğu tespit ettiler [16].

Freitas ve çalışma arkadaşları, yüksek performanslı ve daha hafif yapıya sahip 3-fazlı tüpsel yapıya doğrusal hareketli asenkron motor tasarımı için yaptığı çalışmalar sonucunda itme kuvvetinin rotor ortalama çapı ve kutup sayısı ile; gerilimin ise sargı teli çapıyla yakından alakalı olduğunu tespit ettiler [17].

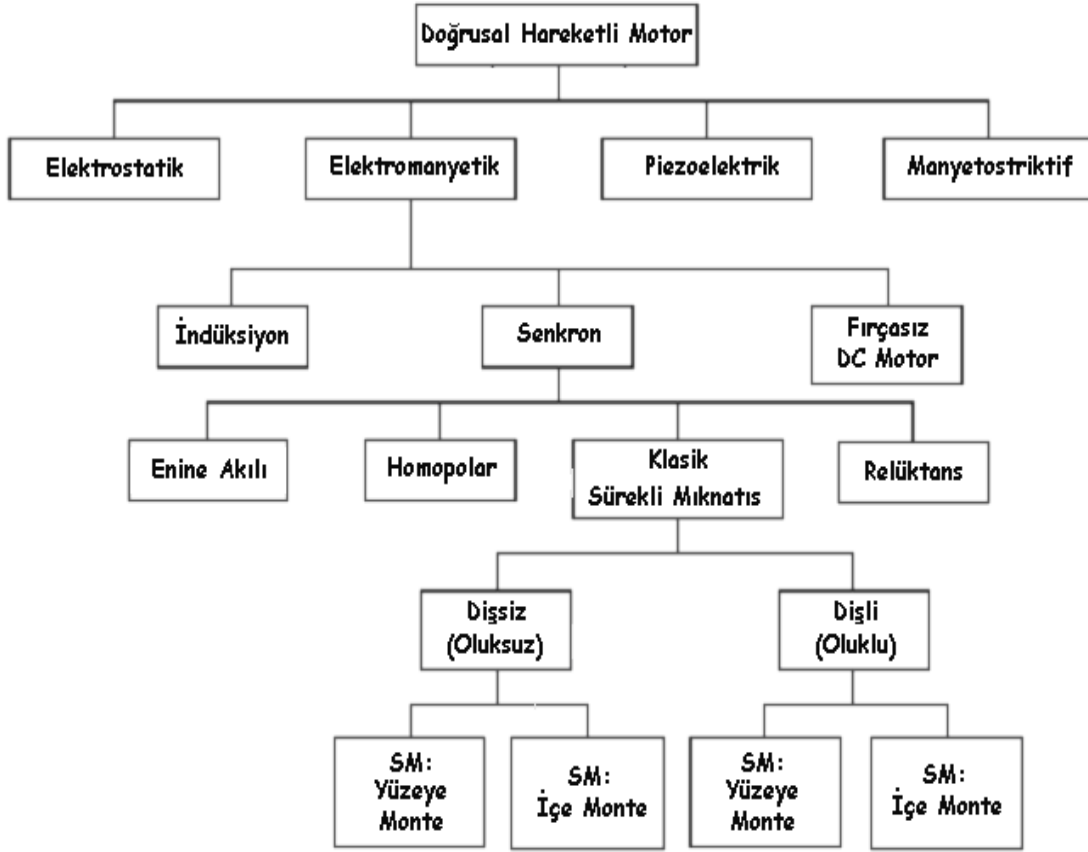
### **1.6. Doğrusal Hareketli Motorların Sınıflandırılması**

Doğrusal hareketli motorlar üretilen kuvvetlerin kullanımı, çalışma şekli ve kullanım alanına bağlı olarak birçok çeşide sahiptir. Doğrusal hareketli motorların sınıflandırılmasına ait bir gösterim Şekil 1.5.'de verilmiştir.

Motor hareketinin elde edilme prensibine göre elektrostatik, elektromanyetik, piezoelektrik ve manyetostriktif doğrusal hareketli motorlar olmak üzere dört ana gruba ayrılabilir [18].

Elektrostatik motorlarda cam bir yol üzerinde elektrostatik özelliğinden yararlanılır. Maksimum güç yoğunluğu yaklaşık olarak  $16 \text{ N/m}^2$  olarak elde edilebilmektedir. Bu çalışmaya da konu olan diğer tür motorlar doğrusal hareketi elektromanyetik yoldan elde ederler. Üçüncü ve dördüncü tür doğrusal hareket elde etme yöntemlerinde ise mekanik sürtünme esaslı piezoelektrik ve manyetostriktif etkileşimlerden yararlanılır. Piezoelektrikte kuvvet elektrik alan tarafından; manyetostriktifte ise manyetik alan tarafından üretilir [18].

Bu gruplar içerisinde kullanım alanı ve çeşidi olarak döner hareketli motorlarda da olduğu gibi en yaygın olanı elektromanyetik alan prensibine göre çalışan motorlardır.



Şekil 1.5. Doğrusal hareketli motorların sınıflandırılması [18].

DHM'lar, yapı ve çalışma şekillerine göre farklı büyüklüklerde güç üretirler. DHM türüne göre ürettikleri nominal güçleri Tablo 1.1.'de verilmiştir.

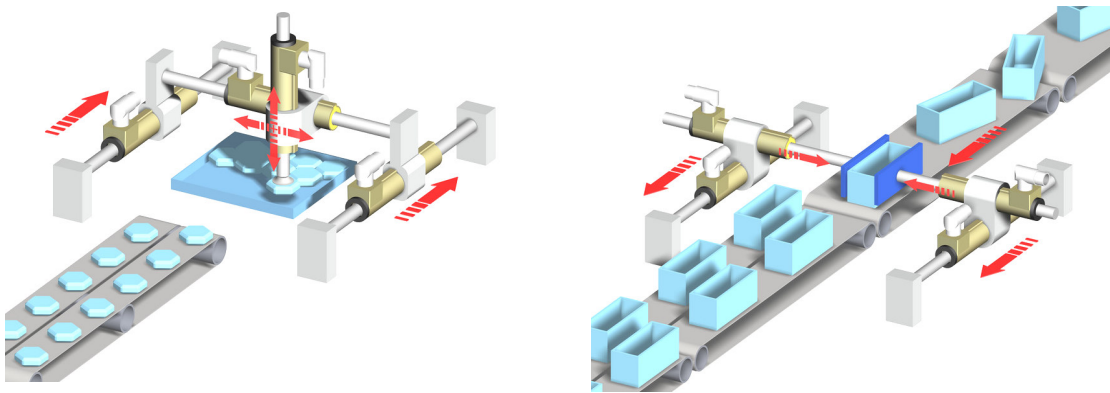
Tablo 1.1. İlave soğutma olmaksızın sürekli çalışma durumunda DHM'ların nominal güçleri [18].

Doğrusal Hareketli İndüksiyon Motoru	1-2 N/cm <sup>2</sup>
Oluklu Sürekli Mıknatıslı Senkron DHM	6 N/cm <sup>2</sup> ye kadar
Oluksuz Sürekli Mıknatıslı Senkron DHM	3 N/cm <sup>2</sup> ye kadar
Doğrusal Hareketli Relüktans Motor	1.5 N/cm <sup>2</sup>
Enine Akıllı DHM	3 N/cm <sup>2</sup>
Doğrusal Hareketli Piezoelektrik Motor	Motor yapısına göre
Doğrusal Hareketli Manyetosrikatif Motor	Motor yapısına göre
Doğrusal Hareketli Elektrostatik Motor	16 N/cm <sup>2</sup>

### 1.7. Doğrusal Hareketli Motorların Uygulama Alanları

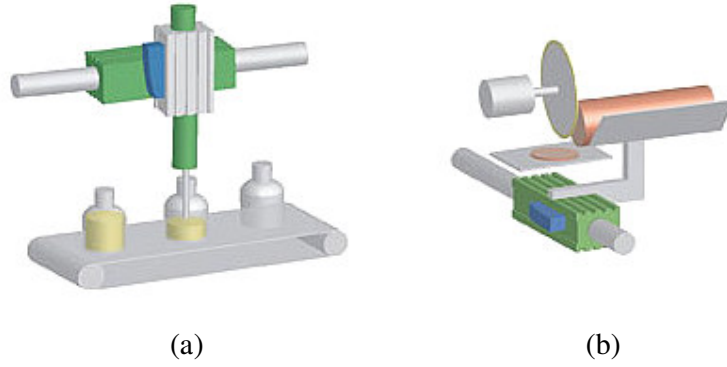
Doğrusal hareketli motor ve aktüatörler günlük hayatın birçok alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle üretim aşamasından son kullanıcıya kadar olan sürecin her aşamasında kullanılabilir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir [1]:

- Multi-eksen uygulamalar: dik işlem uygulamalarında, ambalaj ve taşıma sistemlerinde yüksek hızlarda ve yüksek güçlerde alışılmış sistemlerin çok üzerinde performans sağlar.



Şekil 1.6. Çok eksen uygulamalarına iki örnek: (a) paketleme sistemleri, (b) düzenleme ve sıralama sistemleri

- Vibratör olarak montaj makinelerinde malzeme besleme uygulamaları.
- Transfer pompaları: Emme ve basma hızları ve stokları programlanarak değiştirilebildiğinden esnek çalışma şartları sağlar.
- Üretim sektörünün birçok aşamasında daha verimli çalışma sağlarlar.



Şekil 1.7. Üretim sektöründe DHM kullanımı: (a) şişe dolum işlemlerinde  
(b) gıda kesme-dilimleme işlemlerinde

- Vana kontrolü: Buhar, sıvı ve gaz vanalarının hassas oransal kontrollerinde, yüksek güçlerde basit çözümler sunar.
- Kaynak, sürme ve prese: Yüksek güçlerin mükemmel kontrolü tek bir sistemle çözülür.
- Eğlence Sektörü: Çevre dostu özellikleri ile karmaşık hidrolik sistemler yerine tercih edilir.

Genel olarak DHM'ların kullanım alanlarına ait bilgi Tablo 1.2'de verilmiştir.



Tablo 1.2. DHM'lerin kullanım alanları [19].

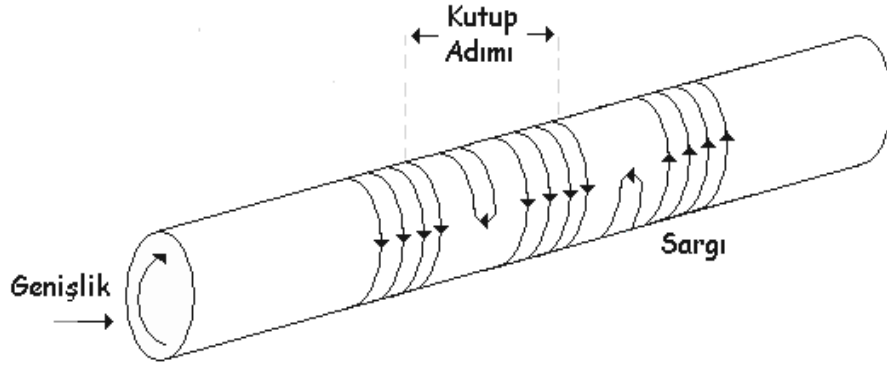
Kayan Kapılar	Asansörlerde	Depo (Ambar vs.) Otomasyonu
Krenlerde Sürücü Sistem Olarak	Sahne, perde Hareketleri	Karıştırma (Mikser) Sürücüsü Olarak
Hurda vs. Taşıma	Döner Kapılarda	Bagaj Taşımada
Doğrusal Hızlandırıcılarda	Esnek İmalat Sistemlerinde	Yolcu Taşımacılığında
Gemi Test Tanklarında	Vagonların Alt Düzeneklerinde	Hedef Hareketlerinde (Askeri Alanda)
Çelik Tüp Hareketlerinde	Sarım İşlemlerinde	Metal Levha Hareketlerinde
Robot Sistemlerinde	Konveyör Sistemlerinde	Hidrolik Silindirlerin Yerine
Pnömatik Silindirlerin Yerine	Çip, yonga vs. gibi Yarıiletken İmalatında	Hacimsel Pompalarda
Medikal Ekipmanlarda	Parça Kesme İşlemlerinde	Paketleme Makinelerinde
Eğlence Sektöründe	Biçimlendirme İşlemlerinde	Hassas Öğütücülerde
Kalıpcılıkta	Hassas Vana Kontrolünde	Havalandırma Sistemlerinin Kontrolünde
Simülatörlerde	Parça kesme işlemlerinde	Test düzeneklerinde

### 1.8. Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motorlar [20]

Genellikle TYDHAM'lerin birincil kısım bobin sargılarında ve ikincil kısım akım yollarında uç bağlantıları yoktur. Ama enine akıllı TYDHAM'lerde bu etkiler ortaya çıkar. Dahası, sıfır net normal kuvvet (döner hareketli makinelerde olduğu gibi) doğrusal yataklarda kolayca kaymayı sağlar. Fakat burada ikincil kısmın doğrusal hareketinin uzunluğu birincil kısımdan 1–1,5 m daha fazla olması durumunda mekanik hizalama problemleri ortaya çıkar.

Düşük hız ve durağan hal gibi özel uygulamalarda bu bahsedilen çalışma şartları ve kısıtlamalar göz önüne alınarak seçilecek motorun düzlem yapılı mı yoksa tüpsel yapılı mı olması gerektiğine karar verilir. TYDHAM'ler imalatı en kolay motorlardandır.

Bu motorlar, birincil kısımlarında demir çekirdek olmaksızın bile imal edilebilirler. Hava çekirdekli 3-fazlı bir TYDHAM'nin herhangi bir fazına ilişkin sarımlar Şekil 1.8.'de gösterilmiştir. Bu şekilde iki veya daha fazla sargı uygun polaritelerde, belirli mesafelerde bir tüp yapı üzerine sabitlenerek birincil kısma ait 3-faz sargıları elde ediliş olur. 3-fazlı bir kaynak tarafından enerjilendirilen sargılar, belirli bir yönde hareket eden bir manyetik alan oluştururlar. Birincil kısmı hava çekirdekli olan bir TYDHAM'nin ikincil kısmı demir çekirdekli olmalıdır. Tipik olarak bir TYDHAM, ikincil kısmı demir çubuk üzerine yerleştirilmiş bakır veya alüminyum tüp yapıdan oluşur.



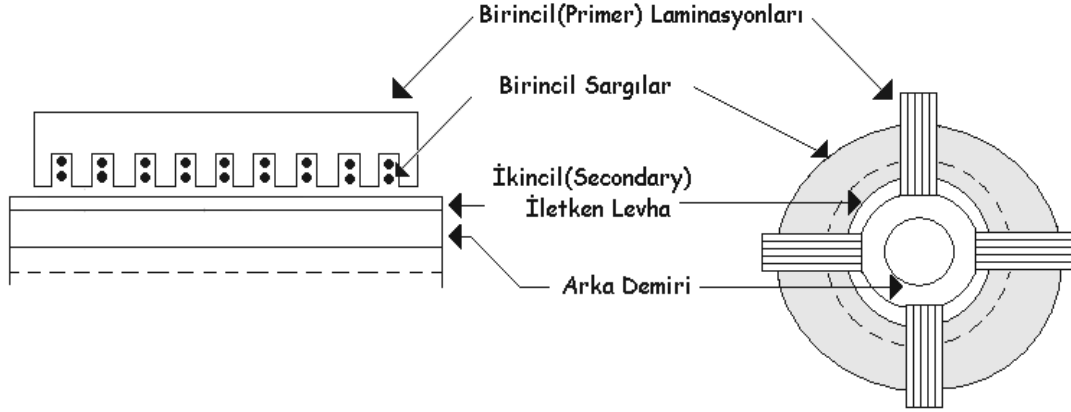
Şekil 1.8. TYDHAM'un bir fazına ait sarımlar

Bir TYDHAM tasarımı yapılırken ilk önce birincil ve ikincil kısımlara ilişkin manyetik ve elektrik devrelerden başlanmalıdır. Tüpsel yapısından dolayı birincil kısımda boyuna sac paketler kullanılabilir. Bu laminasyon oluklarına Şekil 1.9.'daki gibi birincil sargılar yerleştirilir. Bu sac paketler Şekil 1.10.'da gösterildiği gibi enine yerleştirilerek de kullanılabilir.

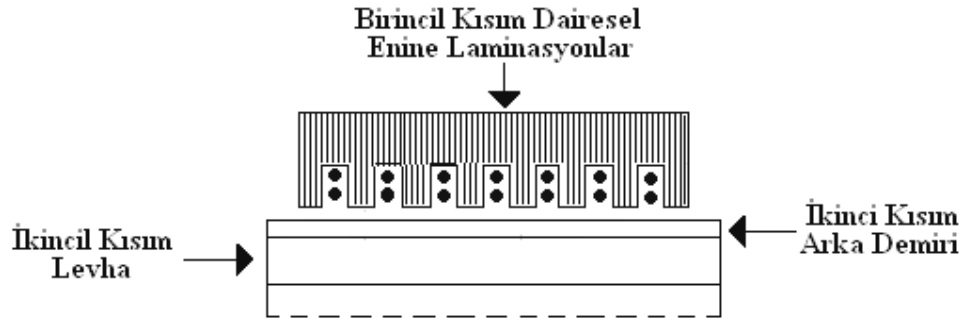
Sargıları oluklara yerleştirmek ve birincil kısım çekirdek parçalarını (sac paketleri) bir daire boyunca yerleştirmek Şekil 1.9.'daki motorun ortaya çıkardığı problemlerdir. Diğer taraftan Şekil 1.10.'daki gibi enine yerleştirilmesi durumunda ise laminasyonlar arasında bir boşluk oluşması kaçınılmazdır. Çünkü bu saclar iç ve dış çapı farklı olan bir

yüzey (sargı) üzerine yerleştirilecektir ve saclar iç çevreyi doldurduğunda dış çevrede büyük boşluklar meydana gelecektir.

İkincil kısım bakır veya alüminyum kaplı demir çubuktan imal edilebilir. Alüminyum veya bakır yüzey bir bütün olabileceği gibi enine sac paketler (laminasyonlar) ile ardı ardına sıralı dizilecek şekilde halkalardan da oluşturulabilir.



Şekil 1.9. TYDHAM sac paketlerin birincil kısım oluklarına yerleştirilmiş durumu



Şekil 1.10. TYDHAM sac paketlerinin enine yerleştirilmiş durumu

TYDHAM, özellikle kısa vuruşlu (kısa mesafeli) doğrusal hareket gerektiren uygulamalar için uygundur. TYDHAM'lerin enine akılı ve boyuna akılı çeşitleri mevcuttur. Fakat bu çalışmada sadece boyuna akılı TYDHAM'lerden bahsedilecektir. TYDHAM'nin en önemli avantajlarından biri kolay imal edilmesi ve imalat aşamasında hassas süreçlere çok fazla sahip olmamasıdır. TYDHAM genellikle düşük hızlarda kullanıldığından dinamik uç etkileri göz ardı edilebilir ve statik uç etkileri, iyi bir tasarım

ile en aza indirilebilir. Sonuç olarak, TYDHAM analizinde uç etkileri ihmal edilebilir. Dahası, silindirik yapısından dolayı enine uç etkileri oluşmaz. İkincil kısım demir çekirdeğinin doyuma gitmesi ve eddy akımlarının oluşmasından dolayı TYDHAM analizi oldukça zorlaşır. Buna rağmen, birincil kısmı kısa tek yanlı doğrusal hareketli asenkron motor (BKKTYDHAM) için geliştirilen teori, -yeterli bir doğrulukla- TYDHAM için de kullanılabilir. Elbette silindirik yapısından dolayı TYDHAMde normal kuvvetler de olmayacaktır. Düzlemsel yapılu doğrusal hareketli asenkron motorlar için geçerli tasarım kriterleri denklem (1.1) ile birlikte TYDHAM ler için de aynı şekilde kullanılabilir.

$$s_{rk} \cdot G_e = 1 \quad (1.1)$$

$s_{rk}$  : kayma oranı

$G_e$ : iyilik faktörünün etkin değeri

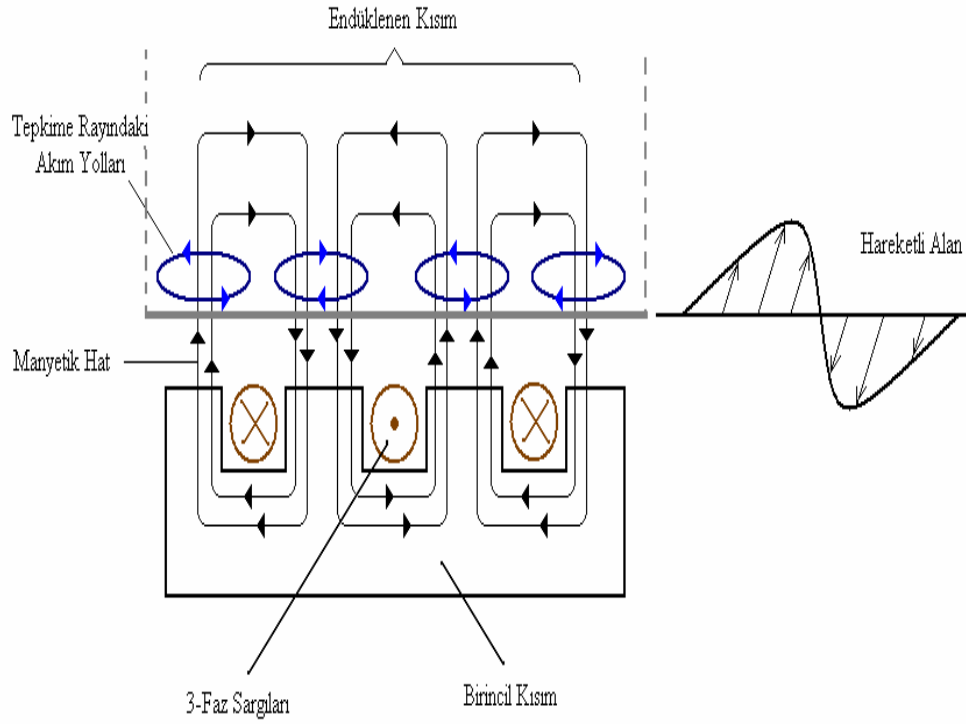
Fakat çok kısa vuruşlu uygulamalarda (örn. 0.5m'den az) kayma oranı  $s_{rk}=1$  alınabilir çünkü maksimum itme kuvveti, makine durağan haldeyken oluşur.

### 1.8.1. Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motorların Çalışma İlkesi

Şekil 1.11.'de TYDHAM'nin çalışma prensibini gösterilmektedir. 3-fazlı sargılar endüklenmiş manyetik alan üretir ve bu manyetik alan motorun hareketli kısmında (reaksiyon rayı, reaksiyon yüzeyi veya silindiri üzerinde) indüklenmiş akım yolları oluşmasına neden olur.

Bir TYDHAM'un hareketli kısmındaki itme kuvveti, bu değişken manyetik alan ile indüklenme olan çelik tüp üzerinde oluşan eddy akımlarının etkileşimi sonucu ortaya çıkar [21].

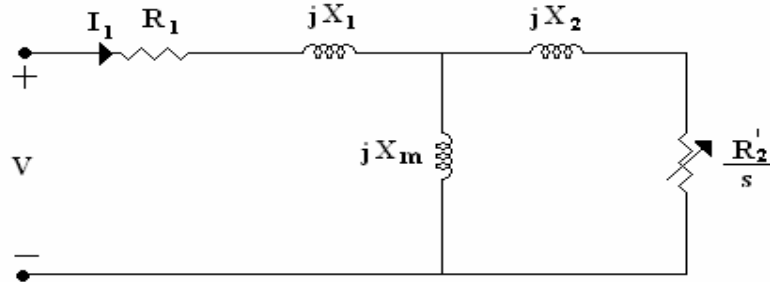
Çevresi üzerinden birleştirildiği takdirde, halka sargılar ile indüklenme olan tüp yapı arasındaki simetrik dağılıma sahip çekim kuvveti yok edilebilir



Şekil 1.11. TYDHAM'nin çalışma ilkesi [21].

### 1.8.2. Tüpsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motorların Eşdeğer Devresi

TYDHAM'lerin silindirik yapısından dolayı uç etkileri göz ardı edilebilecek kadar etkisizdir. Bu nedenle elektriksel eşdeğer devre oluşturulurken uç etkileri hesaba katılmayacaktır. TYDHAM eşdeğer devresi Şekil 1.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.12. TYDHAM eşdeğer devresi

Tasarım yöntemleri ve eşdeğer devre Tek Yanlı Düzlemsel Yapılı Doğrusal Hareketli Asenkron Motor (TYDYDHAM)'lar ile yaklaşık olarak aynıdır. Fakat silindirik yapısı, birincil kısım bobin uç bağlantıları ve enine uç etkilerinin olmamasından dolayı TYDYDHAM için elde edilen ifade ve açıklamaların bazıları değişmektedir [20].

Manyetik reaktans  $X_m$  denklem (1.2), birincil kısım faz direnci  $R_1$  denklem (1.3) ve birincil kısım kaçak reaktansı  $X_1$  denklem (1.4) ile verilmiştir.

$$X_m = \frac{6\mu_0\omega_1 D_0 k_{w1}^2 W_1^2 \tau}{\pi p g_e} \quad (1.2)$$

$$R_1 = \rho_{co} J_{co} \frac{\pi D_{avp} W_1^2}{W_1 I_{1r}} \quad (1.3)$$

$$X_1 = 2\mu_0 \omega_1 \frac{\pi D_{orb}}{pq} (\lambda_s + \lambda_d) W_1^2 \quad (1.4)$$

Burada,

$$\lambda_s \sim \frac{1}{12} \frac{h_s}{w_s} (1 + 3\beta_1) \quad ; \quad \lambda_d = \frac{5(g_{ei}/w_s)}{5 + 4(g_a/w_s)} \quad ; \quad (1.5)$$

İkincil kısım faz direnci  $R_2'$

$$R_2' = \frac{6\pi D_{orti}}{p\tau d_a \sigma} k_{w1}^2 W_1^2 \quad (1.6)$$

Bu bağıntılarda;

$D_{orb}$ : Birincil kısım sargıların ortalama çapı, m

$D_{orti}$ : İkincil kısım ortalama çapı, m

$D_o$  : Birincil kısım delik çapı, m

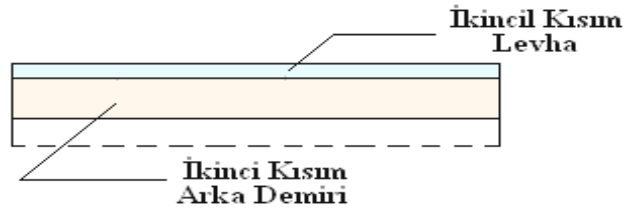
$g$  : Hava aralığı, m

$p$  : Kutup çifti sayısı

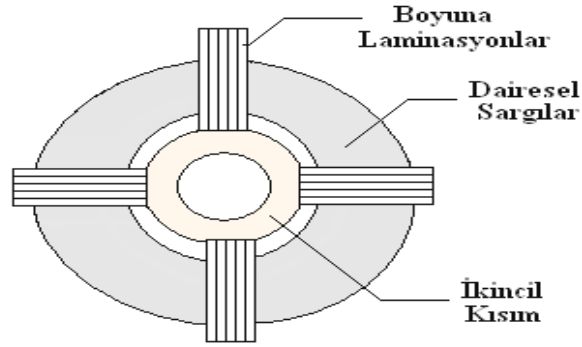
$\beta$  : Dalga sayısı,  $m^{-1}$

- $\lambda$  : Dalga uzunluğu, m  
 $\sigma$  : İletkenlik, S/m  
 $\tau$  : Kutup adım aralığı, m

Denklem (1.2), (1.3), (1.4) ve (1.6)'daki ifadeler, ikincil kısmı demir üzerine monte edilmiş (Şekil 1.13. (a)) ve birincil kısmı boyuna laminasyonlu TYDHAM'ler için geçerlidir (Şekil 1.13. (b)).



(a)



(b)

Şekil 1.13. (a) Arka demirli ikincil kısım, (b) Boyuna laminasyonlu TYDHAM [20].

TYDHAM'ler düşük hız uygulamaları için tasarlandığında itme ve normal kuvvetler daha basit hale getirilebilir. Dolayısıyla itme kuvveti  $F_x$  denklem (1.7.)'deki gibi bulunur.

$$F_x = \frac{3I_2'^2 R_2'}{s2\tau f_1} = \frac{3I_1'^2 R_2'}{s2\tau f_1 \left[ \left( \frac{1}{sG_{ei}} \right)^2 + 1 \right]} \quad (1.7)$$

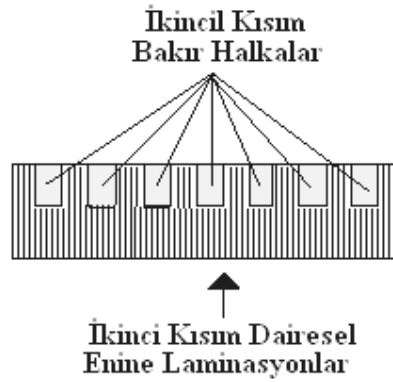
Demir kayıpları ihmal edilirse verim ve güç faktörü denklem (1.8) ve denklem (1.9) ile ifade edilebilir.

$$\eta_1 = \frac{F_x 2\tau f_1 (1-s)}{F_x 2\tau f_1 + 3R_1 I_1^2} \quad (1.8)$$

$$\cos \phi = \frac{F_x 2\tau f_1 + 3R_1 I_1^2}{3V_1 I_1} \quad (1.9)$$

Birincil kısmı çekirdeksiz olan TYDHAM'ler de imal edilebilir. Bu tür TYDHAM'ler daha zayıf güç faktörüne sahip olup avantaj olarak daha iyi soğutma imkânına sahiptirler. Üstelik oluklarına dairesel iletken halkalar yerleştirilmiş oluklu demir yapıya sahip ikincil kısım, daha yüksek enerji dönüşümü sağlar. Hava boşluğu azalır ve soğutma şartları daha uygun hale gelir [20].

Düşük frekanslı uygulamalarda daha yüksek itme kuvveti için Şekil 1.14.'deki yapı tercih edilebilir.



Şekil 1.14. Dairesel enine laminasyonlu TYDHAM [20].



Bu durumda ikincil kısım direnç ve kaçak reaktansı denklem (1.10) ve denklem (1.11) ile verilmiştir.

$$R'_2 = 12\rho_{c0} \frac{\pi D_{orti}}{A_{ring} N_{s2}} k_{w1}^2 W_1^2 \quad (1.10)$$

$$X'_2 = 24\mu_0\omega_1 (\pi D_{orti}) \frac{(\lambda_{s2} + \lambda_{d2})}{N_{s2}} k_{w1}^2 W_1^2 \quad (1.11)$$

Bu şartlar altında maksimum itme kuvveti, denklem (1.12) sağlandığında elde edilir.

$$s_{rk} G_e = \frac{1}{\sqrt{1 + (X'_{2\sigma} / X_m)^2}} \quad (1.12)$$

### 1.9. Matematiksel Model [22]

Bu kısımda denklem (1.7)'den farklı olarak itme kuvveti  $F_x$ , alan denklemleri kullanılarak farklı şekilde elde edilmiştir. Oyuk tabaka şeklinde endüklenen kısma sahip bir TYDHAM'nin silindirik koordinat sisteminde manyetik ve geometrik parametrelere sahip bir matematiksel modeli geliştirilmiştir.

Hava boşluğu  $g_o$ , dış ve iç yarıçapları  $r_e$  ve  $r_i$  olan belirsiz uzunluğa sahip bir TYDHAM şeması Şekil 1.15.'de verilmiştir.

Matematiksel modeli geliştirmek için bazı basitleştirme varsayımları yapılmıştır:

- Manyetik alanın hava boşluğu boyunca radyal ve düzgün olduğu varsayılmıştır.
- Endükleyen kısmın ve endüklenen kısmın demir çekirdeğinin manyetik doyumu göz ardı edilmiştir.
- Hava boşluğu boyunca bir sinüzoidal hava boşluğu elde edebilmek için endükleyen kısmın da bir silindirik tabaka olduğu varsayılmıştır.

Matematiksel model için ilk önce Ohm kanunu, Maxwell kanunu ve vektörel manyetik potansiyel tanımı yapılarak başlanabilir:

$$\vec{\mathfrak{S}} = \sigma (\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}) \quad (1.13)$$

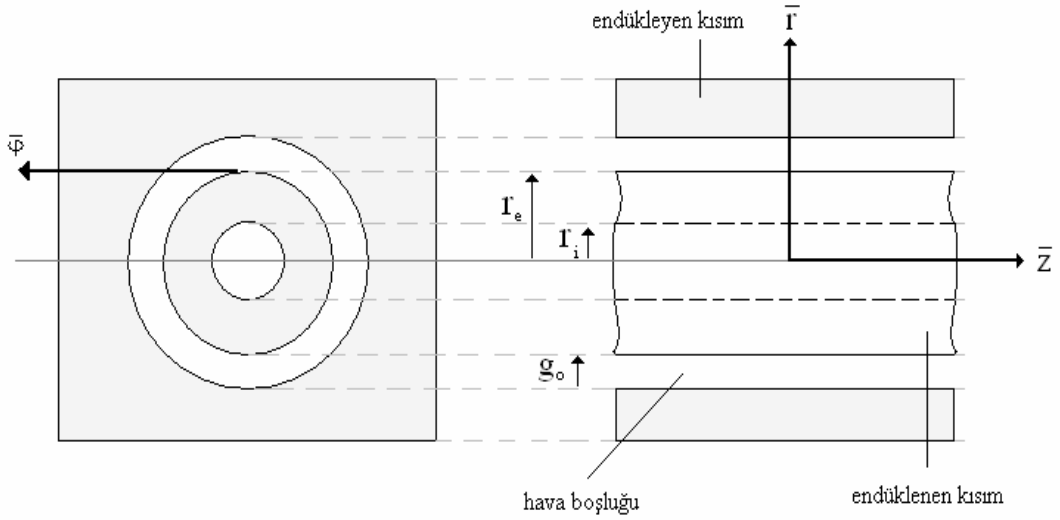
$$\text{rot}\vec{H} = \vec{S} \quad (1.14)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (1.15)$$

$$\vec{H} = \text{rot}\vec{A} \quad (1.16)$$

Denklem (1.13), (1.14), (1.15) ve (1.16)'dan yararlanarak vektörel manyetik potansiyel denklem (1.17) ile ifade edilir.

$$\nabla^2\vec{A} = \mu\sigma \left[ \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \vec{V} \wedge \text{rot}\vec{A} \right] \quad (1.17)$$



Şekil 1.15. Belirsiz uzunluğa sahip TYDHAM'un taslak çizimi [22].

Denklem (1.17) için, TYDHAM silindirik simetrisi de göz önüne alınarak denklem (1.18)'deki fonksiyon çözümü kullanılabilir.

$$\vec{A}(r, z, t) = \vec{\varphi}A(r)e^{j(\omega t - kz)} \quad (1.18)$$

Burada  $k = \omega/V_s$  senkron dalganın yayılma katsayısıdır.

Vektörel manyetik potansiyelin dağılımının vektörel diferansiyel ifadesi denklem (1.19)'daki gibi elde edilebilir.

$$\frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{A}}{\partial r} - \left( j\alpha^2 + \frac{1}{r^2} \right) \bar{A} = 0 \quad (1.19)$$

Burada  $\alpha = \sqrt{s\omega\mu\sigma}$  olarak tanımlanır.

Bu vektörel fonksiyonun çözümü denklem (1.20)'de verilmiştir.

$$\bar{A}(r) = \vec{\varphi} \left[ C_1 I_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r \right) + C_2 K_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r \right) \right] e^{j(\alpha r - kz)} \quad (1.20)$$

Buradaki  $C_1$  ve  $C_2$  sabitleri, daha önce bahsedilen varsayımlar ve farklı geçirgenliğe sahip iki ortamın ayırma yüzeyindeki vektörel manyetik alanının korunumu özellikleri hatırlanarak tespit edilebilir.

Maxwell eşitlikleri de kullanılarak manyetik indüksiyon vektörü denklem (1.21)'deki gibi elde edilir.

$$\bar{B} = \vec{r} \left[ \frac{I_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r_i \right) K_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r \right) - K_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r_i \right) I_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r \right)}{I_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r_i \right) K_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r_e \right) - I_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r_e \right) K_1 \left( j^{\frac{1}{2}} \alpha r_i \right)} \right] B_M e^{j(\alpha r - kz)} \quad (1.21)$$

TYDHAM tarafından üretilen itme endüklenen kısmın hacminin elektromanyetik birim kuvveti üzerinden denklem (1.22) ile tanımlanabilir.

$$f_e = \frac{\text{Re}[\vec{\mathcal{J}} \cdot \bar{B}^*]}{2} \quad (1.22)$$

Bazı matematiksel kısaltma ve basitleştirmelerden sonra denklem (1.23) elde edilir.

$$f_e = \frac{1}{2} \frac{\sigma B_M^2 V_s r_e s}{r} \cdot \frac{\cosh\left[\sqrt{2}\alpha(r-r_i) - \cos[81 \cdot \alpha(r-r_i)]\right]^o}{\cosh\left[\sqrt{2}\alpha(r_e-r_i) - \cos[81 \cdot \alpha(r_e-r_i)]\right]^o} \quad (1.23)$$

İç ve dış yarıçaplar arasındaki hacimde motor tarafından üretilen bu birim kuvvetin entegrali denklem (1.24)'de verilmiştir.

$$F_x = 2\pi I \int_{r_i}^{r_e} f_e r \cdot dr \quad (1.24)$$

Bazı basitleştirmelerden sonra itme kuvveti, denklem (1.25) ile ifade edilebilir.

$$F_x = \frac{\pi \sigma B_M^2 I V_s r_e s}{\sqrt{2}\alpha} \cdot \tanh\left[\sqrt{2}\alpha d\right] \quad (\text{N}) \quad (1.25)$$

### 1.10. Karakteristik Eğriler

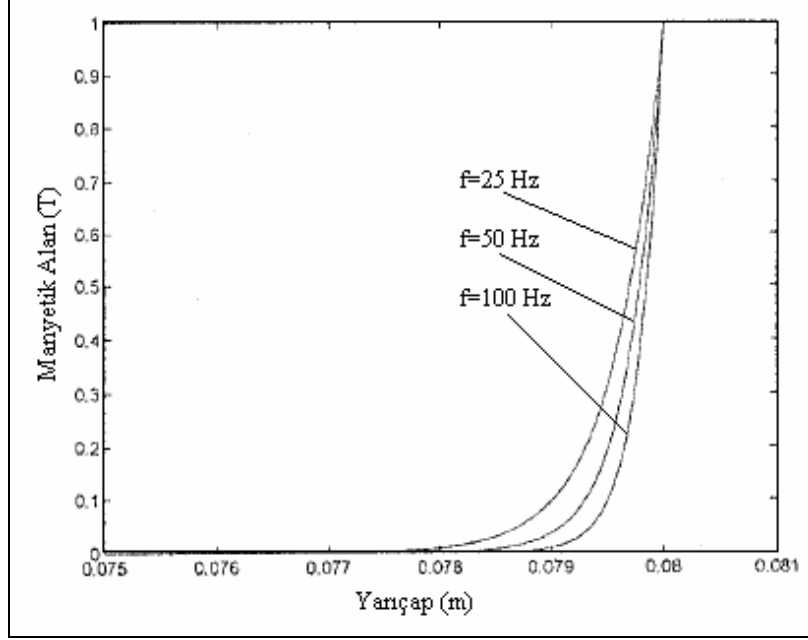
Kısım 1.9.'da elde edilen ifadeler kullanılarak MATLAB<sup>®</sup> yazılımı ile bazı karakteristik veriler Şekil 1.16., Şekil 1.17., Şekil 1.18. ve Şekil 1.19.'da verilmiştir.

Şekil 1.16.'da manyetik alanın değişik frekanslarda, yarıçapa göre değişimi verilmiştir.

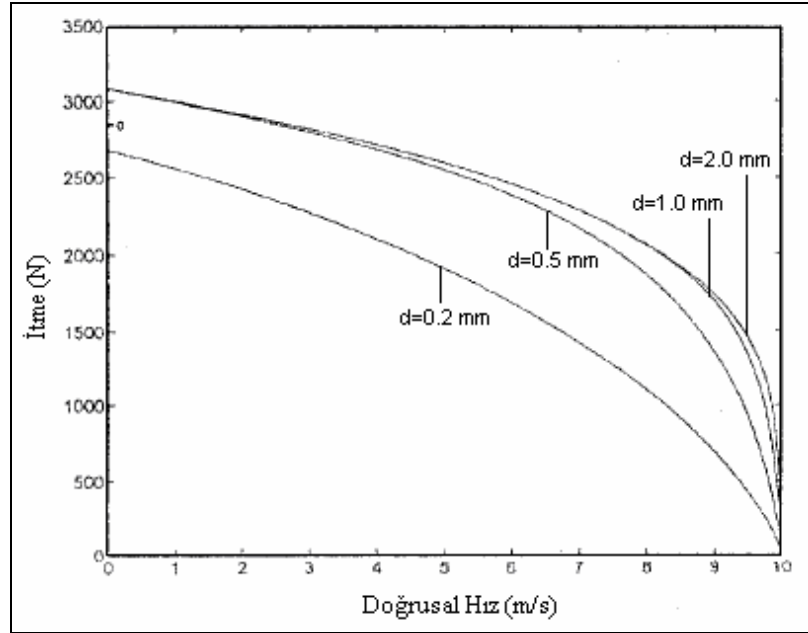
Bir sonraki şekilde ise mekanik karakteristikler verilmiştir. İtme kuvvetinin doğrusal hızın bir fonksiyonu olarak değişim çeşitli ikincil tabaka kalınlıklarına göre Şekil 1.17.'de verilmiştir.

Şekil 1.18.'de ise çeşitli besleme frekanslarında doğrusal hıza bağlı itme kuvveti karakteristikleri verilmiştir.

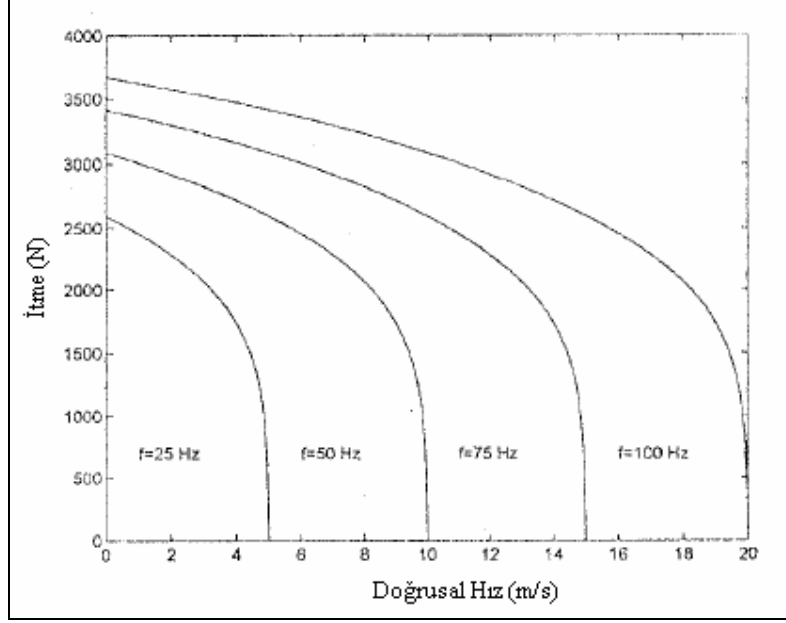
Şekil 1.19.'da ise doğrusal hız ile itme kuvvetinin değişimi makine uzunluğuna bağlı olarak verilmiştir.



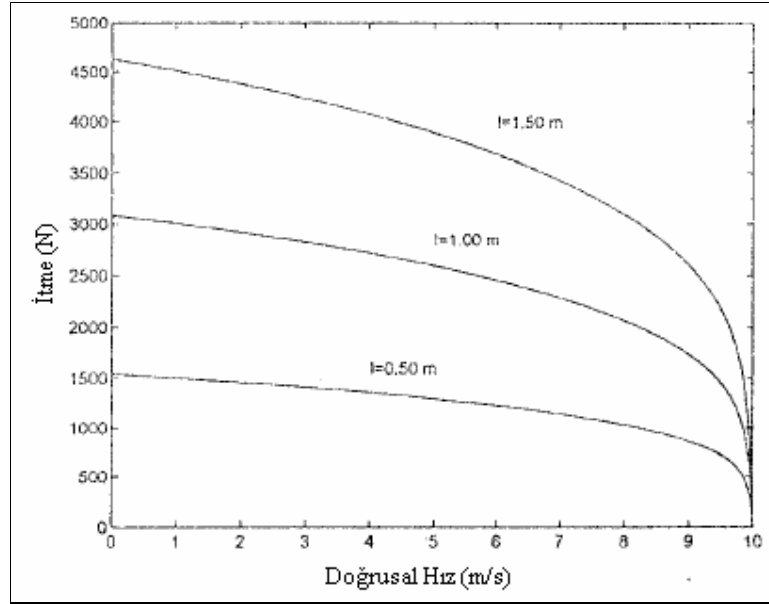
Şekil 1.16. Manyetik alanın ikincil kısım yarıçapına göre değişimi [22].



Şekil 1.17. İtme kuvvetinin doğrusal hıza bağlı değişimi [22].



Şekil 1.18. Değişik besleme frekanslarında itme kuvveti ile doğrusal hızın değişimi [22].



Şekil 1.19. Makine uzunluğuna bağlı doğrusal hız ile itme kuvvetinin değişimi [22].

## 1.11. Tasarım Faktörleri

Doğrusal hareketli asenkron motor tasarımı, makine performansını etkileyen birçok faktörü içerir. Bunlardan bazıları aşağıda incelenmiştir.

### 1.11.1. Hava Aralığı [20]

Hava aralığı makine tasarımında çok önemli bir faktördür. Büyük bir hava aralığı mıknatıslanma akımının yüksek olmasını gerektirir ki, bu da güç faktörünün düşmesine neden olur. Çünkü hava aralığı büyüdükçe harcanan kayıplar artacaktır. Böyle bir DHAM'de çıkış-uç bölgesindeki kayıplarda artar. Ayrıca büyük bir hava aralığına sahip bir makinede çıkış gücü ve dolayısıyla verim de düşecektir. Sonuçta hava aralığı, tasarımın elverdiği ölçüde küçük olmalıdır.

### 1.11.2. İyilik Faktörü [20]

Tasarım yapılırken dikkat edilmesi gereken kriter –özellikle düşük hızlı DHAM'ler için- iyilik faktörüdür. İyilik faktörü, makinenin bir enerji biçimini başka bir enerji biçimine dönüştürebilme yeteneğine bağlıdır. Elektrik makineleri açısından ise elektrik gücün manyetik güce dönüştürülmesindeki başarımlar olarak ifade edilebilir. Diğer bir ifadeyle manyetik reaktans  $X_m$ 'ın ikincil kısım direnci  $R_2$ 'ye oranıdır. İyilik faktörünün etkin değeri denklem (1.26) ile verilmiştir. Burada  $X_m$  ve  $R_2$  hesaplanabilir makine parametreleridir.

$$G_e = \frac{X_m}{R_2} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{X'_{2\sigma}}{X_m}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.26)$$

### 1.11.3. Kutup Aralığı [20]

İyilik faktörü  $G$ , denklem (1.26)'dan farklı bir şekilde denklem (1.27)'de verilmiştir.

$$G = \frac{2\mu_0 f_1 \sigma_e \tau^2 d}{\pi g_0 k_1 k_{sk} k_c (1 + k_p)} \quad (1.27)$$

Denklem (1.27)'den anlaşılacağı üzere büyük bir iyilik faktörü için kutup aralığının da mümkün olduğunca büyük olması gerektiği söylenebilir. Çünkü iyilik faktörü  $G$  ile kutup aralığının karesi  $\tau^2$  birbiriyle doğru orantılıdır. Burada dikkat edilmesi gereken şey, kutup aralığı artırıldıkça DHAM arka demirinin kalınlığı da artar ki, bu da DHAMnin ağırlığının artmasına neden olur. Ayrıca kutup aralığının artması (yani sargıların yerleştirildiği alanın artması) aktif akı yolunun azalmasına neden olacağından verimde de düşüşe neden olur. Son olarak, senkron hızda kullanılan makinelerde senkron hız  $U_s$ , kutup aralığı ve frekansa bağlıdır. Denklem (1.28)'de bu ilişki gösterilmiştir.

$$U_s = 2\tau f \quad (1.28)$$

Dolayısıyla sabit bir frekansta, kutup aralığı  $\tau$ , senkron hızı belirleyici etkenlerdir. Boyutları önceden belirlenmiş bir makinede kutup aralığının büyümesi kutup sayısının azalmasına neden olur ve bu istenmeyen bir durumdur.

### 1.11.4. Kutup Sayısı

Kutup sayısının artması uç etkilerini düşürür [1]. Çünkü kutup sayısı arttıkça uç etkisinden kaynaklanan kayıplar kutuplar arasında paylaşılır ve bu durum makine performansını artırır. Dolayısıyla kutup sayısının artırılması makine tasarımında performans açısından önemlidir.

Bu faktörlerin dışında tasarımda göz önüne alınması diğer parametreler ve etkileri Tablo 1.3.'de verilmiştir.



Tablo 1.3. Parametre değişikliklerinin performansa etkileri [20].

Etken	Etken Artarsa	Etken Azalırsa
Hava Aralığı $g$	Mıknatıslanma akımı artar Çıkış-uç kayıpları artar	İyilik Faktörü artar Çıkış gücü artar Verim artar
Kutup Aralığı $\tau$	İyilik Faktörü artar Arka demiri kalınlığı artar	Kutup sayısı artar
Kutup Sayısı $2p$	Uç etkileri azalır	İkincil kısım kaçak reaktansı artar
Adım Genişliği $w$	Kaçak reaktans artar	Güç artar Verim artar
İkincil Kısım Direnci $\rho$	Uç etkileri azalır	İyilik Faktörü artar İkincil kısım $I_r^2$ kayıpları azalır
İkincil Kısım Kalınlığı	İyilik Faktörü artar Başlangıç akımı artar	İkincil kısım kaçak reaktansı artar

### 1.12. Tasarım Adımları [20]

Doğrusal hareketli asenkron makine için tasarım adımları, klasik makinelerdeki gibidir. Bir CAD (Computer Aided Design) programı kullanılarak tasarım aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilebilir:

Performans için gerekli kriterler belirlenir ve bu kriterlere uygun makine seçilir. Değişkenler ve bu değişkenlerin alt-üst sınırları tespit edilir. Makineye ait birincil ve ikincil değişkenler kullanılarak başlangıç için bir tasarım yapılır.

Bu tasarım aşağıdakileri içermelidir:

- Parametrelerin hesabı ve eşdeğer devre akımları
- Makine performansının hesabı
- Hesaplanan performans ile istenen performans değerleri karşılaştırılır.

Yapılan tasarım beklentileri karşılamıyorsa değişkenler limitleri dahilinde değiştirilerek tekrar bir tasarım yapılır ve istenilen değerlere erişilinceye kadar bu işlemler

tekrar edilir. Beklentileri karşılıyorsa -geriye kalan başka önemli değişkenler varsa tespit edilir- tasarım gerçekleştirilmeye başlanır.

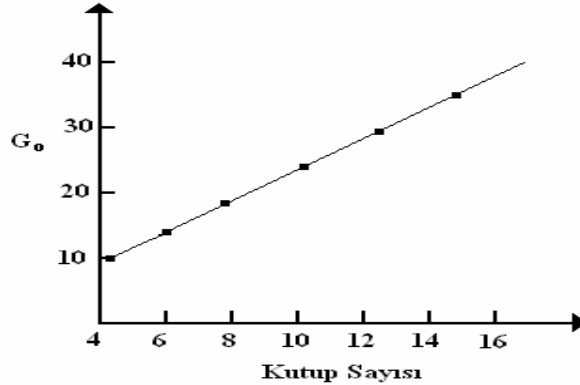
Bunların dışında kalan diğer performans kriterleri başlangıç kuvveti (klasik makinelerdeki kalkınma momenti) ve başlangıç akımı, çalışma (nominal) akım ve kuvveti, verim, güç faktörü, akı yoğunluğu (hava aralığında), birincil ve ikincil kısımların kaçak reaktansları, güç kayıplarıdır.

Bu şekilde belli bazı parametreleri değiştirerek en verimli tasarım elde edilebilir. İyilik faktörünü en yüksek seviyeye getirmek düşük hızlı DHAM'lerde yüksek verim elde etmek için yeterlidir. Fakat yüksek hızlı DHAM'lerde uç etkileri gibi bazı etkiler iyilik faktörünün artırılmasıyla daha belirgin hale geleceğinden bu faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Burada itme kuvveti ve kayma büyüklüklerinin sıfır olduğu andaki iyilik faktörü  $G_0$  değerini belirlemek gerekir. Yani, kayma büyüklüğü sıfır olduğu durumda çıkış uç etkisinin önündeki itme kuvveti  $F_x$  de sıfır ise, bu durumda iyilik faktörü uygun değerdedir. Bu,  $G_0$  için  $s=0$  iken  $F_x=0$  olmasını gerektirir. Bu durum, Şekil 1.20.'de kutup sayısına bağlı  $G_0$  değişimi şeklinde gösterilmiştir.

Şekil 1.20.'deki verilerle belli bir kutup sayısına bağlı olarak yüksek hızlarda çalışan DHAM için  $G_0$  elde etmek mümkündür. Tasarım yapılırken  $G_0$  için başlangıç koşulları belirlenmesinde denklem (1.29)'daki eşitsizlik kullanılabilir.

$$1.6 \leq s_r \leq 2.0 \quad (1.29)$$

Burada  $s_r$  kayma oranıdır.



Şekil 1.20.  $G_0$ 'ın kutup sayısına bağlı değişimi

### 1.13. Doğrusal Hareketli Asenkron Motorlarda Değişik Etkiler

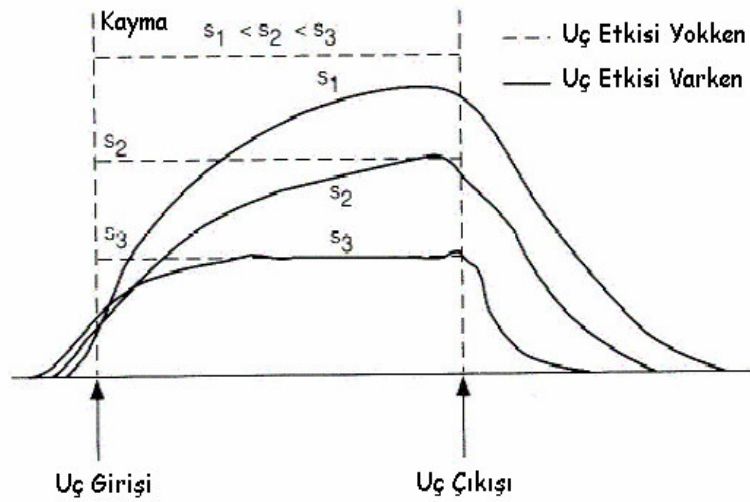
DHAM'ların davranışını etkileyen bazı etkenler vardır. Tasarım yapılırken bu etkilerin mümkün olduğunca azaltılması gerekmektedir. Konu ile ilgili literatür çalışmalarından derlenen bir kısım etkiler burada irdelenmiştir. Bunlardan bazılarının etkisi azaltılabilirken bazıları kaçınılmaz olarak performansa etki eder.

#### 1.13.1. Uç Etkisi

DHM'nin hava aralığındaki elektromanyetik alanlar uzaya göre sürekli olarak periyodik olmayıp motorun uzunluğu boyunca değişir ve her iki uçta motorun uzunluğundan daha ileri gider. Bu kavram genelde doğrusal hareketli motorlarda uç etkisi olarak adlandırılır [19].

Döner hareketli motorlar ile doğrusal hareketli motorlar arasındaki en önemli fark, DHM'lerde olan uç etkisidir. Bunun anlamı, değişken manyetik alanın döner hareketli motorlardaki gibi kendi üzerine kapanmayıp bir uç etkisi meydana getirmesidir. Uç etkisi, döner hareketli motorlara göre DHM'larda farklı karakteristiklerin oluşmasına neden olur.

Uç etkisi motor boyunca düzensiz bir akı yoğunluğuna sebep olur. Sabit akımla beslenen bir DHM'da motor boyunca akı yoğunluğu değişimi Şekil 1.21.'de verilmiştir.

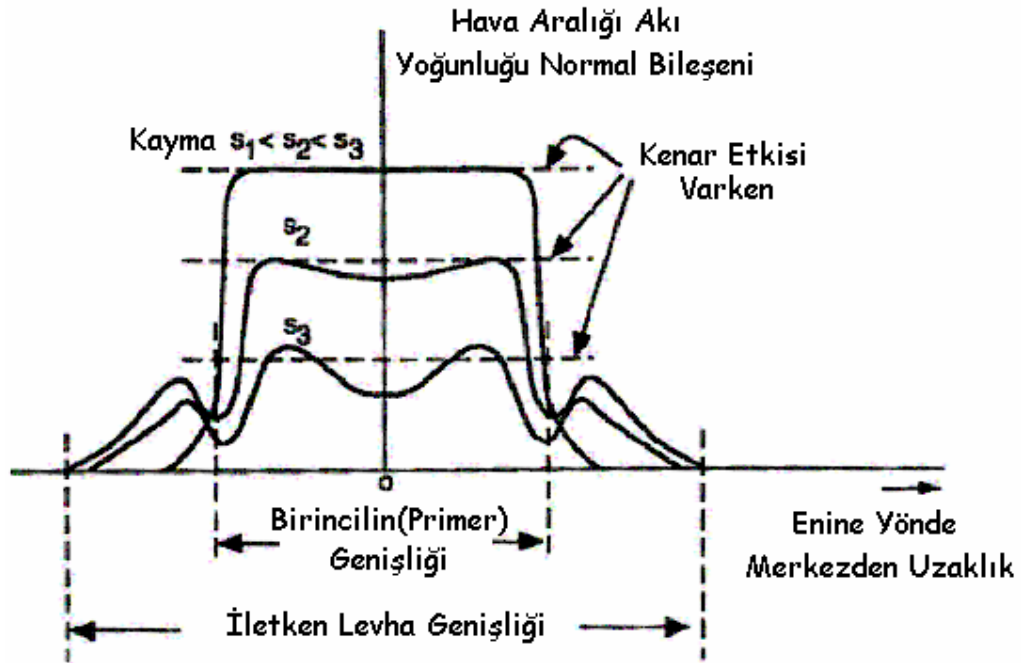


Şekil 1.21. Sabit akımla beslenen DHAM'de motor boyunca akı yoğunluğu değişimi [19].

Bu etkinin teorik olarak değerlendirmesi çok karmaşık olmakla birlikte sonuçlar basit bir şekilde açıklanabilir. Bununla ilgili Laitwaite, “eğer kısa eleman(rotor veya stator)daki kutup sayısı dördü aşarsa, kenarlar boyunca oluşacak geçici etkiler – büyük güçlü makinler hariç - ihmal edilecek kadar azalır” şeklinde öngöründe bulunmuştur [19].

### 1.13.2. Kenar Etkisi

Kenar etkisi genellikle DHM’lerde sınırlı genişliğe sahip olmanın oluşturduğu bir etki olarak ifade edilir [19]. Bu etki, genişlik-hava aralığı oranının düşük olduğu durumlarda daha çok belli olmaktadır. Şekil 1.22.’de enine yönde normal akı değişimi gösterilmiştir.



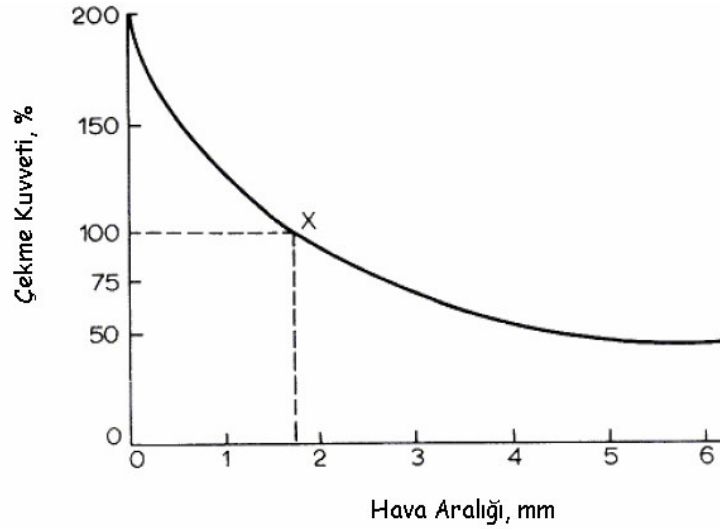
Şekil 1.22. Enine yönde normal akı değişimi [19].

Tüpsel yapılı DHM’lerin kapalı manyetik ve elektriksel devreye sahip olmasından dolayı kenar etkileri oluşmaz.

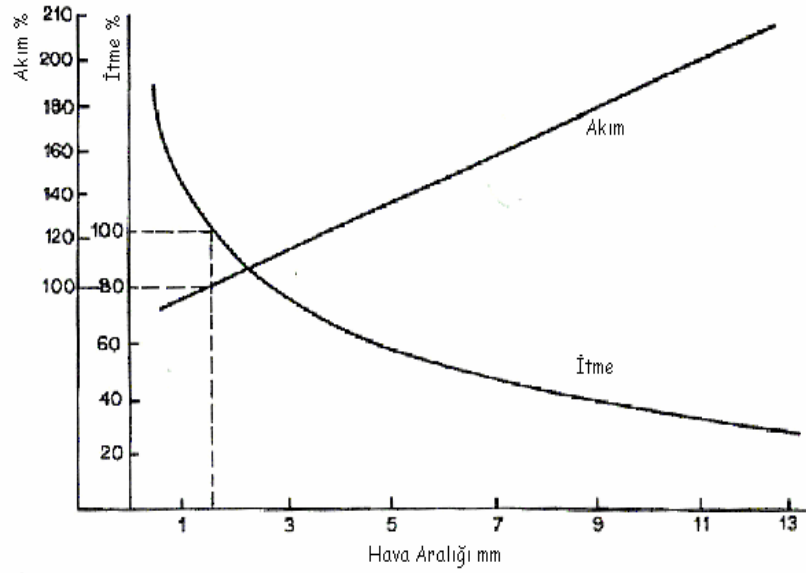
Doğrusal hareketli motor ve döner motorun her ikisi enine yönde sonlu genişliğe sahiptir fakat kenar etkisi büyük hava aralığından dolayı DHM’lerde daha etkilidir.

### 1.13.3. Boşluk Etkisi

Klasik döner hareketli asenkron motorlar küçük hava aralığına (2mm veya daha düşük) sahiptir. Bundan dolayı hava aralığı akı yoğunluğu yüksektir. DHM'lerde ise hava aralığı 5 cm'ye kadar çıkabilmektedir. Hava aralığı arttıkça relüktans ve mıknatıslama akımı da artmaktadır. Ayrıca kaçak akının artması güç katsayısının düşmesine sebep olmaktadır. Boşluk akı yoğunluğu döner hareketli emsallerine göre daha düşüktür ve sonuç olarak demir kayıpları toplam kayıpların küçük bir kısmını oluşturur. Şekil 1.23.'de çekme kuvvetinin hava aralığına göre değişimi; Şekil 1.24.'de ise akım ve itme kuvvetinin hava aralığına göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1.23. Çekme kuvvetinin hava aralığına göre değişimi [19].

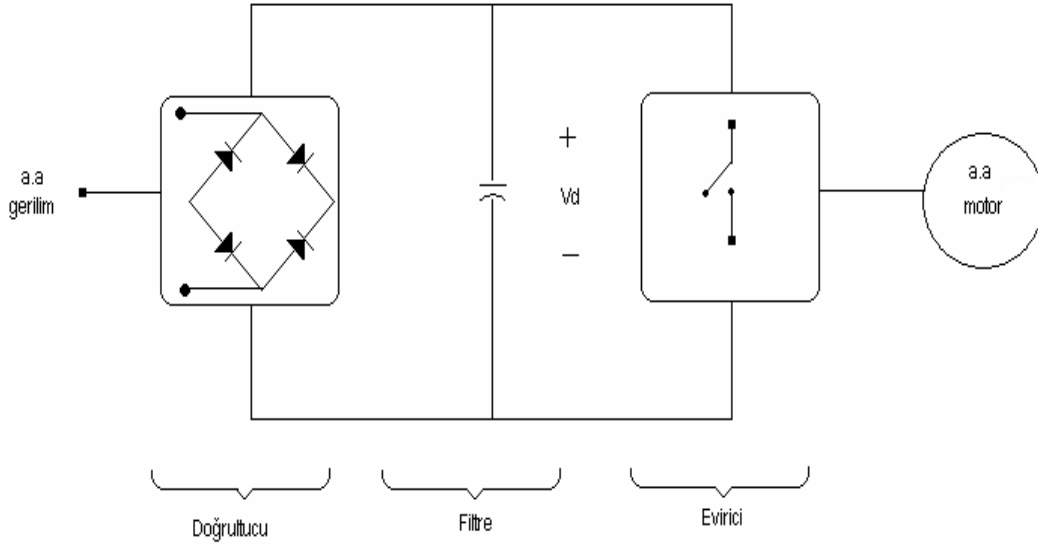


Şekil 1.24. Akım ve itme kuvvetinin hava aralığına göre değişimi [19].

#### 1.14. Eviriciler

Şebeke gerilimiyle beslenen bir eviriciye ilişkin genel blok diyagram Şekil 1.25.'de verilmiştir. Eviricilerde, şebeke gerilimi bir doğrultucu ile doğrultulmakta ve daha sonra filtrelenmektedir. Gerekirse elektromanyetik girişimi azaltmak için ek filtrelemlere de kullanılmaktadır. Elde edilen doğru gerilime yarıiletken güç elektroniği elemanları kullanılarak anahtarlama işlemi yapılır ve alternatif bir gerilim elde edilir. Anahtarlama elemanlarının kontrolü sağlanabildiğinden elde edilen alternatif gerilimin de genliği ve frekansı ayarlanabilmektedir. Sonuç olarak, genliği ve frekansı ayarlanabilen alternatif akım elde edilir.

Girişinde doğru gerilim kaynağı bulunan eviriciler Gerilim Ara Devreli Evirici (GADE) olarak tanımlanır. Diğer tür ise girişinde doğru akım kaynağı bulunan Akım Ara Devreli Evirici (AADE) adını alır. Akım ara devreli eviriciler yalnızca çok büyük güçlü a.a motor tahrik sistemlerinde kullanılır [23].



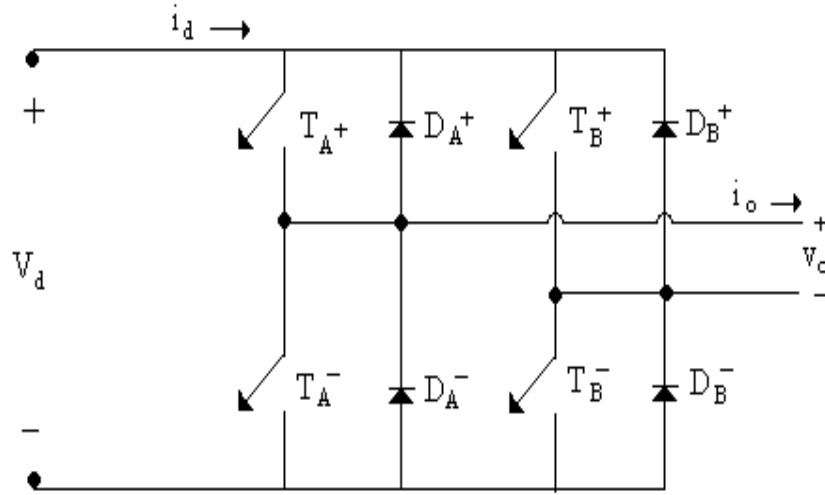
Şekil 1.25. Şebeke gerilimi ve kontrol edilen bir a.a motoru içeren evirici sistemi [23].

Eviricilerde genellikle yükü beslemek için ya yarım köprü ya da tam köprü sistem kullanılır. Yarım köprü sistemde iki güç anahtarlama elemanı kullanıldığı için her yarı periyotta bir güç anahtarlama elemanı aktif olur. Tam köprü eviricilerde ise dört adet güç anahtarlama elemanı kullanılır ve her yarı periyotta iki güç anahtarlama elemanı aktif olur.

Dolayısıyla aynı d.a giriş gerilimi için, tam köprü eviricinin en yüksek çıkış gerilimi yarım köprüününkinin iki katıdır. Bunun anlamı, aynı güç değeri için çıkış akımı ve anahtar akımları yarım köprüdeki yarısı kadardır [23]. Dolayısıyla kullanım olarak tam köprü doğrultucular daha yaygındır.

#### 1.14.1. Bir Fazlı Eviriciler

Şekil 1.26.'da bir fazlı sisteme ilişkin tam köprü evirici şeması gösterilmiştir. Burada güç anahtarlama elemanları belirli aralıklarla açılıp kapatılarak giriş gerilimi evirici çıkışına aktarılır. Yük genellikle motor olacağından endüktif bir yüküdür ve endüktans etkilerin eviriciye zarar vermemesi için güç anahtarlama elemanlarına ters kuplajlı olarak güç diyotları bağlanır. Böylece motorda biriken enerjinin anahtarlama elemanlarına zarar vermesi önlenmiş olur.



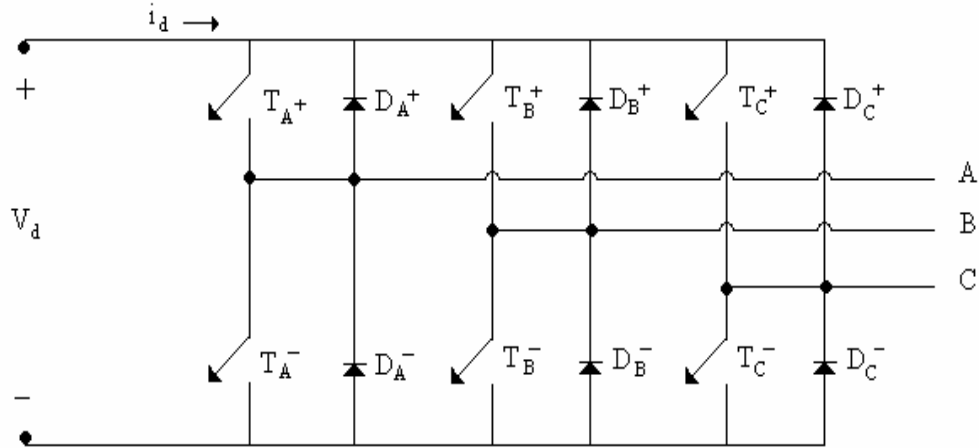
Şekil 1.26. Bir fazlı tam köprü evirici

### 1.14.2. Üç Fazlı Eviriciler

Daha yüksek güç gerektiren alternatif akım uygulamalarında, a.a motor sürücülerinde, a.a kesintisiz güç kaynaklarında yaygın olarak üç fazlı eviriciler kullanılmaktadır. Evirici, girişindeki d.a gerilimi, aralarında 120'şer derece faz farkı olan çıkış gerilimlerine dönüştürür. Bu gerilimler yaygın olarak sayısal elektronik devreler kullanılarak elde edilmektedir. Çıkış gerilimlerin frekansı evirici üzerinden değiştirildiği için kaynak frekansından bağımsızdır.

Şekil 1.27.'de üç fazlı bir evirici gösterilmiştir. Burada her faz için bir tane olmak üzere üç adet kol vardır. Her iki koldaki iki anahtardan herhangi biri her zaman iletimde olduğu için, çıkış gerilimi çıkış yük akımından bağımsızdır [23]. Burada  $V_d$  şebeke geriliminden elde edilen doğru gerilimdir. Alternatif gerilimin doğrultulması ve filtrelenmesi ile elde edilebilir. Bu tezin amacına yönelik olarak ve basitliğinden dolayı kontrol yöntemi olarak altı adımlı evirici ile kontrol tercih edilmiştir.





Şekil 1.27. Üç fazlı eviricinin genel şeması [23].

### 1.14.3. Altı Adımlı Evirici

En basit kontrol yöntemlerinden biri olan altı adımlı eviricide üç fazlı bir çıkış gerilimi üretmek için güç anahtarlama elemanları  $120^\circ$  aralıklarla uygun sıralamalarda sürekli anahtarlanır. Şekil 1.27.'deki her koldaki alt ve üst anahtar çiftleri  $180^\circ$  aralıklarla açılıp kapanır. Ayrıca  $T_A$ ,  $T_B$  ve  $T_C$  anahtarlama elemanları da  $120^\circ$  aralıklarla açılıp kapatılır ve böylece üç fazlı gerilimler elde edilmiş olur. Dolayısıyla her  $60^\circ$  de anahtarlar belli bir sıra ile iletme geçer. Bundan dolayı çıkış gerilimi aralarında  $60^\circ$  fark olan altı adımlı bir işarettir. Anahtarlama elemanlarının kapalı durumları Tablo 1.4.'de gösterilmiştir.

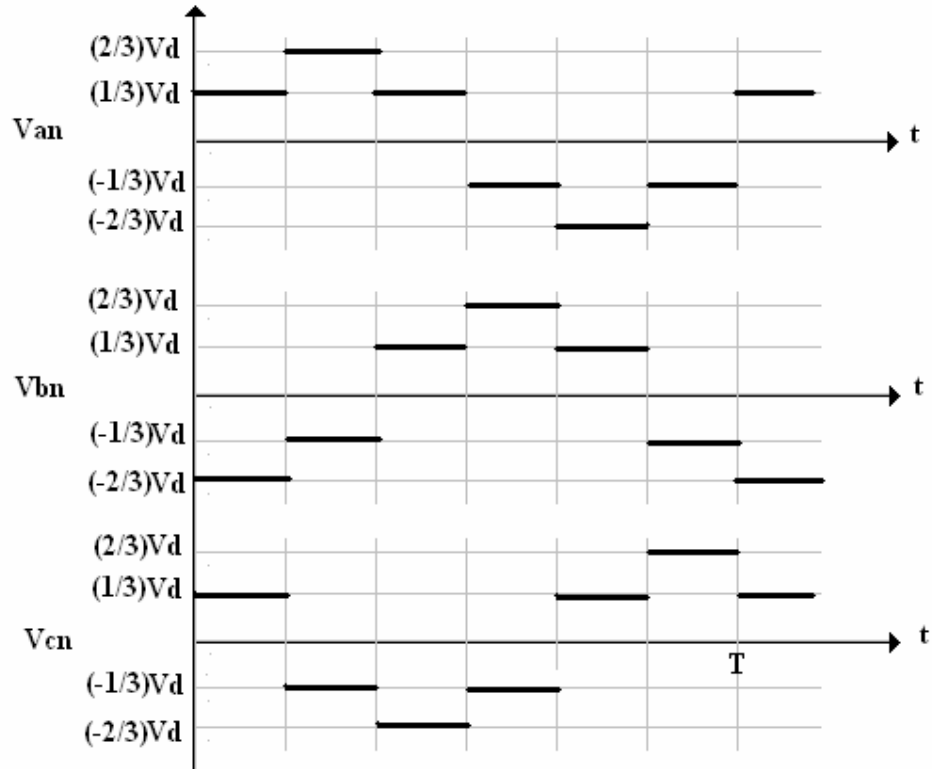
Tablo 1.4. Anahtarların kapalı durumları

Aralık ( $^\circ$ )	Kapalı Anahtarlar
0-60	$T_A^+ - T_C^+ - T_B^-$
60-120	$T_A^+ - T_B^- - T_C^-$
120-180	$T_A^+ - T_B^+ - T_C^-$
180-240	$T_B^+ - T_A^- - T_C^-$
240-300	$T_B^+ - T_C^+ - T_A^-$
300-360	$T_C^+ - T_A^- - T_B^-$

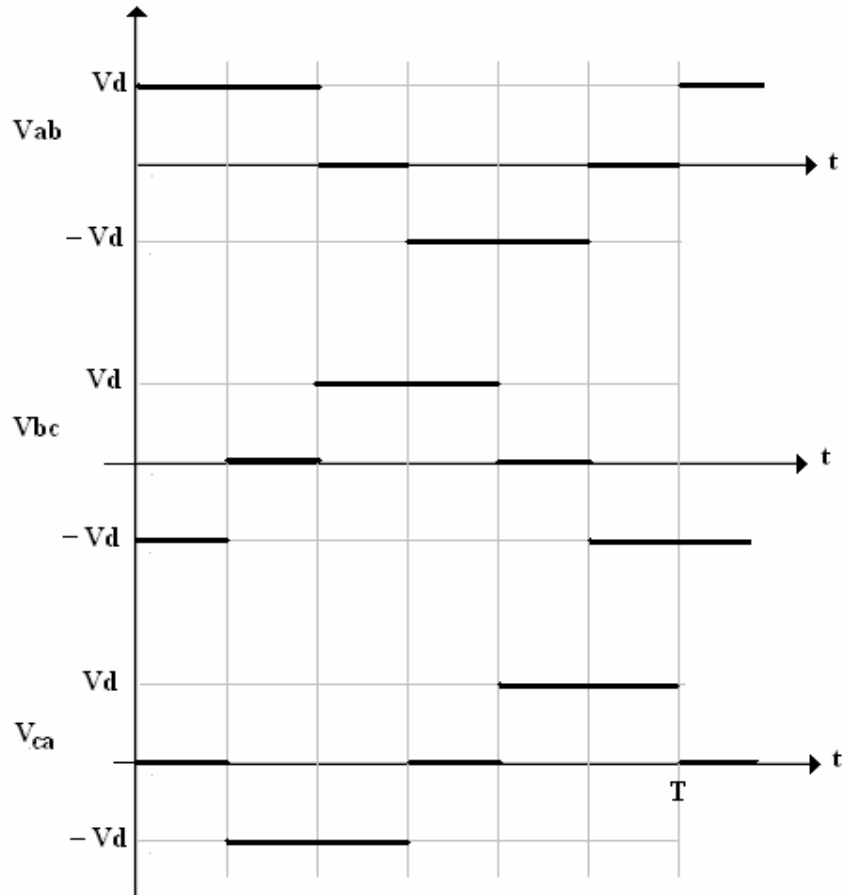
Tablo 1.4.'deki anahtarlama durumları dikkate alındığında oluşan çıkış gerilimlerin yıldız bağlı motorun nötr noktası (n)'na göre genlikleri Tablo 1.5.'de verilmiştir. Bu çıkış gerilimlerinin faz-nötr şekilleri ise Şekil 1.28.'de ve faz-faz gerilim şekilleri Şekil 1.29.'da gösterilmiştir.

Tablo 1.5. Çıkış gerilimleri genliklerinin aralıklara göre değişimi [24].

Gerilim(v)	Aralık (°)					
	0-60	60-120	120-180	180-240	240-300	300-360
$V_{an}$	$V_d/3$	$2V_d/3$	$V_d/3$	$-V_d/3$	$-2V_d/3$	$-V_d/3$
$V_{bn}$	$-2V_d/3$	$-V_d/3$	$V_d/3$	$2V_d/3$	$V_d/3$	$-V_d/3$
$V_{cn}$	$V_d/3$	$-V_d/3$	$-2V_d/3$	$-V_d/3$	$V_d/3$	$2V_d/3$
$V_{ab}$	$V_d$	$V_d$	0	$-V_d$	$-V_d$	0
$V_{bc}$	$-V_d$	0	$V_d$	$V_d$	0	$-V_d$
$V_{ca}$	0	$-V_d$	$-V_d$	0	$V_d$	$V_d$



Şekil 1.28. Evirici çıkış gerilimlerinin faz-nötr dalga şekilleri [24].



Şekil 1.29. Evirici çıkış gerilimlerinin faz-faz dalga şekilleri [24].

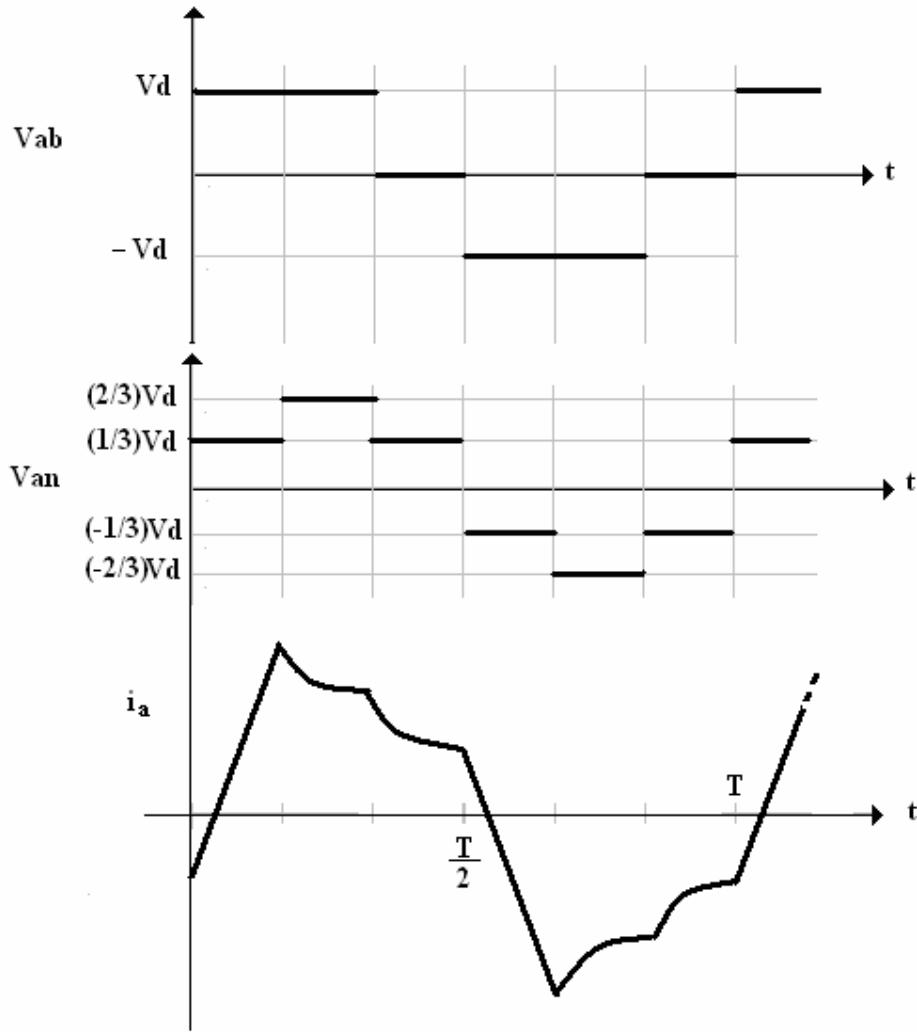
Anma frekansında anma faz-nötr arası gerilimde, yarım dalganın altındaki alan, normal şartlarda motorun maksimum akı yoğunluğunu belirler. Denklem (1.30) ve denklem (1.31)'deki eşitlikler arasındaki ilişki, uygulanan gerilim sinüzoidal olduğu zamanki durumu ifade eder. Bu eşitlikler, maksimum akı yoğunluğu  $B_{\max}$ 'ın ortalama gerilime bağlı olduğu gerçeğinden yararlanılarak düzenlenmiştir [24].

$$KB_{\max} = alan = \left(\frac{2}{\pi}\right) \left[ 1,414 \left( \frac{V_{ff}}{1.732} \right) \right] \left( \frac{T_1}{2} \right) \quad (1.30)$$

$$KB_{\max} = 0,260 V_{ff} T_1 \quad (1.31)$$

Burada  $V_{ff}$  motor faz-faz arası gerilim,  $T_1$  periyot ve  $K$  ise motorun ölçülerine ve sarım sayısına bağlı bir katsayıdır.

Evirici çıkışında elde edilen faz-faz, faz-nötr gerilimlerine göre hat akımının değişimi Şekil 1.30.'da gösterilmiştir.



Şekil 1.30. Evirici çıkış faz-faz ve faz-nötr gerilimlerine göre hat akımının değişimi [24].

Motora uygulanan altı adımlı dalga biçiminin yarım dalgasının altındaki alan, denklem (1.32)'deki gibi maksimum akı yoğunluğu ile ilişkilidir.

$$KB_{\max} = 0,222V_d T \quad (1.32)$$

Denklem (1.32)'deki maksimum akı yoğunluğu, normal sinüzoidal motor gerilimindeki aynı değerde belirlenirse denklem (1.31) ve (1.32) birleştirilerek denklem (1.33) oluşur [24]:

$$V_d = (1,17V_{ff}T_1)f \quad (1.33)$$

Burada  $f$ , altı adımlı eviricinin ayarlı çıkış frekansıdır.

Sabit akı yoğunluğu için gereken d.a hat gerilimi, çıkış frekansı ile orantılı olarak değişmelidir [24].

Şayet motorun normal anma frekansının üzerinde çalıştırılması gerekirse bu frekans aralığında eviricinin tasarımı çoğunlukla gerilim-frekans (v/f) oranı sabit alınamayacak şekilde yapılır [24].

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

### 2.1. Tasarımın Gerçekleştirilmesi

#### 2.1.1. Birincil Kısım

Birincil kısım yanı makinenin durağan kısmını gerçekleştirirken temel elemanlar her faz için gerekli iki adet olmak üzere en az altı bobin ve akı yolu relüktansını düşürmek için kullanılacak sac paketlerdir.

Bobinler hazırlanırken gerekli kriterler bobin teli çapı ve sarım sayısıdır. Tel cinsi olarak yaygın kullanılan emaye kaplı bakır tel kullanılmıştır. Tel kesiti tespit edilirken ise üzerinden geçecek olan çalışma akımı ve akımda oluşabilecek değişikliklerin süresi önemlidir. Burada akımdaki değişikliklerden kasıt, motorun sürekli olarak ileri-geri yönde yapacağı hareket yani osilatör olarak çalışacağı durumda faz sargılarında oluşacak frenleme akımlarıdır.

Tel kesiti hesaplanırken transformatör tasarım kriterleri referans alınmıştır. Tel kesitini şu iki değer belirler:

- Akım yoğunluğu (J)
- Devre akımı (I)

Kendi kendine soğuyan transformatörde akım yoğunluğu  $J=1,8-2,6$  Amper/mm<sup>2</sup> değerler arasında olması gerekmektedir. Akım belli olduktan sonra, "d" tel çapı yaklaşık olarak denklem (2.1) ile bulunur:

$$d = 0,7\sqrt{(I + 0,1)} \quad (2.1)$$

Burada " I " akımın sayısal değeri olarak yazılır ve " d " mm olarak bulunur. " d " çap ifadesindeki 0,1mm ilave emaye kalınlığıdır. Tel çapı bulunduktan sonra telin kesit alanı denklem (2.2) ile hesaplanabilir.

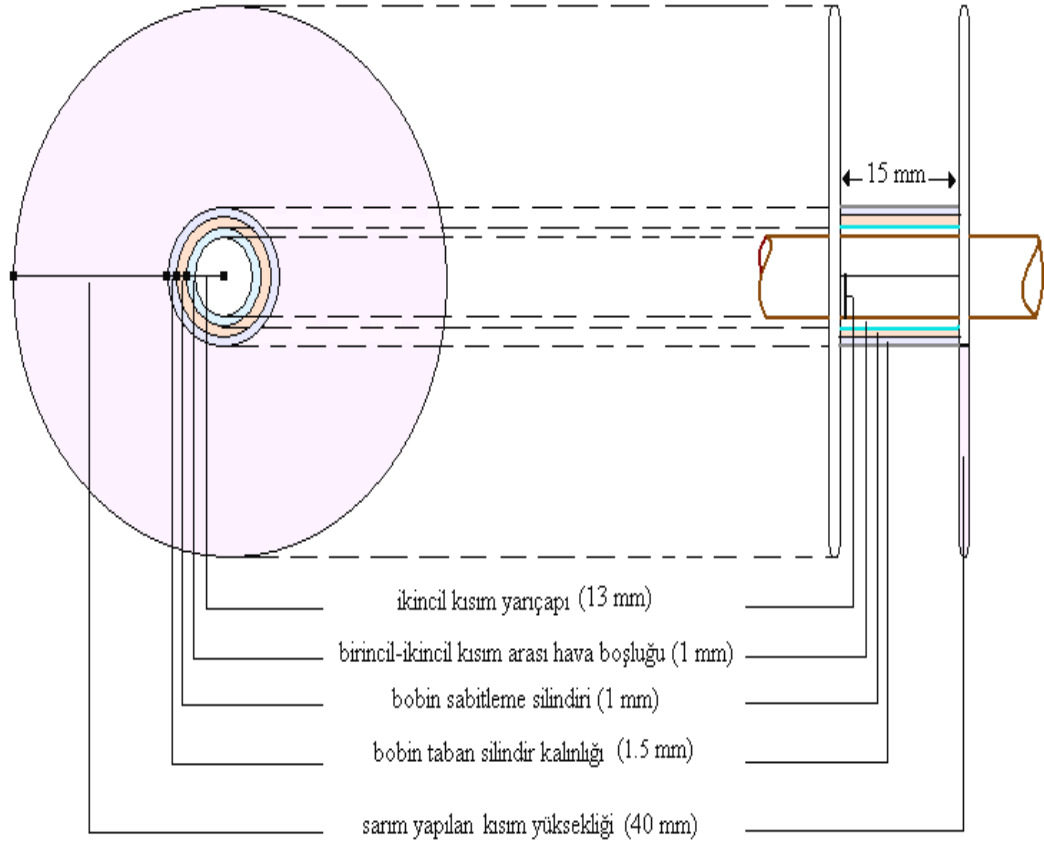
$$A_{tel} = \pi(d^2 / 4) = 0,785 d^2 \quad (2.2)$$

Tüm bu etkenler göz önüne alınarak tel çapı 0,8 mm seçilmiştir. Tel çapından sargı kesit alanını tespit etmek için Tablo 2.1. 'den yararlanılabilir:

Tablo 2.1. Tel çapına göre, 1cm<sup>2</sup> alana sığacak sarım sayısı

Çap (mm)	cm <sup>2</sup> 'ye sarım sayısı	Çap (mm)	cm <sup>2</sup> 'ye sarım sayısı	Çap (mm)	cm <sup>2</sup> 'ye sarım sayısı
0,08	8200	0,22	1400	0,8	125
0,10	5700	0,25	1140	0,9	101
0,12	4000	0,30	810	1	33
0,13	3130	0,35	502	1,1	69
0,15	2800	0,4	470	1,2	58,5
0,16	2500	0,5	308	1,3	50,5
0,18	2070	0,6	217	1,4	44,5
0,20	1720	0,7	164	1,5	39

Şekil 2.1.'de, kullanılan bobinlerden birine ait ölçüler verilmiştir. Sargı genişlikleri 18 mm ve sargı yükseklikleri 40 mm'dir. Fakat sarımların zarar görmemesi için bazı koruma tedbirleri alındığından net yükseklik 36 mm'ye ve net genişlik 15 mm'ye düşürülmüştür. Buradan sargı alanı 5,4 cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Tablo 2.1.'den sarım sayısı yaklaşık olarak 675 sarım olarak hesaplanır.

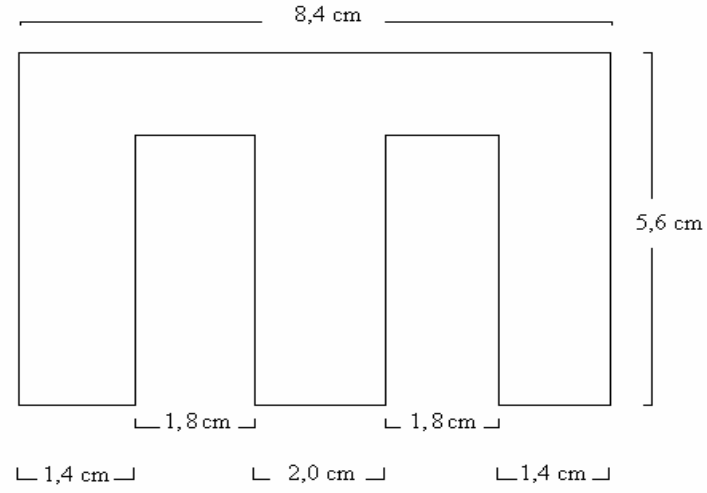


Şekil 2.1. Birincil kısım sargılarından birine ait ölçüler

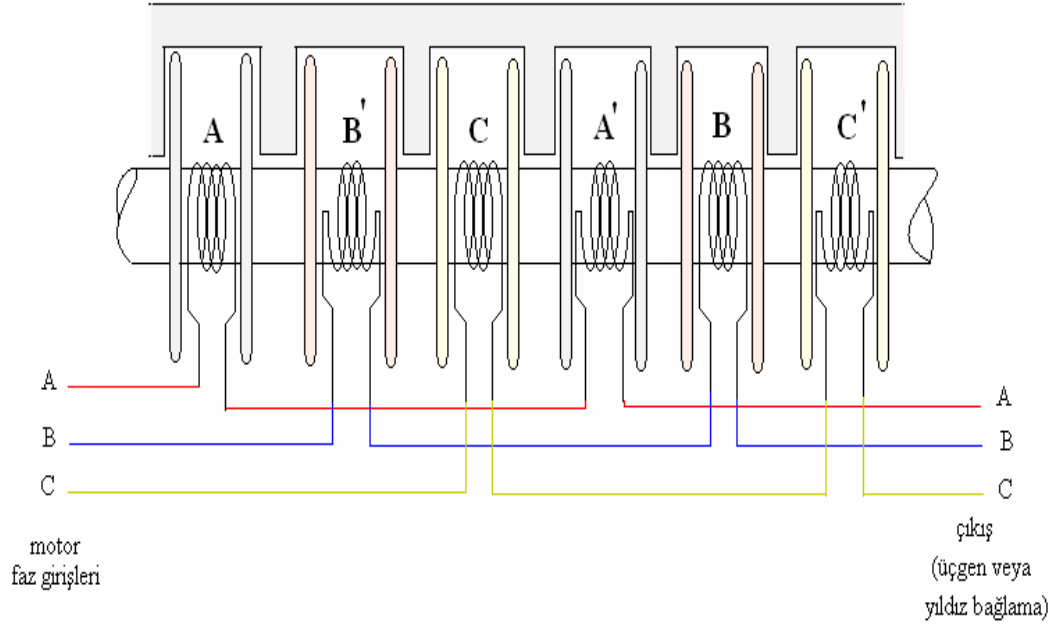
Bobinlerin yerleştirildiği stator olukları için endüstride yaygın olarak kullanılan trafo sac paketleri kullanılmıştır. Saclar tek tek uygun ölçülerde kesilerek bobinler için uygun oluklar elde edilmiştir. TYDHAM gerçekleştirilirken karşılaşılan sorunlardan biri de sac paketlerin içerisinde oluşan hava aralıklarıdır. Bu hava aralıklarını en aza indirmek için ilave sac parçaları bu hava aralıklarına yerleştirilmiştir. Sac paketlerin ölçüleri Şekil 2.2’de verilmiştir.

Faz sargıları Şekil 2.3.’de gösterildiği düzende bağlanmıştır. Klasik döner hareketli asenkron motorlardaki sargı bağlantıları, TYDHAM için kullanılmıştır. Üç fazlı döner bir alan oluşturmak için en az altı sargı gereklidir. Bu sargıların uygun bir düzende yerleştirilmesi gerekir. Şekil 2.3’deki düzende yerleştirilen sargılardan A-A’ arası mesafe kutup adım aralığıdır ve bu tez için tasarlanan TYDHAM kutup adım aralığı 11 cm’dir. A-C’ sargıları arası toplam mesafe 20 cm’dir.





Şekil 2.2. Kullanılan sac paketlerin ölçüleri

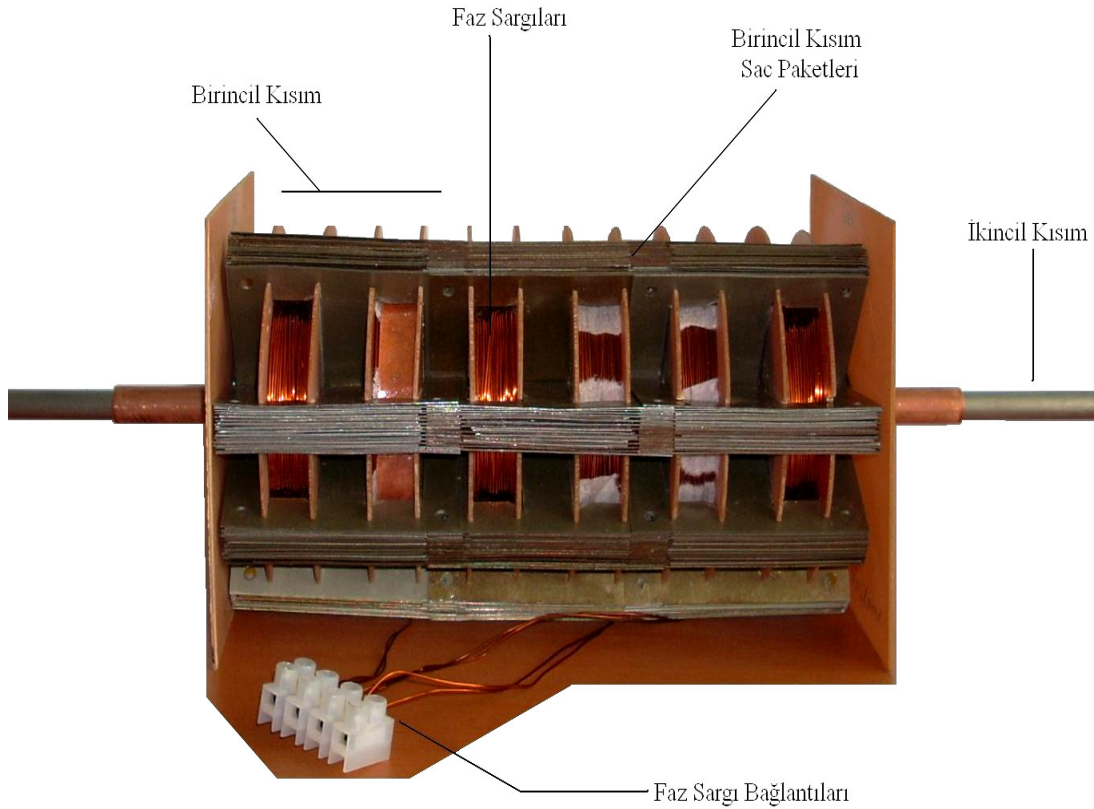


Şekil 2.3. Birincil kısım faz sargılarının bağlantıları

### 2.1.2 İkincil Kısım

TYDHAM ikincil kısmı, manyetik alandan etkilenmeyen bakır silindir ve bakır silindirin içine yerleştirilen, manyetik alanın etkideği çelik silindirden oluşmaktadır. Burada bakır silindir, başarımı iyileştirmek için kullanılır [25]. Bakır silindirin çapı 12 mm olup çelik silindir ile birbirine sabitlenmiştir. Motorun periyodik bir hareket yapabilmesi için birincil kısma sabitlenmiş iki adet anahtar bulunmaktadır. İkincil kısmın hareketli silindiri bu anahtarlardan herhangi birine temas ettiğinde sinyal üretilmektedir. Bu sinyal ile motora uygulanan 3 fazdan 2'si yer değiştirilir. Böylece motora uygulanan hareketli manyetik alanın yönü her anahtar sinyali ile yön değiştirir. Bu sayede periyodik olarak motor ileri-geri hareket yapmış olur.

Son hali ile motorun mekanik kısmının tamamlanmış modeli Şekil 2.4.'de verilmiştir.



Şekil 2.4. TYDHAM'un mekanik kısmının tamamlanmış modeli

## 2.2. Kontrol Kısımının Tasarımı

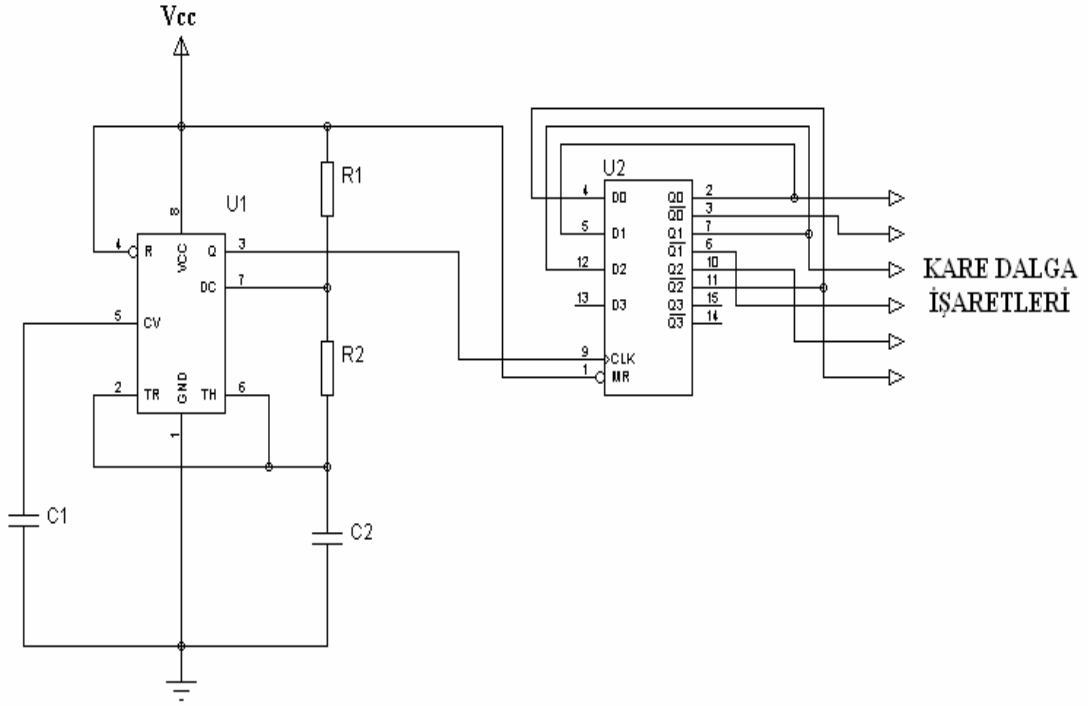
TYDHAM'nin kontrolü için farklı amaca yönelik üç devre kullanılmıştır. İlk devre kare dalga üreteç devresidir. Bu devre ile, aralarında 120°'er derecelik açı bulunan 3 işaret çifti elde edilmektedir. İkinci devre, IRAMS10UP60B tümlşik devresi kullanan güç devresidir. Üretilmiş olan kare dalga işaretleri kullanan bu devre ile d.a gerilim anahtarlanarak motora uygulanacak olan gerilim elde edilir. Üçüncü devre ise motora ileri-geri hareketini yaptıran yön değiştirme devresidir. 3 fazlı gerilimlerden ikisinin motora giriş uçları yer değiştirilerek motor hareket yönü değiştirilir.

### 2.2.1 Evirici İşaret Üretici

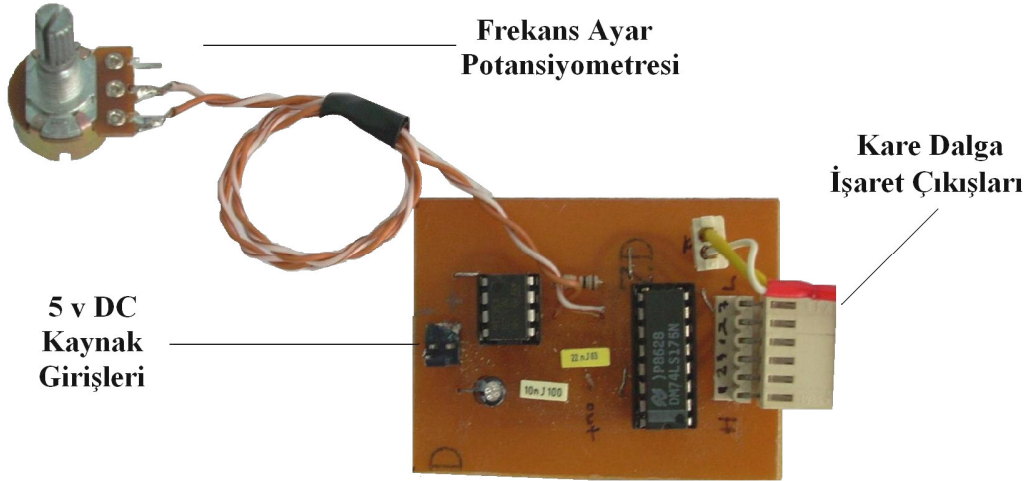
Altı adımlı evirici işaretlerinin elde edilmesi için kare dalga işaret üretici ve 120°'lik faz farklarını oluşturmak için flip-flop devresi kullanılmıştır. Kare dalga üretici kısmında bulunan  $R_2$  direnci yerine bir potansiyometre kullanıldığında kare dalganın frekansı ayarlanabilir hale gelir. Bu sayede üretilen evirici işaretlerinin de frekansı ayarlanabilmekte ve dolayısıyla motora uygulanan gerilimin frekansı da değiştirilebilmektedir. Şekil 2.5.'de kare dalga işaret üreteç devresi gösterilmiştir. Devredeki ilk kısım, frekansı ayarlanabilen bir kare dalga üretmektedir. Bu kare dalganın frekansı  $R_2$  potansiyometresi tarafından ayarlanabilmektedir. Kare dalganın frekansı denklem (2.3) ile verilmiştir.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_1} \quad (2.3)$$

f frekanslı kare dalga işareti, 4 adet flip-flop devresi içeren entegrenin giriş işaretidir. Entegre içindeki 3 flip-flop uygun şekilde bağlandığında aralarında 120° faz farkı olan 6 adet işaret dizisi üretir. Bu 6 işareten 3'ü, diğer 3'ünün tersleridir. Böylece işaret üreteç devresi ile 6 adet 60° faz farklı ve frekansları kare dalga işaretinin 1/6 'sı frekansa sahip işaretler elde edilmiş olur.



Şekil 2.5. Evirici işaret üreteç devresi

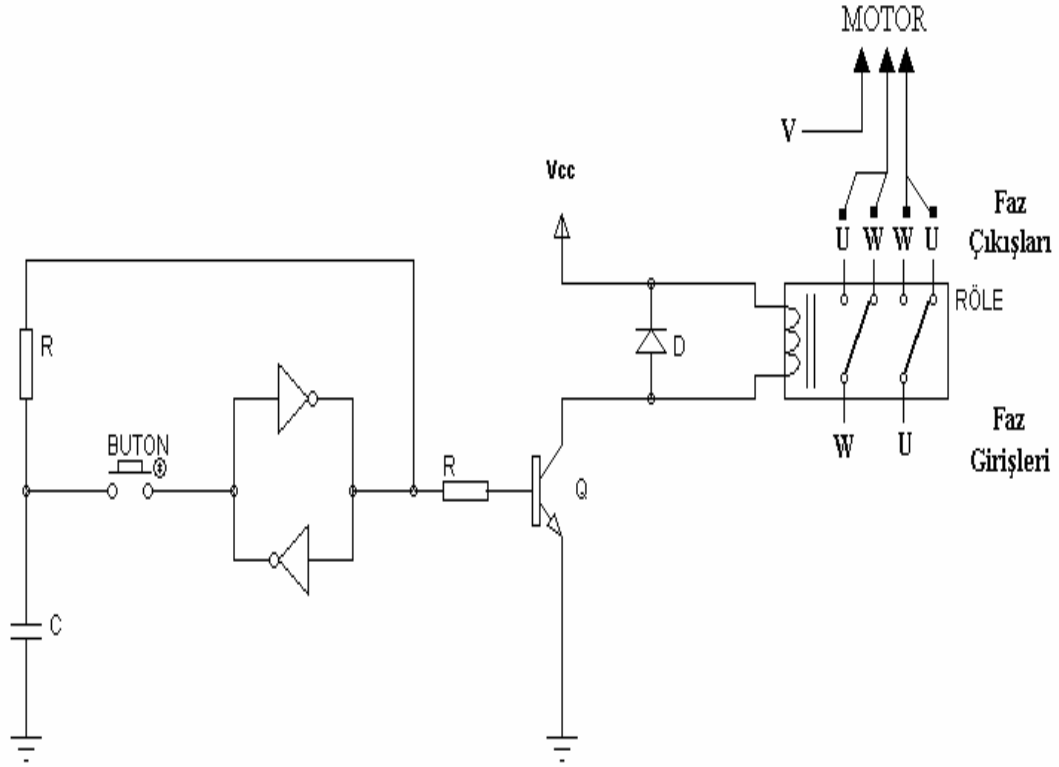


Şekil 2.6. Evirici işaret üreticinin gerçekleştirilmiş devresi

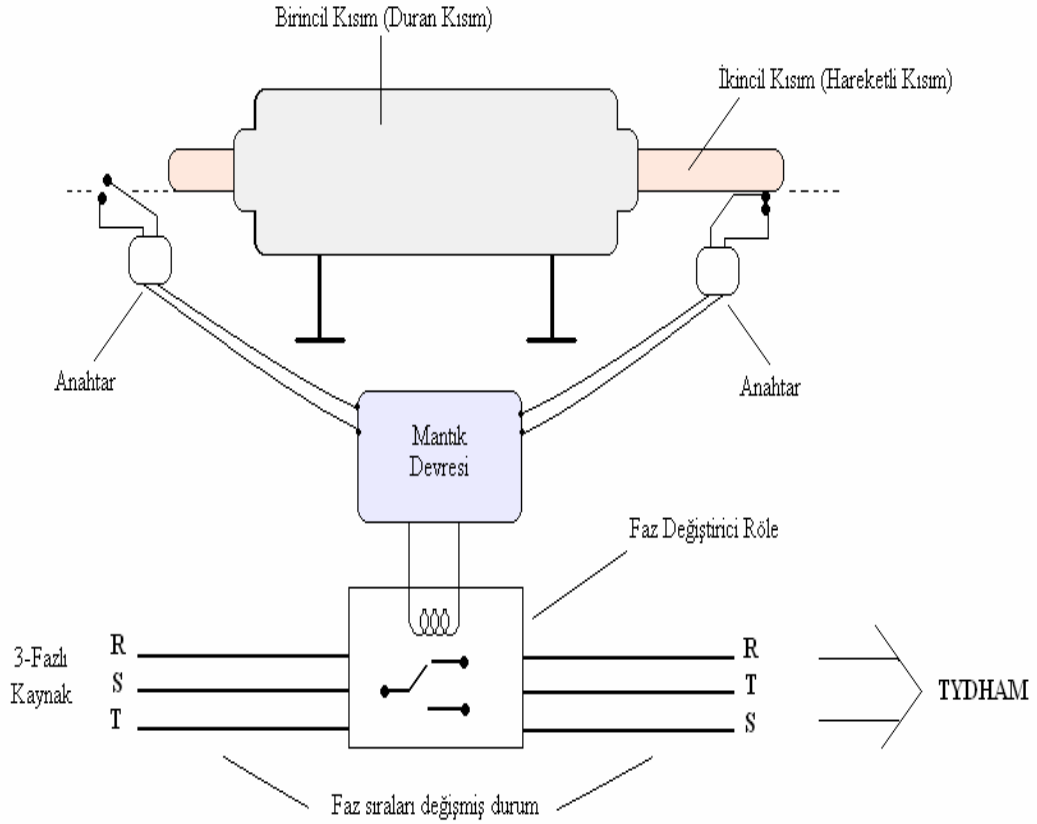


### 2.2.3 Yön Değiştirme Devresi

TYDHAM'un ileri-geri yönde sürekli ve ayarlanabilen bir hızda mekanik bir osilatör gibi yön değiştirmesi için bir anahtarlama devresi tasarlanmıştır. Yön değiştirme devresinde iki adet birbirinden bağımsız anahtar mevcuttur. Anahtarlardan herhangi birine her basıldığında entegre çıkış ucundaki gerilim seviyesi 0 veya 5 volt olarak değişir. Gerilimdeki bu değişimler, röleleri çalıştırıp durdurarak kontakları üzerinden iki faz geriliminin konumu değişir. Şekil 2.8.'de yön değiştirme devresinin elektronik kısmı, Şekil 2.9.'da ise elektronik kısım ile mekanik kısım bir arada gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Yön değiştirme devresi



Şekil 2.9. Elektronik anahtarlama devresi ile mekanik kısmın bağlantıları

Statorda oluşan doğrusal hareketli alanın hızı  $U_s$  ve kayma oranı  $s$  tespit edildiği takdirde rotor hızı  $U_r$  denklem (2.4) ile hesaplanabilir.

$$U_r = U_s(1 - s) \quad (2.4)$$

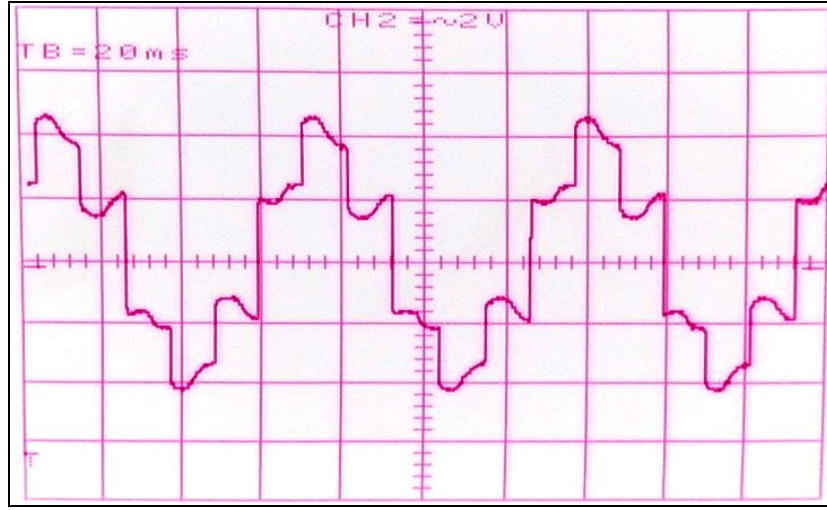
Kaynaktan çekilen toplam etkin güç  $P_T$  ise motor frekansı  $f$ 'nin üç farklı değeri için (1 faz değerleri kullanılarak) aşağıda verilmiştir:

$$f = 15 \text{ Hz için } P_T = 112.5 \text{ W,}$$

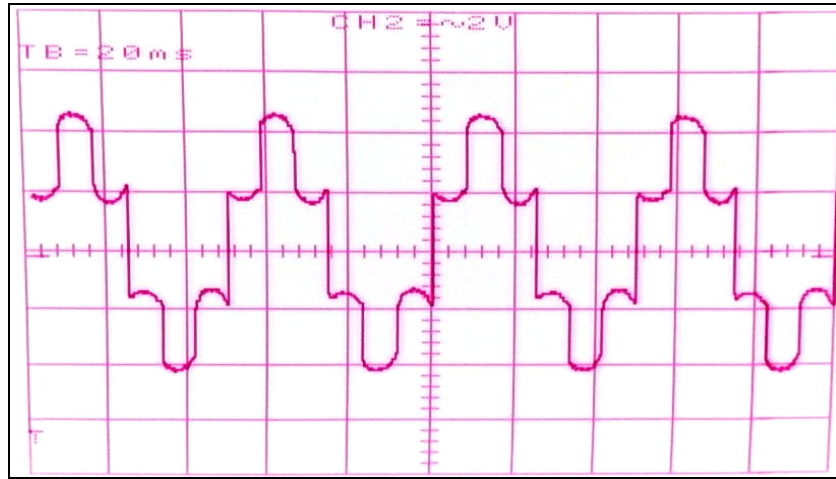
$$f = 30 \text{ Hz için } P_T = 60 \text{ W,}$$

$$f = 60 \text{ Hz için } P_T = 33.75 \text{ W.}$$

TYDHAM'nin altı adımlı evirici ile yapılan kontrolüne ait sonuçlar aşağıda verilmiştir. Burada değişik frekanslarda motorun bir fazına ait akım  $i$ , faz-nötr arası gerilim  $v$ , bir faza ait etkin güç  $P$ , değerleri elde edilmiştir.

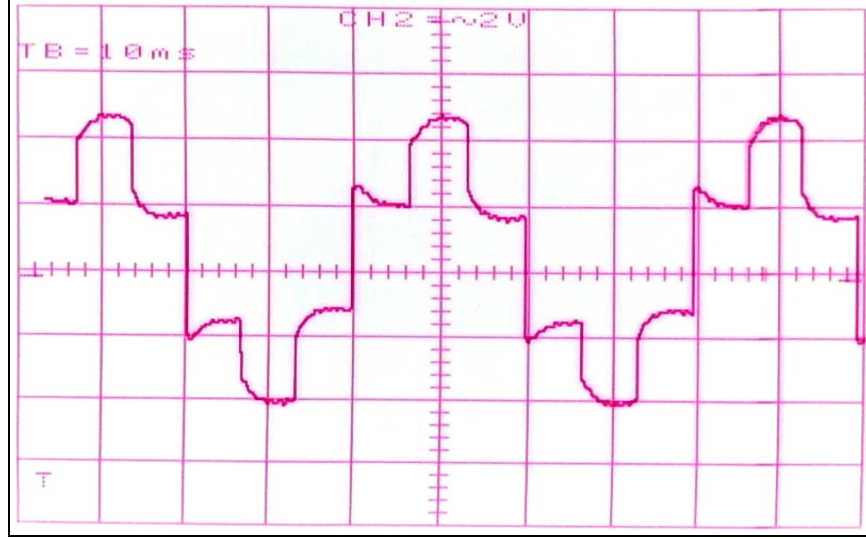


Şekil 2.10. Evirici frekansı  $f = 15$  Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli (  $P= 37,5$  Watt,  $v=27,10$  volt,  $i = 2,15$  Amper )

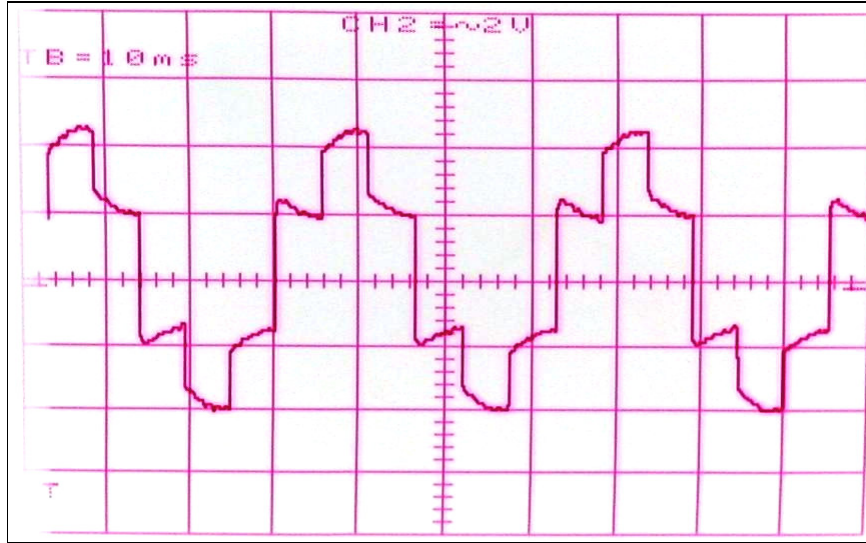


Şekil 2.11. Evirici frekansı  $f = 20$  Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli (  $P= 27,5$  Watt,  $v=27,80$  volt,  $i = 1,68$  Amper )

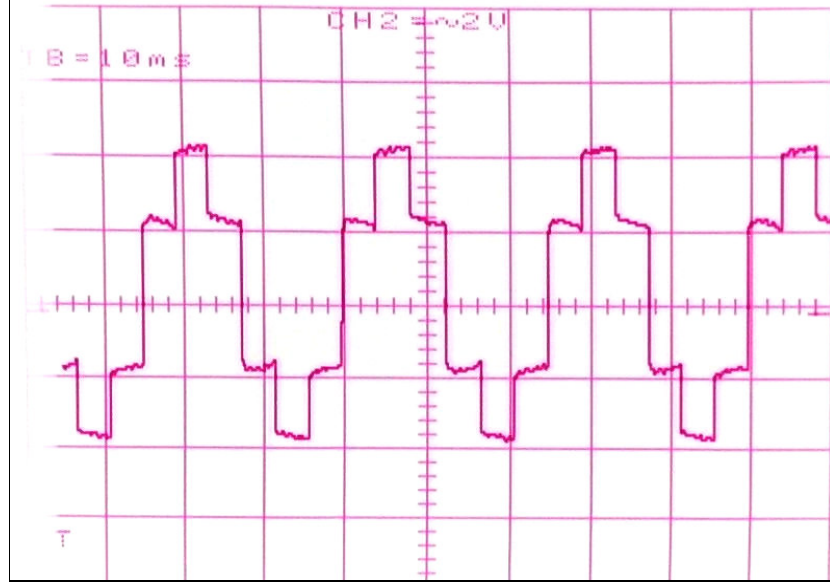




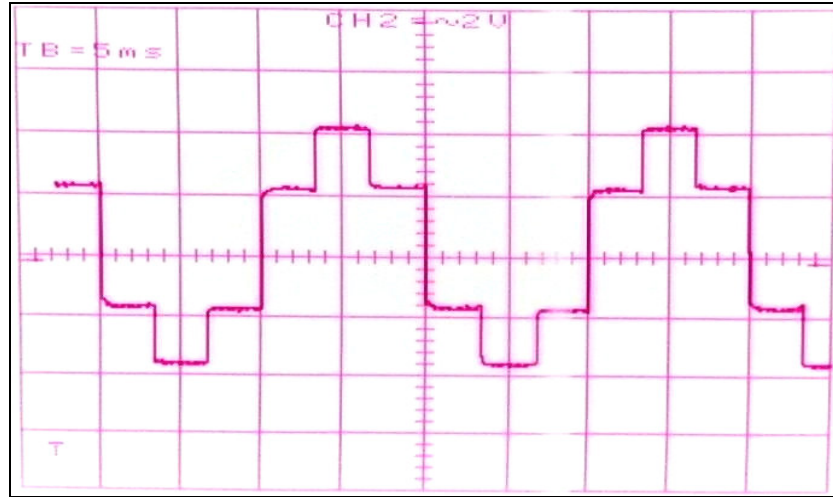
Şekil 2.12. Evirici frekansı  $f = 25$  Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli (  $P = 22,5$  Watt,  $v = 28,10$  volt,  $i = 1,39$  Amper )



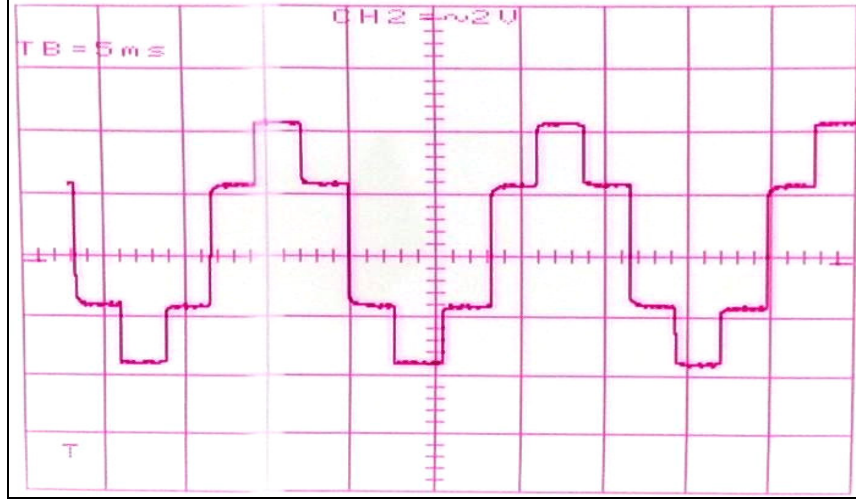
Şekil 2.13. Evirici frekansı  $f = 30$  Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli (  $P = 20$  Watt,  $v = 28,10$  volt,  $i = 1,16$  Amper )



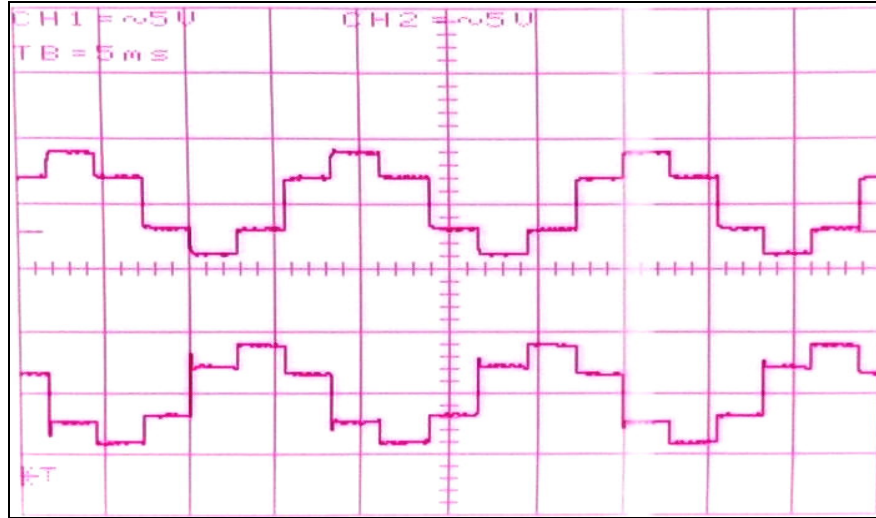
Şekil 2.14. Evirici frekansı  $f = 40$  Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli (  $P = 17,5$  Watt,  $v = 27,83$  volt,  $i = 1,02$  Amper )



Şekil 2.15. Evirici frekansı  $f = 50$  Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli (  $P = 13,75$  Watt,  $v = 28,08$  volt,  $i = 0,87$  Amper )



Şekil 2.16. Evirici frekansı  $f = 60$  Hz iken motora uygulanan gerilimin dalga şekli (  $P = 11,25$  Watt,  $v = 28,09$  volt,  $i = 0,78$  Amper )



Şekil 2.17. Evirici frekansı  $f = 60$  Hz iken motora uygulanan  $120^\circ$  faz farklı iki faz-faz gerilimin dalga şekli

### 3. SONUÇLAR

- TYDHAM'lar mekanik bir osilatör olarak düşük hızlarda kullanılabilir ve hız ayarlaması yapılabildiği tespit edilmiştir.
- Hareketli ikincil kısım olarak kullanılacak parça için ilk önce sadece manyetik iletken kullanılmış ve makinenin kalkınma esnasında aşırı akım çektiği tespit edilmiş; ikincil kısım manyetik iletkenin üzeri, manyetik yalıtkan bir metalle kaplandığında kalkınma akımının çok düştüğü ve makine performansının arttığı gözlenmiştir.
- Birincil kısım iç yüzey silindiri ile ikincil kısım dış yüzeyi aynı metalden olması aşınmaları en aza indireceğinden aynı metaller seçilmiştir.
- TYDHAM bir mekanik osilatör olarak kullanıldığında ileri-geri hareket esnasında oluşacak akım dalgalanmaları da göz önüne alınarak bir tasarım yapılmıştır.
- İkincil kısmın hareket mesafesi düşük olduğundan ivmelenmesi artmayacaktır. Bu durumda hareket yönü değiştirilirken ilave frenleme ve akım söndürme devrelerine ihtiyaç olmadığı tespit edilmiştir.
- Altı adımlı eviricinin kullanıldığı kontrol yönteminde düşük frekanslarda motorun ikincil kısmının ve güç anahtarlama elemanlarının beklenenden fazla ısındığı tespit edilmiştir.
- TYDHAM kullanımında, evirici işaret üreteç devresindeki ayarlı direnç ile frekans değiştirilerek hız ayarı yapılabilir.
- Eğer hız ayarı yanı sıra motor çıkış kuvvetinin de değiştirilmesi istenirse uygun bir faz farkı oluşturma devresi ilave edilebilir ve evirici işaret üreteç devresindeki R1 direnci yerine ayarlı bir direnç ve kullanılabilir. Böylece üretilen kare dalga tetikleme işaretlerinin doluluk-boşluk oranı değiştirilmek suretiyle evirici çıkış geriliminin genliği ayarlanır. Bu sayede Kare Dalga Darbe Genişlik Modülasyonlu (KDDGM) ile kontrol yapılmış olur.

#### 4. ÖNERİLER

- TYDHAM'lar mekanik bir osilatör olarak düşük hızlarda kullanılabilir ve hız ayarlaması kolaylıkla yapılabilir.
- Hava boşluğu dolayısıyla oluşan manyetik relüktans olabildiğince azaltılmalı ve hava boşluğunu en aza indirmek için ikincil kısım et kalınlığı olabildiğince az olmalıdır.
- Hareketli ikincil kısım olarak kullanılacak parçanın manyetik iletkenliği yüksek olmalıdır.
- Performansın artırılması için ikincil kısım iletkeninin dış yüzeyi bakır veya alüminyum gibi manyetik yalıtkan metallere kaplanmalıdır.
- Birincil kısım iç yüzey silindiri ile ikincil kısım dış yüzeyi aynı metalden olması aşınmaları en aza indireceğinden aynı metaller seçilebilir.
- Sargı endüktansı, kondansatör kapasitesi ve çalışma gerilimi uygun değerlerde seçilmelidir.
- TYDHAM bir mekanik osilatör olarak kullanıldığında ileri-geri hareket esnasında oluşacak akım dalgalanmaları da göz önüne alınarak bir tasarım yapılmalıdır. Sargı iletken kesiti, anahtarlama elemanlarının parametreleri ve diğer devre elemanlarının seçiminde bu husus dikkate alınmalıdır.
- İkincil kısmın hareket mesafesi düşük olduğundan ivmesi artmamaktadır, hız düşük olmaktadır. Hız veya ivmenin akım büyüklüğünde etken olacağı durumlarda ilave fren ve söndürme devreleri kullanılması gerekebilir.
- Makine, hızın bir fonksiyonu olarak periyodik hareket yapmaktadır. Hareket yönü, faz gerilimlerinin değiştirilmesiyle elde edildiğinden anahtarlama elemanları aşırı ısınacaktır. Kontrol devresi tasarımı yapılırken soğutucu seçimi ve güç devresi elemanlarının seçiminde ısınmalar da dikkate alınmalıdır.
- TYDHAM'lar genellikle düşük hızlarda kullanılmaktadır. Bu durum çalışma frekansının da düşük olduğu anlamına gelmektedir. Düşük frekanslarda motor gerilimindeki harmonikler artacağından aşırı ısınmalara sebep olabilir. Makine tasarlanırken ve kontrol yöntemi seçilirken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

## 5. KAYNAKLAR

1. Karaçar, E., Hidrolik ve Pnömatiğe Alternatif Çözüm; Doğrusal Motorlar Motorlar, II.Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, Kasım 2001, İzmir, Bildiriler Kitabı, 487-493.
2. Gürdal, O., Elektrik Makinalarının Tasarımı, Atlas Yayınları, İstanbul, 2001.
3. <http://www.compumotor.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf> Linear Motors Complement Today's Linear Motion Technologies Parker Hannifin Corporation 11 Mart 2007.
4. Budig, P. K., The Application of Linear Motors, IEEE Power Electronics and Motion Control Conference Proceedings, Ağustos 2000, Beijing, 3, 1336–1341.
5. Pandian, S. R., Takemura, F., Hayakawa, Y. ve Kawamura, S., Control Performance of an Air Motor – Can Air Motors Replace Electric Motors?, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Mayıs 1999, Kyoto, 1, 518–524.
6. Takemura, F., Pandian, S. R., Nagase, Y., Mizutani, H., Hayakawa, Y. ve Kawamura, S., Control of a Hybrid Pneumatic/Electric Motor, Proceedings of the 2000 IEEE/RSI International Conference on Intelligent Robots and Systems, Ekim 2000, Takamatsu, 1, 209–214.
7. Lequesne, B., Permanent Magnet Linear Motors for Short Strokes, IEEE Transactions on Industry Applications, 32, 2 (1996) 161–168.
8. Kim, W. J., Berhan, M. T., Trumper, D. L. ve Lang, J. H., Analysis and Implementation of a Tubular Motor with Halbach Magnet Array, Proceedings of the IEEE Industry Applications Society 31st Annual Meeting, Ekim 1996, San Diego, 1, 471–478.
9. Ishiyama, M., Makoto, I., Kitaoka, T., Matsumoto, Y. ve Yagoto, M., Linear Motor, 5955798, US Patent Issued, Kasım 1999.
10. Zhu, Z. Q., Hor, P. J., Howe, D. ve Rees-Jones, J., Novel Linear Tubular Brushless Permanent Magnet Motor, Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives, Eylül 1997, Cambridge, 91–95.
11. Ikeda, M., Hashimoto, H. ve Harashima, F., Robust Control of Linear DC Motor Using DSP, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Haziran 1993, Budapest, Conference Proceedings, 397–402.
12. Liaw, C. M., Shue, R. Y., Chen, H. C. ve Chen, S. C., Development of a Linear Brushless DC Motor Drive with Robust Position Control, IEE Proc.-Electr. Power Applications, Mart 2001, Hsinchu, 148, 111–118.

13. Shieh, N. C., Tung, P. C., Robust Output Tracking Control of a Linear DC Brushless Motor for Transportation in Manufacturing System, IEE Proc.-Electr. Power Applcation., Mart 2001, Chung-Li, 148, 119–124.
14. Brückl, S., Feed-Drive System with a Permanent Magnet Linear Motor for Ultra Precision Machine Tools, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Temmuz 1999, Hong Kong, 2, 821–826.
15. Basak A., ve Shirkoohi, G. H., Computation of Magnetic Field in DC Brushless Linear Motors with NdFeB Magnets, IEEE Transactions on Magnetics, 26, 3 (1990) 948-951.
16. [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2004/ICCC\\_Cracow\\_04.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2004/ICCC_Cracow_04.pdf) Linear Motor Control in Active Suspension Systems, MŞMT projects 21 Kasım 2007.
17. Freitas, J., Dias, J., Freitas A. ve Cabrita, C., Optimized Design Of The Tubular Induction Actuator Aided By Computer, Proceedings in 7th Mediterranean Electrotechnical Conference, Nisan 1994, Antalya, 2, 770 – 772.
18. Chevailler S., Comparative Study And Selection Criteria Of Linear Motors, Doktora Tezi, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE PRÉSENTÉE, la faculté SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIER, Suisse, 2006.
19. Hoang, V. N., Design Of A Single-Sided Linear Induction Motor, Lisans Tezi, School Of Information Technology And Electrical Engineering, University Of Queensland, Brisbane, 2003.
20. Nasar, S. A., Boldea, I., Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications, Prentice-Hall, Inc. Englewood, New Jersey, 1987.
21. Tsai, C. C., Hu, S. M. ve Chang, C. K., Vertical Linear Motion System Driven By A Tubular Linear Induction Motor, Mechatronics, 2005. ICM '05. IEEE International Conference on Dept. of Electr. Eng., Nat. Chung-Hsing Univ., Taichung, Temmuz 2005, 162- 167.
22. Dio, V., Montana, M., State Of Art Of Tubular Linear Induction Motor, 8th Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON, Mayıs 1996, Bari, 1, 285 – 288.
23. Mohan, N., Undealand, T. M., Robbins, W. P., Güç Elektroniği: Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım, Boğosyan, S., Gökaşan, M., Tuncay, N., 9758431994, Literatür- Ders Kitapları, Ankara, 2003.
24. O., Gürdal, Güç Elektroniği, 9756574070, Nobel Yayınları, Ankara, 2000.

25. [http://www.silisyum.net/htm/guc\\_kaynaklari/tel\\_ve\\_sargi\\_kesitinin\\_hesabi.htm](http://www.silisyum.net/htm/guc_kaynaklari/tel_ve_sargi_kesitinin_hesabi.htm) Tel ve Sargı Kesitinin Hesabı. 5 Kasım 2007.
26. Özkop, E., Doğrusal Hareketli Asenkron Motorun Bulanık Mantıkla Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.



## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında, Trabzon'un Sürmene İlçesi'nde doğdu. İlkokulu yurdun çeşitli illerinde tamamladıktan sonra 1999 yılında Sürmene Lisesi'nden mezun oldu. 2000 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2006 yılında bir kamu kurumunda saha kontrol mühendisi olarak çalışmaya başladı ve halen devam etmektedir. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.