T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI

Tezi Hazırlayan
Ümüt MUTLU

Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2006
KAYSERİ

Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN danışmanlığında **Ümüt MUTLU** tarafından hazırlanan **"Anahtarlamalı Relüktans Motor Sürücü Devre Tasarımı"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

27/07/2006

JÜRİ:

Başkan : Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şaban ÖZER

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 15/08/2006 tarih ve 2006/21-08 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

29/08/2006

Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin gerçekleşmesinde bilgi ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN ve Arş. Gör. Nurettin ÜSTKOYUNCU beye ve aynı zamanda Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünün saygıdeğer öğretim üyelerine teşekkür ederim.

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI

Ümüt MUTLU
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2006
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN

ÖZET

Son yıllardaki yarı iletken teknolojisinde meydana gelen hızlı gelişmelerden hem güç elektroniği elemanları, hem de mikrodenetleyiciler olumlu yönde etkilenmişlerdir. Şöyle ki, tek bir yarı iletken anahtar, kontakları arasına uygulanan bin voltun üzerindeki potansiyel farkı nano saniyeler mertebesinde açıp kapatabilmekte ve bu süre zarfında akıttığı akım değerleri yüzlerce amperle ifade edilmektedir. Aynı zamanda mikrodenetleyicilerin performansları ile birlikte kapasiteleri de artmış ve motor kontrol devrelerinin vazgeçilemez özeliği olan PWM gibi birçok fonksiyonu donanımsal olarak desteklemekte ve programsal olarak da kullanıcıya birçok kolaylıklar sağlamaktadırlar.

Bu çalışmada, Anahtarlamalı Relüktans Motorların (ARM) kullanımın alanını oldukça sınırlayan sürücü devrelerin yapılarından bahsedilmiş ve bu yapılardan birisi kullanılarak 6/4 lük bir ARM'nin kontrol devresi tasarlanmıştır. Bu devre üzerinde çalışacak olan kontrol yazılımı gerçekleştirilerek laboratuar ortamında uygulaması yapılmış ve test sonuçları elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, 1.BÖLÜM'de tezin literatürdeki yeri ve çalışmanın amacı verilmektedir. 2.BÖLÜM'de anahtarlamalı relüktans motorun temel özellikleri ve çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. 3.BÖLÜM'de ARM'lerin sürücü devrelerinde kullanılan çevirici yapıları üzerinde durulmuştur. 4. BÖLÜM'de gerçekleştirilen sürücü devre donanımından ve kontrol devresi yazılımından bahsedilmiştir. Son bölüm ise yapılan çalışmada elde edilen sonuçları içermektedir.

Anahtar Sözcükler: Anahtarlı Relüktans Motorları, IGBT, Sürücüler, Güç çeviriciler, Güç elektroniği.

SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DRIVER CIRCUIT DESIGN

Ümüt MUTLU
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, July 2006
Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ferhat DALDABAN

ABSTRACT

Both power electronic components and microcontrollers have been positively affected from fast growing variation in semiconductor technologies in recent years. In such a manner that, only one semiconductor switch able to on/off over thousand volt potential difference that applied between its contacts in nano seconds level and transferred current by switch has been expressed by hundreds of amperes in that time period. At the same time, capacities of microcontrollers have been increased together with their performance and they are supports a lot of function by hardware, like PWM that indispensable feature of motor control circuits and also provide much easiness for user by software.

In this study, structures of driver circuits that are pretty much limits Switched Reluctance Motors (SRM) usage area have been discussed and 6/4 SRM control circuit has been designed with using one of this structures. Control software that will run in this control circuit has been developed and applied at laboratory environment and related test results have been obtained.

In the first chapter of this study, the position of the thesis in literature and purpose of the study has been mentioned. In the second chapter, working principles and basic characteristic of switch reluctance motors has been discussed. In the third chapter, the converter structures which are used in SRM driver circuit have been dwelled on. In the fourth chapter, driver circuit hardware and control circuit software discussed. The last chapter includes results of the study.

Key Words: Switched reluctance motors, IGBT, Drivers, Power converters, Power electronics.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI i
TEŞEKKÜR ii
ÖZET iii
ABSTRACT iv
ŞEKİLLER LİSTESİ vii

1. BÖLÜM

GİRİŞ 1
1.1 Tezin Literatürdeki Yeri 1
1.2 Çalışmanın Amacı 3

2. BÖLÜM

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TEMELLERİ 6
2.1 Giriş 6
2.2 Elektrik Makineleri 6
2.2.1 Elektrik Makinelerinin Yapısı 7
2.3 Anahtarlamalı Relüktans Motorun Yapısı ve Çalışma Prensipleri 8
2.3.1 Anahtarlamalı Relüktans Motorun Temel Özellikleri 9
2.3.2 Değişken Relüktans 14
2.3.3 Eşdeğer Devre 15
2.3.4 Enerji Dönüşümü 17
2.3.5 Tork 20
2.3.6 Çalışma Prensipleri 23
2.3.7 Temel Parametreler 26

3. BÖLÜM

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR ÇEVİRİCİ DEVRELERİ 30
3.1 Giriş 30
3.2 Çevirici Devreleri 30
3.3 Çevirici Devrelerin Avantaj ve Dezavantajları 37
3.4 Uygulamalar 37

4. BÖLÜM

SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI 40
4.1 Giriş 40
4.2 Donanım Tasarımı 40
4.2.1 Çevirici Devresi 42
4.2.1.1 Çevirici Devresinin çalışma prensibi 43
4.2.2 Kontrol Devresi 44
4.2.2.1 IGBT Sürücü Entegreleri 46
4.2.2.2 Motor Pozisyon Sensörleri 46
4.2.2.3 Motor Kontrol Butonları 50
4.2.2.4 Bilgisayar Bağlantısı 50
4.3 Yazılım Tasarımı 51
4.3.1 Kesmeler 51
4.3.2 Mikrodenetleyici Yazılımı 52
4.4 Deneysel Çalışma 54

5. BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 57

KAYNAKLAR 59
EKLER 61
ÖZGEÇMİŞ 66

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 6/4 ARM Kesiti. 10
Şekil 2.2 Farklı dizilimlere sahip ARM'ler. 11
Şekil 2.3 En çok bilinen ve kullanılan ARM dizilimleri 12
Şekil 2.4 ARM' de Doğrusal çalışma için Rotor konumuna göre İndüktans değişimi. 13
Şekil 2.5 Akım ve Halkalanma Akısı arasındaki doğrusal olmayan ilişki. 13
Şekil 2.6 ARM'nin Tek Fazına Ait Elektriksel Eşdeğer Devre. 16
Şekil 2.7 Manyetizasyon Eğrisi ve Enerji İlişkisi. 18
Şekil 2.8 Alan Enerjisi, Ko-Enerji ve Mekanik İş. 19
Şekil 2.9 Sabit stator sargı akımında torkun indüktans ile değişimi. 21
Şekil 2.10 ARM'nin elektromanyetik alan dağılımı. 22
Şekil 2.11 Çeşitli Konumlar için Halkalanma Akılarının Durumları. 24
Şekil 2.12 Çeşitli Akım değerlerinde Rotor konumuna göre elde edilen İndüktans değişimi. 25
Şekil 2.13 Çeşitli Akım değerlerinde Rotor konumuna göre elde edilen Halka Akılarının değişimi. 25
Şekil 2.14 Çeşitli Akım değerlerinde Rotor konumuna göre elde edilen Tork değişimi. 26
Şekil 3.1 ARM Çevirici Sınıflandırması. 31
Şekil 3.2 Üç Fazlı Bir ARM için 2n Tipi Klasik Köprü Çevirici Devresi. 32
Şekil 3.3 n+1 Topolojisindeki ARM Çevirici Devresi. 33
Şekil 3.4 Split DC Çevirici Devresi. 34
Şekil 3.5 Üç Faz ARM için Bifilar Sargılı Çevirici Devresi. 34
Şekil 3.6 Üç Faz ARM için C-Vuruş Tipi Çevirici Devresi. 35
Şekil 3.7 Üç Fazlı ARM için Söndürme Dirençli Çevirici Devresi. 36
Şekil 3.8 Üç Faz ARM için Çift Eğimli Çevirici Devresi. 36
Şekil 4.1 ARM kontrol sisteminin yapısı. 41
Şekil 4.2 Üç Fazlı Bir ARM için 2n Tipi Klasik Köprü Çevirici Devresi. 42
Şekil 4.3 Motor pozisyon sensörü yerleşimi. 48
Şekil 4.4 Motor pozisyon sensörleri. 48

Şekil 4.5 Sensör çıkışlarının rotor konumu ile değişimi ve faz anahtar işaretlerinin değişimi. 49
Şekil 4.6 Çevirici devresi fotoğrafı 50
Şekil 4.7 Kontrol devresi fotoğrafı 51
Şekil 4.8 Motor Hızlanma Grafiği. 56

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Tezin Literatürdeki Yeri

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM), günümüzde kullanımı giderek yaygınlaşan bir elektrik makinası olup yapı olarak karşılaştırıldığında diğer elektrik makinalarına göre daha basittir [1]. Hava aralığındaki relüktans değişimi prensibini temel aldıklarından ve faz indüktanslarının değişken olmasından dolayı önceleri değişken relüktanslı motorlar olarak isimlendirilen ARM'ler, daha sonraları çalışma prensipleri göz önünde bulundurularak anahtarlamalı relüktans motorlar olarak isimlendirilmişlerdir.

Elektrik makinelerinin temel ilkeleri ilk kez Faraday tarafından ortaya konulmuştur. Faraday, manyetik alanla ilgili Oersted'in buluşlarından yararlanarak 1822 yıllarında, içinden akım geçen bir iletkenin manyetik alan tarafından itildiğini bulmuştur. Bu buluştan yararlanan Barlov, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ilk makineyi 1824 yılında yapmıştır. Barlov'un yaptığı ve Barlov tekerleği denilen yapı, ilk elektrik makinesi olarak bilinmektedir.

ARM'lerin çalışma prensipleri 1840 yılında Wheatsone ve Davidson tarafından tanımlanmasına rağmen motorun kontrolünde karşılaşılan güçlüklerden dolayı 1960' lı yıllara kadar çok önemli bir gelişme sağlanamamıştır. Bu bağlamda ilk önemli adım 1969 yılında Nasar ve Ofsenani tarafından atılmıştır [1,2]. Bunu takip eden yıllarda güç elektroniğinde kullanılan yarı iletken teknolojilerinin gelişimi, mikrodenetleyici yapılarında meydana gelen gelişmeler ve kontrol tekniklerinin de gelişimiyle paralel olarak ARM'lerin literatürdeki yeri artmaya başlamıştır.

Gerçekte bir senkron makinanın yapısına sahip olan ARM'ler, hem statorlarının hem de rotorlarının çıkık kutuplu yapıya sahip olmaları ve statorlarında D.C makinelerin

sargılarına benzer sargılar bulundurmalarına karşın rotorlarında herhangi bir sargı ve mıknatıs bulunmaması gibi bir takım özelliklere sahip olmaları yönünden diğer elektrik makinalarından ayrılmakta ve çalışma prensipleri de bu açıdan diğer makinalara göre değişiklik arz etmektedir.

Motorun çalışma prensibi relüktans kuvvetine dayanmakta ve serbest hareketli, çıkık kutuplu rotorun, bulunduğu magnetik devre içerisindeki akının, en kolay yol bulabileceği en küçük relüktans konumuna kadar kuvvet uygulanarak çekilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla ARM'lerde elektrik enerjisinin mekanik enerji olarak kullanımı relüktans kuvveti ile gerçekleşmektedir. Relüktans kuvveti, dönme hareketini sağlayan döndürme momentini oluşturmakta ve rotor kutbunun stator kutbuna göre konumu izlenerek faz sargılarının sırasıyla uyarılması ile sürekli döndürme momenti sağlanmaktadır [3].

ARM' lerin sahip oldukları avantajlardan önemli olanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ARM'ler yalnızca statorunda basit yapıda yoğun sargılar içerir.
- Rotorda herhangi bir sargı, fırça, mıknatıs, komütatör, kafes olmamasından dolayı daha az bakım gerektirir.
- Bu özelliklerinden dolayı ile ARM'lerin imalatı diğer motorlara nazaran çok daha kolay ve ucuzdur.
- Stator sargılarının yarı iletken anahtarlara seri bağlı olması sebebiyle herhangi bir kısa devre tehlikesi yoktur.
- Rotorun sargısız ve fırçasız yapıya sahip olması sebebiyle çok yüksek hızlarda çalışabilmektedir.
- Motora ait stator fazlarının birbirinden bağımsız çalışmalarından dolayı herhangi bir fazın arızalanması durumunda motorun dönmeye devam edebilmesinden dolayı hata toleransları yüksektir.
- ARM'ler aynı güç üretiminde daimi mıknatıslı motorlara (PMM) nazaran daha küçük boyutlu ve hafiftirler.
- Eylemsizlik momenti düşüktür ve yüksek kalkış momenti verebilir.
- Rotorun basit yapısı beraberinde bu motora sağlam bir yapı kazandırmıştır. Bu dayanıklı ve basit yapılı motorlar yüksek performanslı ve uzun ömürlüdürler.

ARM'lerin birçok avantaja sahip olmalarına rağmen, yakın zamana kadar çok fazla kullanım alanı bulamamışlardır. Bunun en önemli nedenleri arasında; rotor konumunun bilinmesinin gerekliliği ve dolayısıyla bir pozisyon sensörüne gereksinim duyulması, torkta meydana gelen ani çökmeler ve dolayısıyla oluşan tork dalgalılığı ile akustik gürültü gösterilebilir. Bununla birlikte ARM' lerin kullanıldığı uygulama alanlarından başlıcaları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Elektrikli otomobil ve motosikletler,
- Raylı ulaşım araçları,
- Çamaşır makineleri, elektrikli süpürgeler gibi elektrikli ev cihazları,
- Yazıcılar.

Literatürde yakın zamanda ARM'lerin sahip olduğu bu dezavantajları minimize etmek için birçok çalışma yapılmıştır [4-5]. Özellikle son yıllarda güç elektroniğinde kullanılan yarı iletkenlerin hızlarının ve akım kapasitelerinde oldukça artmış olması, mikrodenetleyicilerin hızlarının ve kapasitesinin yanı sıra, ARM'lerin kontrolünde temel teşkil eden PWM (Pulse Wide Modulation) gibi kontrol tekniklerini donanımsal olarak desteklemeleri ve kullanılan yazılımların, bu ve benzeri özellikleri gerçek zamanlı olarak işlemeye olanak sağlaması gibi gelişmeler ve çeşitli kontrol tekniklerinin de gelişimi, son zamanlarda yapılan çalışmaların bir kısmının bu yönde olmasını sağlamıştır.

Sunulan tezde, ARM'lerin kullanımın alanını oldukça sınırlayan sürücü devrelerin yapılarından bahsedilmiş ve bu yapılardan birisi kullanılarak 6/4 lük bir ARM'nin kontrol devresi tasarlanmıştır. Bu devre üzerinde çalışacak olan kontrol yazılımı gerçekleştirilerek laboratuar ortamında uygulaması yapılmış ve test sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada test sonuçlarından faydalanarak yazılımın ve donanımın nasıl geliştirilebileceğinden bahsedilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Son yıllarda teknolojinin gelişmesine paralel olarak artan rekabet, daha kaliteli ürünü daha kısa sürede daha az maliyetli üretebilme zorunluluğunu beraberinde getirmiştir. Geliştirilen sistemlerdeki daha yüksek performans, daha yüksek kararlılık, daha küçük

boyut, daha düşük gürültü ve daha az maliyet gibi özellikler sistem tasarımında gerçekleştirilmesi hedeflenen önemli parametrelerdir. Ayrıca, üretilen ürünlerin insan sağlığına ve çevreye uygun şartlarda üretilmiş olması da oldukça önemli diğer bir hususdur. Mühendisler bu gereksinimleri karşılayabilmek amacıyla araştırmalara devam etmektedirler.

Günümüzde elektrik makineleri en basitinden en karmaşığına birçok elektro-mekanik sistem içerisinde yer almaktadır. Bu sebeple elektrik makinelerinin tasarım parametrelerinin en uygun şekilde gerçekleştirilmesi makinenin doğrudan kullanım alanının artması olarak günlük hayata yansımaktadır.

Basit yapıları ve kullanılan çevirici yapısının basitliği nedeniyle endüstride kendine yer bulmaya başlayan ARM'ler hakkında yakın zamanda oldukça çalışma yapılmıştır. Ancak ARM'ler basit tasarım, düşük atalet, geniş hız aralığı, yüksek verim ve düşük maliyet gibi birçok avantaja sahip olmasına karşın faz geçiş anlarında torkta meydana gelen çökmeler, yüksek akustik gürültü ve konum tespitinin yapılmasının zorunluluğu gibi bir takım sıkıntılara da sahiptirler [6].

ARM'lerin birçok üstünlüklerine karşın endüstriyel alanlarda günümüze değin yeterince yer alamayışlarının en önemli sebeplerinden birisi olarak sahip oldukları tork dalgalanması gösterilebilir. Tork dalgalanmasının iyileştirilebilmesi için gerçekleştirilen çalışmalar genelde iki ana grup halinde toplanmaktadır:

- ARM'nin manyetik yapısında yapılacak değişiklikler vasıtasıyla torkun iyileştirilmesi,
- ARM'nin kontrol devresi ve kontrol tekniğinde yapılacak değişiklikler vasıtasıyla torkun iyileştirilmesi,

Literatürde bu konu ile ilgili olarak gerçekleştirilen çalışmalardan birçoğu sözü edilen ikinci gruba girmektedir. Özellikle maliyet giderlerinin fazla oluşu ve fazla zaman alması gibi nedenlerden dolayı ilk grupta yapılan çalışmalar sınırlı sayıda kalmaktadır.

Sunulan tezde, kontrol devresinde ve yazılımında yapılacak iyileştireler vasıtasıyla, motorun manyetik yapısında gerçekleştirilecek değişiklikler ile tork dalgalanmasında elde edilebilecek iyileştirmelerin incelenmesine temel teşkil edecek olan bir deney

düzeneğinin oluşturulması hedeflenmiştir. Aynı zamanda günümüzde otomatik kontrol alanında kullanımı giderek yaygınlaşan yapay zeka tekniklerinden yapay sinir ağları ve bulanık sistemlerin de kullanılması ile motorun kontrolü ve tork dalgalanması hususlarında gerçekleştirilen uygulamaların laboratuar ortamında test edilebileceği bir yapı da oluşturulmuş olacaktır.

2. BÖLÜM

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TEMELLERİ

2.1. Giriş

Bu bölümde Anahtarlamalı Relüktans Motorların (ARM) çalışma prensipleri ve matematiksel modelleri üzerinde durulacaktır. İlk olarak elektrik makineleri ve elektrik makineleri içerisinde ARM'nin yeri verilecek daha sonra ARM'lerin yapıları daha detaylı incelenecektir.

2.2. Elektrik Makineleri

Çeviriciler herhangi bir formdaki enerjiyi diğer bir forma dönüştürmekte kullanılırlar. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmekte kullanılan çeviricilere elektrik makineleri denir.

Elektrik makineleri tork üretim mekanizmalarına göre genel olarak iki sınıfa ayrılabilir. Bunlar elektromanyetik ve değişken relüktans mekanizmalarıdır.

Elektromanyetik olarak tork üretiminin olduğu elektrik makinelerinde, hareket stator ve rotor tarafından oluşturulan iki manyetik alanın etkileşimi ile üretilmektedir. Ortak olarak etkileşimli iki manyetik alan, alanların hizaya gelmesi prensibine göre manyetik tork oluşturmaktadır. Günümüzde ticari olarak kullanılan motorların çoğu bu prensiple çalışmaktadır. DC, indüksiyon ve daimi mıknatıslı motorlar bu motorlara örnek olarak verilebilir.

Değişken relüktans ile tork üretimi yapan ikinci kategorideki makinelerde, hareket, rotor ve stator arasındaki hava aralığındaki değişken relüktansın sonucu olarak üretilir. Relüktans, manyetik devrede akıya karşı gösterilen zorluk olarak tanımlanabilir. Bu durumda bir stator sargısına enerji verildiği zaman, bu enerji tek bir manyetik alan

üreterek, rotoru minimum relüktans konumuna hareket ettirecektir. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar bu ikinci çalışma prensibi ile tork üreten motorlardır.

2.2.1. Elektrik Makinelerinin Yapısı

Bir elektrik makinesi, stator ve rotor diye adlandırılan ve hava aralığı ile birbirinden ayrılan iki bölümden oluşur. Normalde hareket etmeyen ve motor gövdesine sabitlenmiş stator, motorun dış kısmıdır. Bir mil üzerinde dönebilecek şekilde bilyelerle motor gövdesine yataklanmış olan rotor ise içteki kısımdır.

Stator veya rotor oluklarına yerleştirilen iletkenler bir sargı oluşturacak şekilde içeriden birbirlerine birleştirilirler. İçerisinde gerilim indüklenen sargılar armatür sargıları diye adlandırılır. Akı üretmek için akımın geçtiği sargılar ise alan sargıları diye adlandırılır. Bazı makinelerde bu akıyı sağlamak için daimi mıknatıslar kullanılır.

Döner elektrik makineleri, DC makineler, senkron makineleri, ve asenkron (indüksiyon) makineler olmak üzere üç guruba ayrılırlar. Daimi mıknatıslı makineler, histerisiz makineler, step motorlar ve relüktans motorlar bu guruplara girmeyen makinelerdir.

DC makinede alan sargıları statora ve armatür sargıları rotora yerleştirilmiştir. Makinede akı üretmek için alan sargılarından bir DC akım geçirilir. Armatür sargılarında indüklenen gerilim değişkendir. Gerilimin doğrultulması veya akımın yön değiştirmesi komütatör ve fırça sistemi ile gerçekleştirilir.

Senkron makinede rotor alan sargılarını, stator ise armatür sargılarını taşır. Alan sargıları hava aralığında akı üretmek üzere bir DC akımla uyarılır. Rotor döndüğünde stator oluklarına yerleştirilen armatür sargılarında gerilim indüklenir. Armatür akımı hava aralığında rotor hızı ile aynı hızda dönen bir akı meydana getirecektir. Rotor hızı ile akı hızının aynı olması sebebiyle bu makine senkron makine olarak adlandırılır.

İndüksiyon makinesinde (asenkron) stator sargıları, hem armatür sargıları hem de alan sargıları olarak iş görürler. Bu makinelerde hem statorda hem de rotorda alternatif akım vardır. Alternatif akım doğrudan stator sargılarına uygulanır. Rotor sargılarındaki akım ise indüksiyon yolu ile oluşur. İndüksiyon makinesi denmesinin sebebi budur. Biraz

daha ayrıntılı bakıldığında indüksiyon makinesi şöyle çalışır: Stator sargıları bir AC kaynağa bağlandığında hava aralığında bir akı oluşacak ve bu akı, senkron hız diye bilinen sabit bir hız ile hava aralığında dönecektir. Bu dönen akı, rotor sargılarında olduğu gibi stator sargılarında da bir gerilim indükleyecektir. Rotor devresi bir kapalı devre oluşturursa, rotor devresinden bir akım akacak bu akımın dönen akılar ile etkileşmesi sonucu tork oluşacaktır. Sürekli çalışma durumunda rotor hızı senkron hıza çok yakındır. Rotor, stator gibi sargılara sahip olduğu gibi sincap kafes tipi denilen kısa devre iletkenli de olabilir. Sincap kafes tipi sargı alüminyum yada bakır çubukların rotor gövdesindeki oluklara yerleştirilerek sonları kısa devre edilmek sureti ile elde edilir.

2.3. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Yapısı ve Çalışma Prensipleri

Anahtarlamalı relüktans motorlar, taşıdığı özellikleri ve yapısı ile senkron ve asenkron makinelerden oldukça farklıdır, ancak hem senkron hem de asenkron makinelerin yapısından faydalanılarak meydana getirilmiştir [7]. Stator ve rotorun geometrik yapısı üzerinde değişiklikler yapılarak oluşturulan yeni yapılar incelenmiş ve sonuçta daha verimli motorlar elde edilmeye çalışılmıştır. İlk ARM, senkron motor yapısı üzerinde değişiklikler yapılarak tasarlanmıştır. Yapılan bu çalışmalarda stator ve rotor arasındaki hava boşluğunda depolanan enerjiden daha fazla istifade edilebilmesi amaçlanmıştır.

İlk ARM'ler indüksiyon motorlarından daha ağır ve daha geniş boyutlarda idiler. Ancak bu motorlar üzerinde yapılan çalışmalar ile hacimleri küçültülmüş ve dolayısıyla hafifletilmiştir. Günümüzde ARM'ler üzerinde en çok çalışma yapılan elektrik makinelerinin başında gelmektedir. Bunun en önemli sebebi ise diğer motorlara nazaran önemli avantajlara sahip olmalarıdır.

2.3.1. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Temel Özellikleri

Anahtarlamalı relüktans motorlar, hem stator hem de rotorlarında çıkıntılar bulundurduklarından çift çıkıntılı bir yapıya sahiptir. Bu sebeple çıkıklı yada çift çıkıklı motorlar olarak bilinmektedirler. Gerçekte bir çeşit senkron motor olan ARM'lerin rotorlarında herhangi bir mıknatıs, sargı yada kısa devre halkası bulunmayıp sadece masif demir veya saç paketi içermektedir [6]. Stator da ise DC motorların sargılarına

benzer şekilde basit yapılı ve ince telli sarımlardan oluşan yoğun sargılar bulunmaktadır.

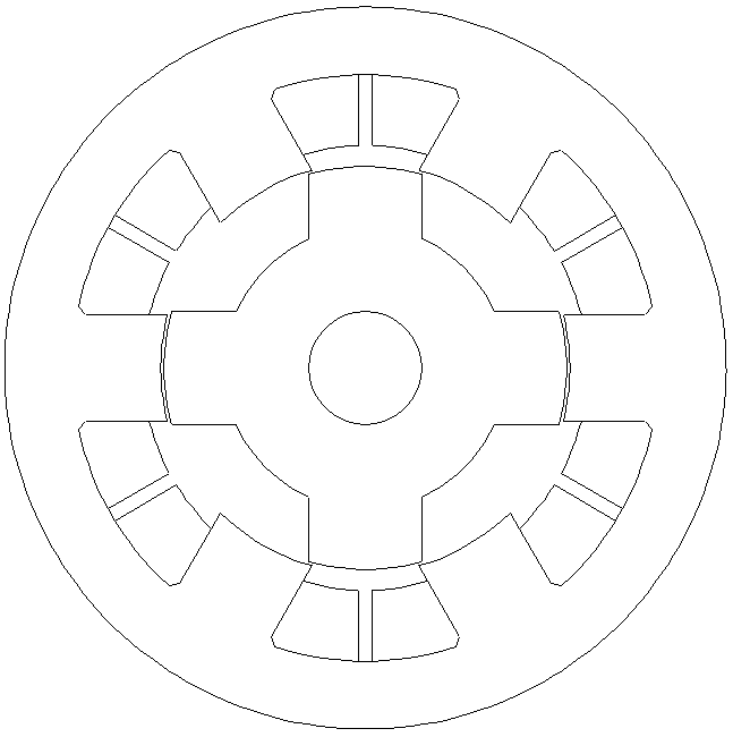
Adım motorundakine benzer şekilde ARM'lerde de karşılıklı iki stator kutbu bir faz oluşturmaktadır. Stator ve rotor nüvelerinin her biri, demir kayıplarını azaltmak açısından ince yaprak halinde lamine saçlardan imal edilmektedir. Genelde stator ve rotor kutup sayılarına göre isimlendirilen ARM'lerde, yüksek hız gerektiren uygulamalarda rotor kutup sayısı stator kutup sayısına göre küçük seçilirken, yüksek tork gerektiren uygulamalarda ise rotor kutup sayısı stator kutup sayısına oldukça yakın seçilmektedir.

ARM'lerde genellikle stator kutupları rotor kutuplarına göre daha dar tutulmaktadır. Bunun nedeni, statordaki herhangi bir faz uyarıldığında oluşan manyetik alandan daha fazla yararlanabilmek için sargılara daha geniş yer sağlamaktır [6].

Stator ve rotor kutup genişliklerinin seçimi tahrik sisteminin özelliklerine bağlıdır. Ancak bunun yanında negatif moment üretiminden kurtulmak ve her fazın pozitif ve negatif moment üretme bölgelerini ayırabilmek için rotor kutuplarının genişliği, stator kutuplarının genişliğinden daha büyük seçilmektedir.

Rotor ve stator çıkık sayıları çift sayıda olmak üzere sayıca birbirinden az, fazla yada birbirine eşit olabilir. Çoğunlukla stator çıkık sayısı rotor çıkık sayısından daha fazladır. Stator ve rotor çıkık sayıları yada ARM'nin tipi stator sayısı/ rotor sayısı şeklinde ifade edilmektedir. Örneğin 8/6, 8 stator çıkığına, 6 rotor çıkığına sahip bir ARM'yi temsil ederken, 6/4, 6 stator çıkığına ve 4 rotor çıkığına sahip bir ARM'yi temsil etmektedir. Şekil 2.1' de 6/4 yapıdaki bir ARM'ye ait kesit görülmektedir.

Karşılıklı olarak birbirine seri şekilde bağlantısı yapılmış olan 2 stator kutup sargısı ARM'nin bir fazını oluşturmaktadır. ARM'lerin tek fazlı olarak 2/2, 4/4, 6/6, 8/8; çift fazlı olarak 4/2, 8/4, 4/6, 8/6; üç fazlı olarak 6/4, 6/8, 12/8, 18/12, 24/16, dört fazlı olarak 8/6, 16/12 gibi birçok değişik dizilimleri oluşturulabilir. Bu dizilimler arasında 3 fazlı 6/4, 4 fazlı 8/6 en çok bilinen ve kullanılan dizilimler iken 3 fazlı 12/8 dizilimi de 6/4 ve 8/6 dizilimlerine göre daha az olmakla birlikte kullanılmaktadır.

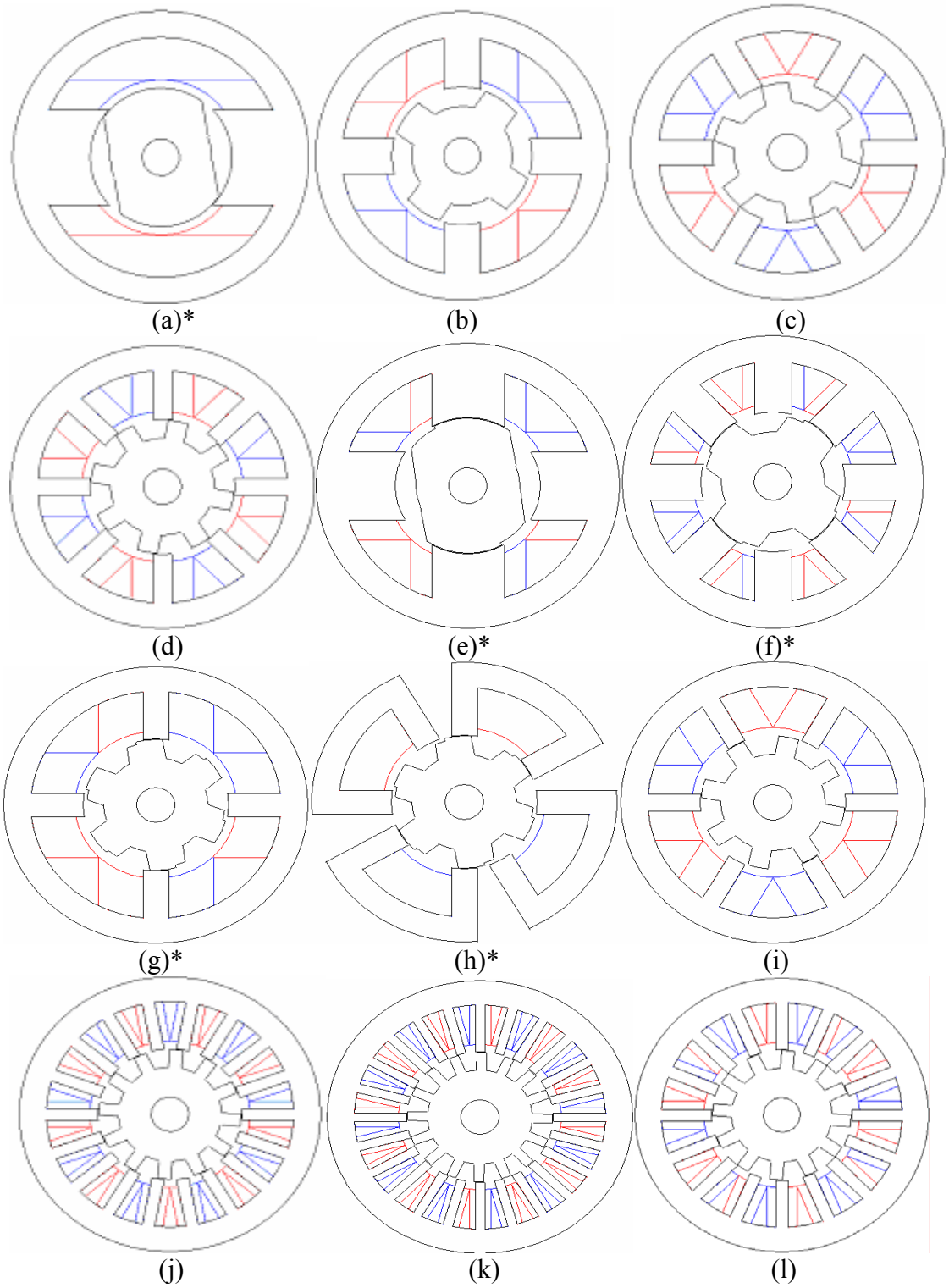


Şekil 2.1. 6/4 ARM Kesiti.

Senkron motorlarda rotor ve hava aralığı hızı aynı olmasından dolayı kalkınma problemi vardır. ARM'de ise rotor ve stator yapısı çıkıklardan müteşekkildir. Rotor ve stator çıkık sayısı birbirinden farklıdır. Bu sebeple senkron motorlarda olduğu gibi kalkınma problemi yaşanmaz. Kalkınma probleminin olmaması yönüyle bu motorlar asenkron motorlara benzerler.

Şekil 2.2'de çeşitli dizilimlere sahip ARM'ler, Şekil 2.3'de ise en çok bilinen ve kullanılan dizilimler görülmektedir.

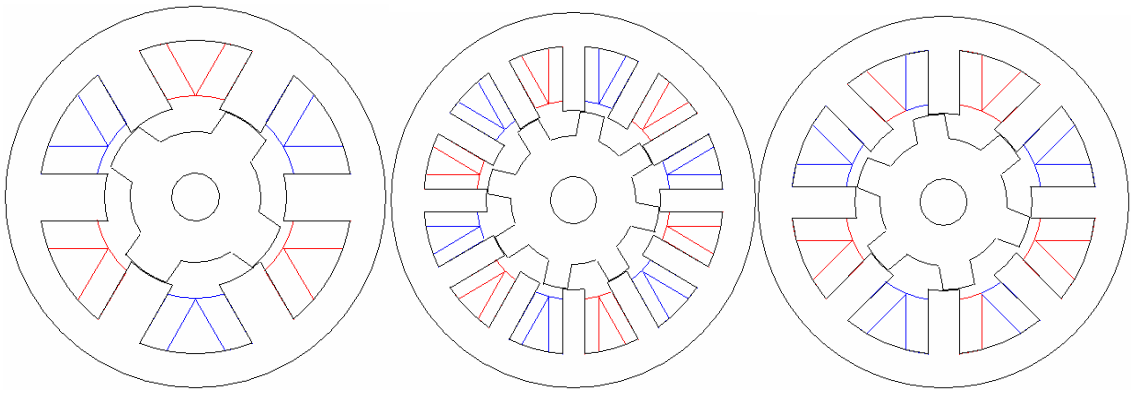
ARM'nin bu farklı dizilimleri arasından tek fazlı 2/2, iki fazlı 4/2, 8/4, 4/6, 8/6 (Şekil 2.2. a, e, f, g ve h) dizilim yapısına sahip olanlar yapıları teorikte düşünülebilir olmasına karşın yeterli kalkınma torkunu en iyi konumda dahi üretmek mümkün olmadığından pratikte hiçbir anlam ifade etmemektedir.



Şekil 2.2. Farklı dizilimlere sahip ARM'ler.

(a) Tek faz 2/2,	(b) Tek faz 4/4,	(c)Tek faz 6/6,	(d) Tek faz 8/8,
(e) İki faz 4/2,	(f) İki faz 8/4,	(g) İki faz 4/6,	(h) İki faz 8/6,
(i) Üç faz 6/8,	(j) Üç faz 18/12,	(k) Üç faz 24/16,	(l) Dört faz 16/12.

* Kalkınma torkunun üretilemediği ARM dizilimleri.



(a) (b) (c)

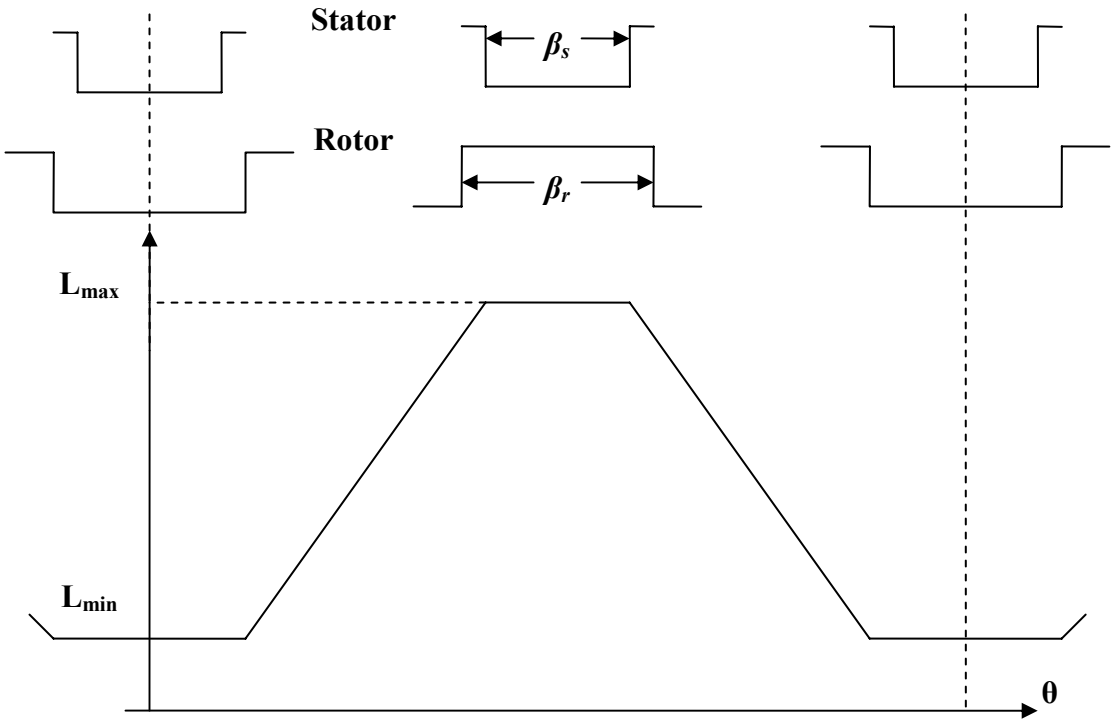
Şekil 2.3. En çok bilinen ve kullanılan ARM dizilimleri
(a) Üç faz 6/4, (b) Üç faz 12/8, (c) Dört faz 8/6.

ARM'nin indüksiyon motorundan en önemli farkı ise uygulanan gerilimin yapısı itibarı iledir. İndüksiyon motorlarında hem rotor hem de statorda alternatif akım varken ARM'lerde yalnızca stator sargılarına, sırasıyla akım darbe şeklinde verilir. Çalışma prensibi temel olarak stator sargılarına akım uygulayarak hava aralığında oluşan relüktansın değiştirilmesi aracılığı ile rotorun hareketinin sağlanması ve tork elde edilmesi şeklindedir. ARM'lerde rotor hiçbir iletken, sargı vs. içermez ve çok sade bir yapıdadır.

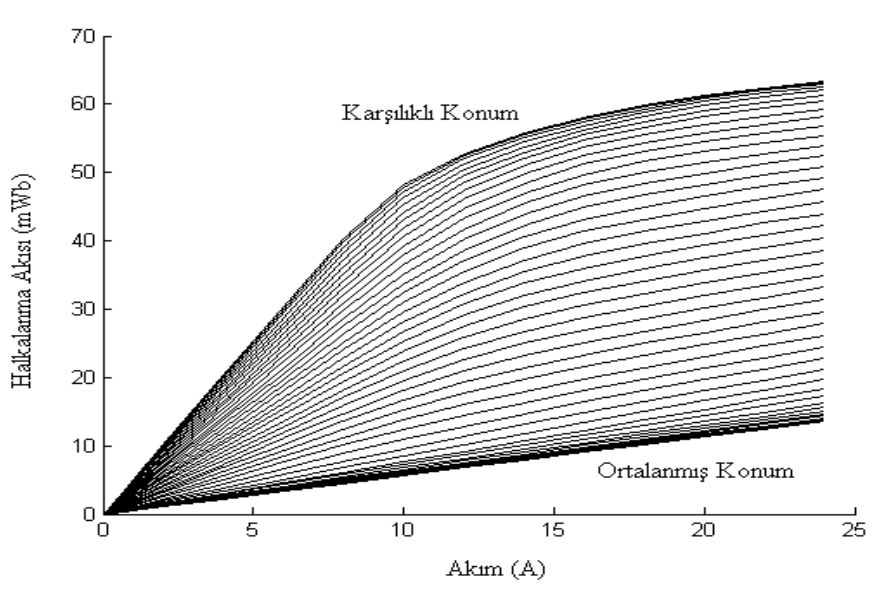
ARM'lerin döndürme momenti akımın yönüne değil sadece genliğine bağlıdır. Dolayısıyla motorun sürücü devresinde kullanılacak yarı iletken sayısı diğer sürücülere nazaran daha azdır. Bunun yanında tork değeri indüktansın değişimine bağlı olduğundan, eğer akım indüktansın artma yönünde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olurken, akımın indüktansı azaltma yönünde olması durumunda ise negatif olacaktır.

Akım darbelerinin, indüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağının tespit edilmesi ve bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle ilgili rotor pozisyonu bilgisinin elde edilebilmesi için optik yada alan etkili sensörlerin kullanımı gerekmektedir. Şekil 2.4' de doğrusal çalışma için rotorun statora göre olan

konumuna göre indüktans değişimi, Şekil 2.5'de ise motora ait akım ve halkalanma akıları arasındaki doğrusal olmayan ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2.4. ARM' de Doğrusal çalışma için Rotor konumuna göre İndüktans değişimi.



Şekil 2.5. Akım ve Halkalanma Akısı arasındaki doğrusal olmayan ilişki.

Şekil 2.4'de verilen indüktans değişimi doyumsuz durum içindir. Normal çalışmada ise motorun doğrusal olmayan yapısından dolayı doğrusal olmayan bir indüktans değişimi gözlenecektir.

2.3.2. Değişken Relüktans

Relüktans, elektrik devresindeki rezistansın manyetik devredeki karşılığı şeklinde düşünülebilir. Bir manyetik devrede relüktans, rotor ve stator arasındaki hava aralığının manyetik direncidir. Elektrik devresinde rezistans elektrik akımına karşı zorluk gösterirken, manyetik devredeki relüktans manyetik akının dolaşımına zorluk gösterir. Ancak relüktans manyetik devre içerisinde sürekli değişkendir ve her noktada aynı değerde değildir.

ARM'lerde rotor konumuna göre halkalanma akılarının izlediği yol değişmekte ve bu da manyetik devredeki relüktansın değişimine neden olmaktadır. Herhangi bir manyetik devrenin relüktans ifadesi Eşitlik 2.1 ile verilebilir.

$$\Re = \frac{F}{\phi} = \frac{Hl}{BS} = \frac{l}{\mu S} \tag{2.1}$$

Eşitlik 2.1 ifadesinde yer alan $\Re$ gösterimi relüktansı, F magneto motor kuvvetini, ϕ akıyı, H hava aralığındaki manyetik alan şiddetini, l manyetik yolun uzunluğunu, B akı yoğunluğunu, S manyetik yolun kesit alanını ve μ ise manyetik malzemenin manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.

ARM'de özellikle l, μ ve S parametreleri rotorun açısal değişimi ile birlikte manyetik devre relüktansının değişimine neden olmaktadır. Öyle ki stator ve rotor kutupları karşılıklı pozisyona gelmeden önceki ortalanmış pozisyonda manyetik geçirgenlik değeri μ , boş uzayın geçirgenliği olan μ_0 değerine eşittir ve bu değer de malzemenin geçirgenliği ile karşılaştırıldığında çok küçük bir değerde olmaktadır. Dolayısıyla ortalanmış konumda relüktans değeri maksimum değerini almaktadır. Ancak rotor ve stator kutuplarının karşılıklı pozisyon konumuna yaklaşmaları durumunda artan örtüşüm alanıyla birlikte geçirgenlik değeri de hızlı bir şekilde artacak ve dolayısıyla da relüktans değeri azalacaktır. Rotor ve stator kutupları tamamen karşılıklı konuma

geldiklerinde ise örtüşüm alanı maksimum olacak ve dolayısıyla da manyetik geçirgenlik maksimum değerine ulaşacaktır. Bir başka deyişle manyetik devrenin relüktansı minimum değerini alacaktır [8].

Ortalanmış konumda relüktans değerinin maksimum olması nedeniyle akı doyumda olmayacak ve ortalanmış konumdan karşılıklı konuma geçiş sırasında azalan relüktans değeri ile birlikte doyuma geçmeye başlayacak ve karşılıklı konumda en yüksek doyuma ulaşacaktır.

Genellikle ARM'lerde relüktans yerine daha çok kullanılan kriter indüktans değeri olup bu iki değer arasındaki ilişki Eşitlik 2.2' deki gibi ifade edilebilir.

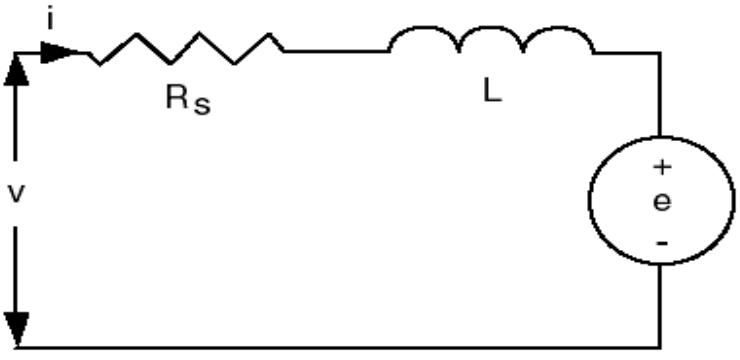
$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\Re} \tag{2.2}$$

Eşitlik 2.2' de λ ifadesi halkalanma akısı değerini, i ifadesi faz akımını ve N ifadesi ise faza ilişkin sarım sayısını göstermektedir.

2.3.3. Eşdeğer Devre

ARM'lerin çalışma prensibi relüktans kuvvetine dayanmakta ve serbest hareketli, çıkık yapılı rotorun, bulunduğu manyetik devre içerisindeki akının, en kolay yol bulabileceği en küçük relüktans konumuna kadar kuvvet uygulanarak çekilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Şekil 2.6'de ARM'nin tek fazına ait eşdeğer devre gösterilmiştir.

Şekil 2.6'da verilen devrede R_s, Her bir faz için stator sargılarına ait direnci ve L indüktans değerini temsil etmektedir.



Şekil 2.6. ARM'nin Tek Fazına Ait Elektriksel Eşdeğer Devre.

Burada her bir faza uygulanmakta olan gerilim değeri Eşitlik 2.3'deki gibi verilebilir.

$$V = R_s i + \frac{d\lambda(\theta,i)}{dt} \tag{2.3}$$

ve

$$\lambda = L(\theta,i)i \tag{2.4}$$

şeklinde ifade edilebilir. Giriş gücü ise Eşitlik 2.5' de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$p_i = vi = R_s i^2 + i^2 \frac{dL(\theta,i)}{dt} + L(\theta,i)i\frac{di}{dt} \tag{2.5}$$

Burada,

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}L(\theta,i)i^2\right) = L(\theta,i)i\frac{di}{dt} + \frac{1}{2}i^2\frac{dL(\theta,i)}{dt} \tag{2.6}$$

eşitliği yazılabilir ve dolayısıyla da giriş gücü,

$$p_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}L(\theta,i)i^2\right) + \frac{1}{2}i^2\frac{dL(\theta,i)}{dt} \tag{2.7}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eşitlik 2.7' den de açıkça görüleceği üzere giriş gücü, $R_s i^2$ ifadesi ile verilen sargı kayıp gücü, $p[L(\theta,i)i^2/2]$ ifadesi ile verilen alan enerjisinin değişim oranı ve $[i^2 pL(\theta,i)]/2$ ifadesi ile verilen hava aralığı gücünün toplamından oluşmaktadır

Hava aralığı gücü için zaman ifadesinde rotor pozisyonu ve hız terimleri yerine konulacak olursa,

$$t = \frac{\theta}{w_m} \tag{2.8}$$

ve dolayısıyla da,

$$p_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$$
$$p_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} w_m \qquad (2.9)$$

ifadesi elde edilir.

Hava aralığı gücü elektromanyetik tork ve hıza bağlı olarak,

$$p_{ag} = T w_m \qquad (2.10)$$

olduğundan motora ait tork,

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \qquad (2.11)$$

şeklinde elde edilir [1]. Bir sonraki bölümde aynı ifade enerji dönüşümü ile de elde edilecektir.

2.3.4. Enerji Dönüşümü

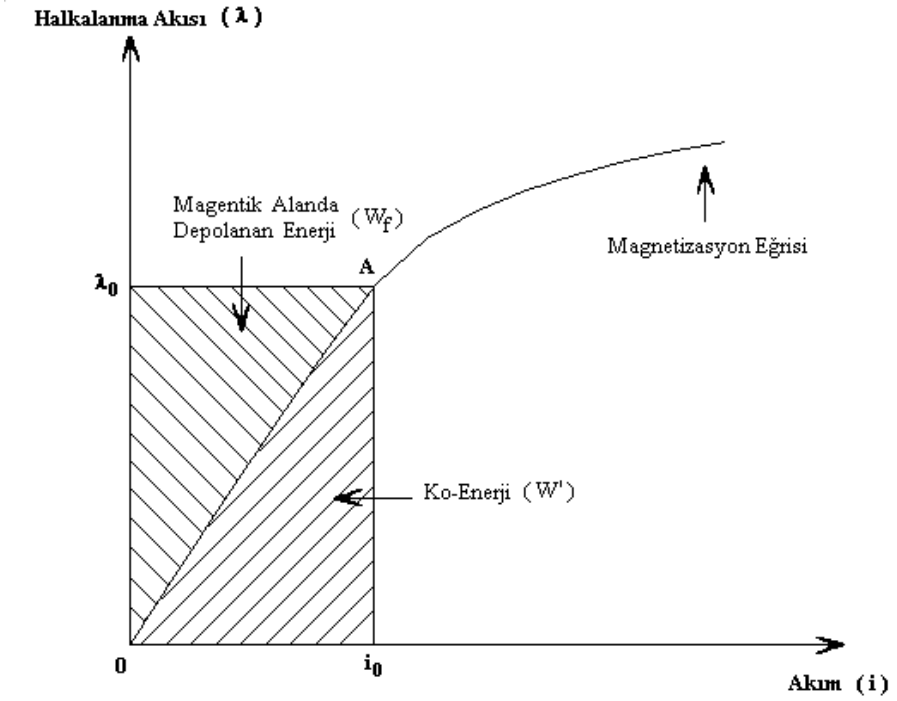
ARM'lerin normal çalışmaları esnasında relüktansın rotor konumu ve doyum sebebi ile değişiminden dolayı statora ait faz sargıları tarafından üretilen manyetik alanın basit bir matematiksel eşitliği yoktur. Dolayısı ile burada ARM'lere ait enerji dönüşümü, [9]'da sunulan genel enerji dönüşümü vasıtasıyla incelenecektir.

Şekil 2.7'de karşılıklı ve ortalanmış konum arasındaki herhangi bir rotor açısında kilitlenmiş olan ARM' ye ait magnetizasyon eğrisi gösterilmiştir. Şekil 2.7' den de açıkça görüleceği üzere manyetizasyon eğrisi üzerindeki herhangi bir A noktası için depolanan manyetik alan enerji ve ko-enerji ifadeleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$W_f = \int_0^{\lambda_0} i d\lambda(\theta,i) \qquad (2.12)$$

$$W' = \int_0^{i_0} \lambda(\theta, i)di \tag{2.13}$$

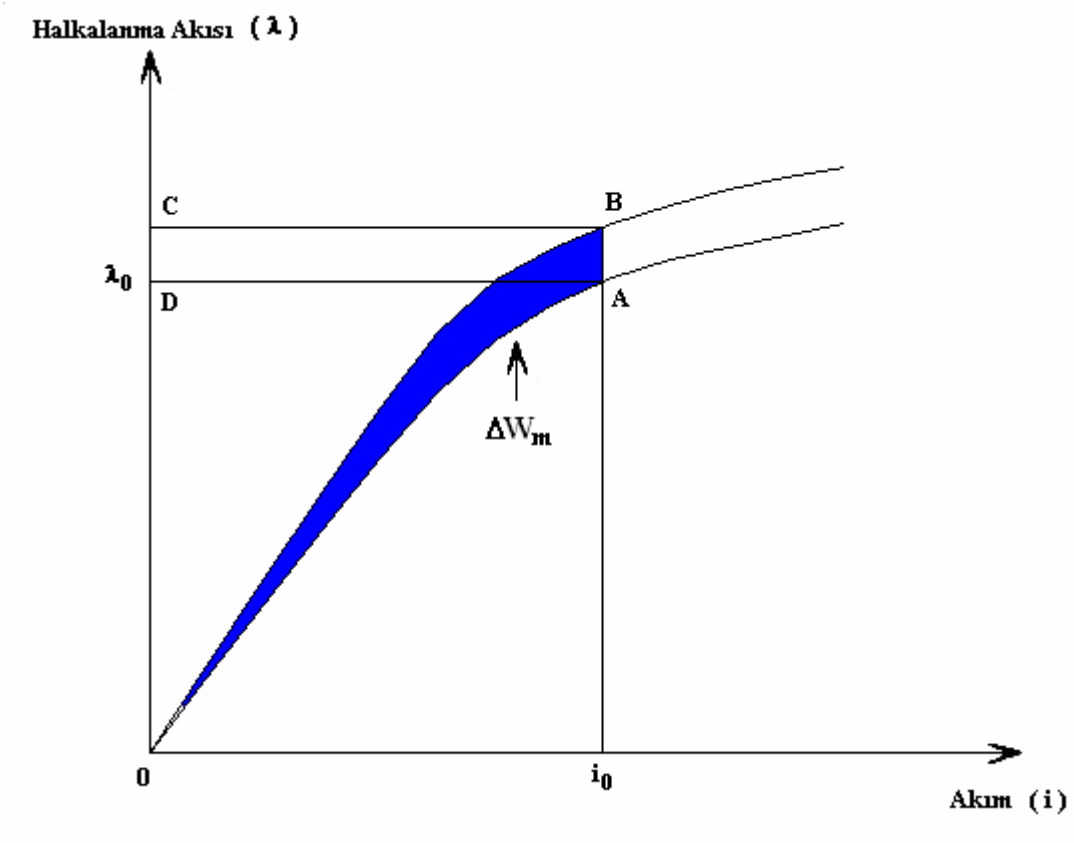
Burada halkalanma akısı, rotor pozisyonu ve akıma bağlı bir değişken olup alan enerjisi, hava aralığı ile stator ve rotor malzemesinde depolanan manyetik enerjiyi ifade etmektedir.



Şekil 2.7. Manyetizasyon Eğrisi ve Enerji İlişkisi.

Eğer rotor serbest bırakılırsa karşılıklı pozisyona doğru hareket etmeye başlayacaktır. $\Delta\theta$ kadarlık bir rotor pozisyonu değişiminde faz akımının sabit tutulduğu varsayılırsa akı yörüngesi Şekil 2.8' de de gösterildiği üzere A noktasından B noktasına kayacaktır.

Bakır ve çekirdek kayıpları ihmal edilecek olursa, enerjinin korunumu prensibi sebebiyle rotorun $\Delta\theta$ kadarlık konum değişimi esnasında alan enerjisinde meydana gelen değişim Şekil 2.8' den de görüleceği üzere ΔW_m mekanik işine eşit olacaktır.



Şekil 2.8. Alan Enerjisi, Ko-Enerji ve Mekanik İş.

Dolayısıyla;

$$\Delta W_m = \Delta W' = \int_0^{i_0} \lambda(\theta_B, i)di - \int_0^{i_0} \lambda(\theta_A, i)di \tag{2.14}$$

eşitliği elde edilmiş olur. Mekanik iş;

$$\Delta W_m = T\Delta\theta \tag{2.15}$$

eşitliği ile verilebileceğinden, Eşitlik 2.15' den ani tork ifadesi çekilecek olursa;

$$T = \frac{\Delta W_m}{\Delta\theta} = \frac{\int_0^{i_0} \lambda(\theta_B, i)di - \int_0^{i_0} \lambda(\theta_A, i)di}{\Delta\theta} \tag{2.16}$$

ifadesi elde edilir. Herhangi bir i akımı için $\Delta\theta \to 0$ ile limit alınacak olursa ARM' ye ait anlık tork;

$$T = \frac{\partial}{\partial\theta}\int_0^i \lambda(\theta, i')di' \tag{2.17}$$

ifadesi ile tanımlanabilir. Doğrusal akı modeli için $\lambda(\theta, i) = L(\theta)i$ yazılabileceğinden;

$$T = \int_0^i \frac{\partial\lambda(\theta, i')}{\partial\theta}di' = \int_0^i \frac{dL}{d\theta}i'di' = \frac{dL}{d\theta}\int_0^i i'di' = \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{d\theta} \tag{2.18}$$

eşitliği elde edilir ki bu ifade Eşitlik 2.11 ifadesine eşittir. Daha önce de sözü edildiği gibi Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.18, ARM' ye ait torkun faz akımının yönünden bağımsız ancak rotor konumuna göre motora ait indüktans ($\frac{dL}{d\theta}$) değişiminin yönüne bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır.

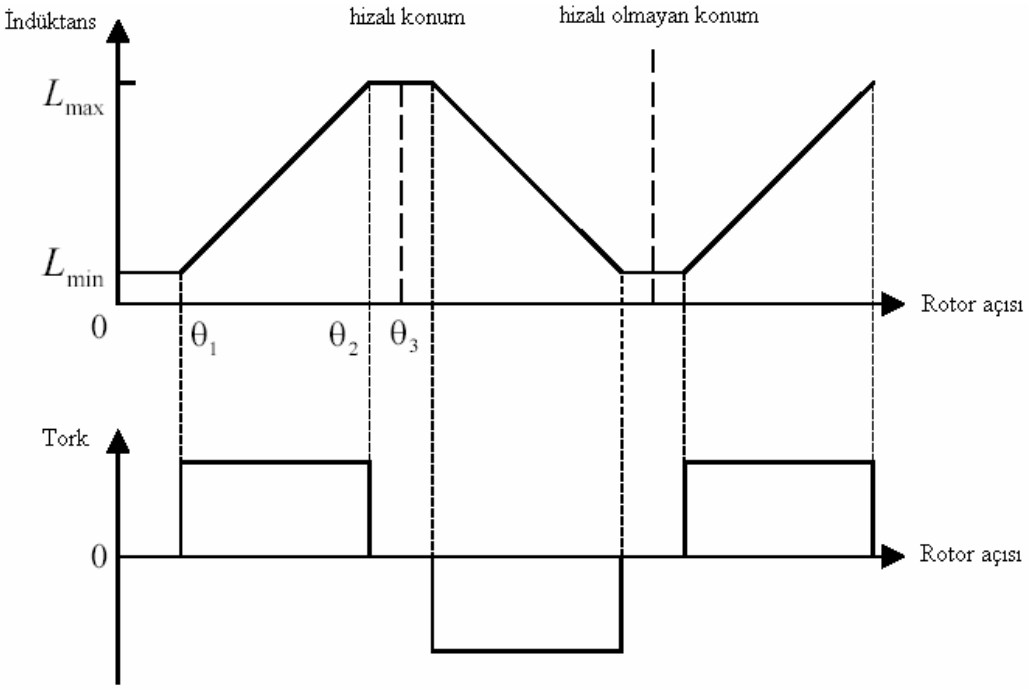
2.3.5. Tork

Anahtarlamalı relüktans motorda tork, üç değişkene bağlı olarak değişir. Bunlar indüktans, stator sargı akımı ve rotorun açısal konumudur.

Eğer verilen bir akım değeri için değişen rotor konumuyla birlikte indüktans lineer olarak değişiyorsa, hem ARM'nin bir fazına ait eş değer devresinden hem de enerji dönüşümü ilkesinden elde edilen tork ifadesi, Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.18 de belirtildiği gibi $T = \frac{1}{2}i^2\frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$ şeklindedir. Burada θ, rotor konumunu belirtmektedir.

Buradan torkun akımın karesi ile doğru orantılı olduğu ve üretiminin indüktans değişimine bağlı olduğu görülmektedir.

Şekil 2.9'da torkun stator sargı akımı sabit iken indüktans ve rotor konumu ile değişimi verilmektedir.



Şekil 2.9. Sabit stator sargı akımında torkun indüktans ile değişimi.

Şekil 2.9'da indüktans değişimi ideal olarak alınmıştır. Bu sebeple tork lineer indüktansla lineer olarak değişim göstermektedir. Ancak pratikte, ARM'lerin indüktans değişimi lineer değildir ve bunun sonucu olarak tork titreşimli olarak elde edilir.

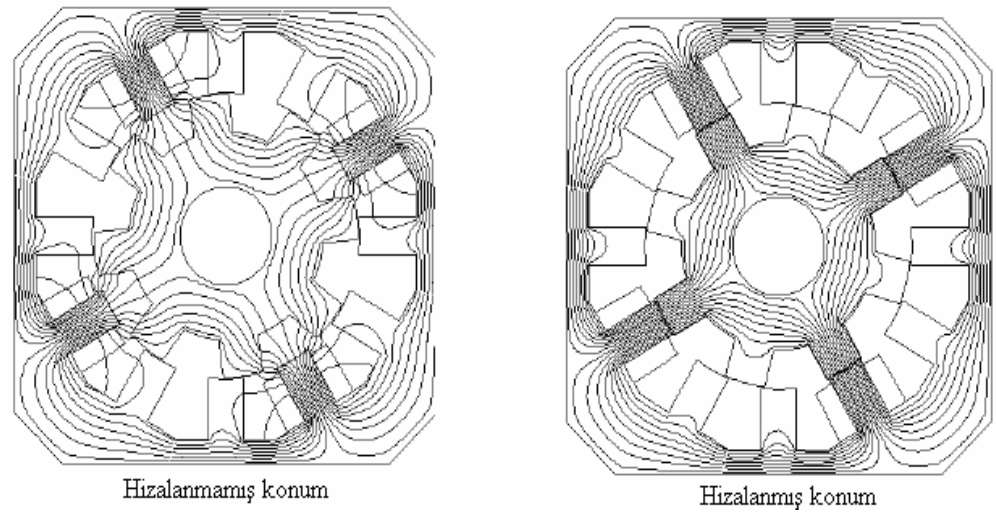
Tork titreşimini en aza indirmek için indüktansın rotor açısı ile olan değişiminin ($dL/d\theta$) olabildiğince düzgün olması istenir. Bu amaçla rotor dişlerinde değişiklikler yapılarak indüktans değişimi olabildiğince lineer hale getirilmeye çalışılmaktadır.

Tork değeri indüktansın değişimine bağlı olduğundan, eğer akım indüktansın artma yönünde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olurken, akımın indüktansı azaltma yönünde olması durumunda ise negatif olacaktır. Dolayısıyla akım darbelerinin, indüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağının tespit edilmesi ve dolayısıyla da bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle ilgili rotor pozisyonu bilgisinin elde edilebilmesi için optik yada alan etkili sensörlerin kullanımı gerekmektedir.

Anahtarlamalı relüktans motorda rotor yüksek relüktans noktasından düşük relüktans noktasına hareket etmektedir. Relüktansın en düşük olduğu bölge stator ve rotor

kutuplarının tam olarak karşı karşıya geldiği hizalanmış konumdur. Relüktansın bu en düşük olduğu durumda indüktans da, relüktans ile ters orantılı olarak en yüksek değerine olaşacaktır.

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi tam hizalı konumda elektromanyetik alan çizgileri tam olarak karşı karşıyadır ve dolayısıyla indüktans da bu hizalı konum boyunca maksimum değerinde sabit kalır. Şekil 2.9'daki tork grafiğinden de anlaşılacağı gibi indüktans da değişimin olmamasına bağlı olarak, hizalanmış konumda herhangi bir tork üretilmez.



Şekil 2.10. ARM'nin elektromanyetik alan dağılımı.

Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.18 'den şu sonuçlar çıkarılabilir:

1. Tork, akımın karesi ile orantılıdır, bundan dolayı doğrusal olmayan torku üretmek amacı ile akım da farklı şekillerde uygulanabilir. Bu durum AC makineler için çok ters bir durumdur. Faz sargısı içerisindeki akımın değişik şekiller alabilmesi, ARM kontrol devrelerinin çeşitliliğini arttırırken sürücü devrelerdeki güç anahtarlarının sayısını azaltabilir ve sürücüyü daha ekonomik hale getirir.

2. Tork sabiti, indüktansın rotor konumu ile değişimi karakteristiği eğrisinin eğimi ile verilir. Buradan stator sargısının indüktansının hem rotor konumunun hem de akımın fonksiyonu olduğu görülmektedir. İndüktansın değişimi motorun çıkıklı yapısından dolayı lineer değildir. Motorun lineer olmayan bu yapısından dolayı, bu motor için basit bir eşdeğer devre geliştirmek mümkün değildir.

3. Torkun akımın karesi ile doğru orantılı olmasından dolayı, motor DC motorlara benzer. Dolayısıyla, iyi bir başlangıç torkuna sahiptir.

4. İndüktans eğrisinin negatif kısmında akımın değişimi ile negatif tork üretimi mümkündür. (Şekil 2.9)

5. Dönme yönü basit bir işlemle stator tetikleme kısmı değiştirilerek ters çevrilebilir.

6. 1,4 ve 5 özelliklerinden dolayı bu makine sürücülerle birlikte dört bölge de çalışmak için uygundur.

7. Tork ve hız kontrolü sürücü kontrolü ile yapılabilmektedir.

8. Makine, çalışması için kontrol devrelerine ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla, sabit hızlı uygulamalarda motor sürücü indüksiyon ve senkron motorlara kıyasla pahalıdır.

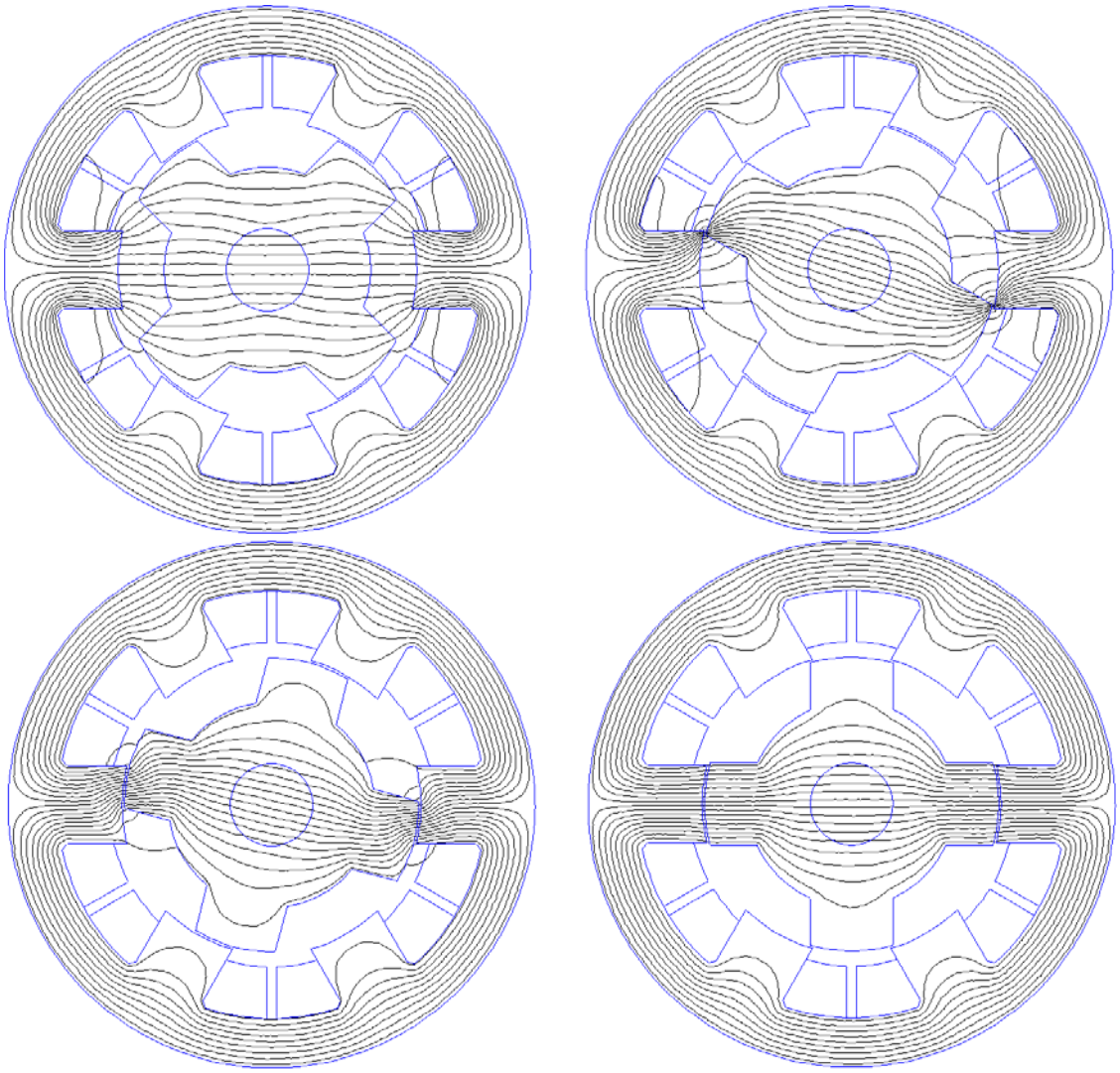
9. Çalışması için sürücü devreye bağımlı olmasından dolayı, motorun sürücüsü kendi yapısından gelen, değişken hızlı sürücü sistemine sahiptir.

10. ARM'de makine faz sarımları arasında çok küçük bir ortak indüktans vardır ve neredeyse tüm pratik uygulamalarda bu etki ihmal edilmektedir. Ortak kuplaj olmamasından dolayı, her bir faz diğer fazlardan elektriksel olarak bağımsızdır. Bu özellik sadece anahtarlamalı relüktans motorlara has bir özelliktir. Bu özellik sayesinde herhangi bir fazdaki kısa devre hatasından diğer fazlar etkilenmez.

Bir fazda oluşabilecek hatalardan diğer fazların etkilenmemesi özelliği özellikle havacılık uygulamaları, soğutucu pompaları, elektrik cihazlarında önemlidir.

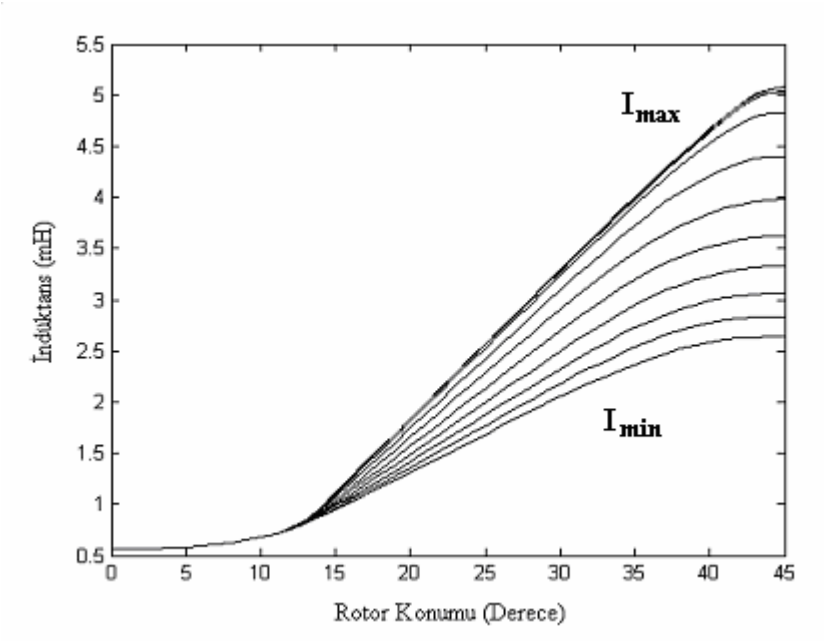
2.3.6. Çalışma Prensipleri

Daha öncede bahsedildiği üzere anahtarlamalı relüktans motorun çalışma prensibi relüktans kuvveti ile olmakta ve rotorun bulunduğu manyetik devre içerisinde akan akının, en kolay yol bulabileceği en küçük relüktans konumuna kadar çekilmesi suretiyle gerçekleşmektedir. Bu durum Şekil 2.11' de gösterilmiştir.

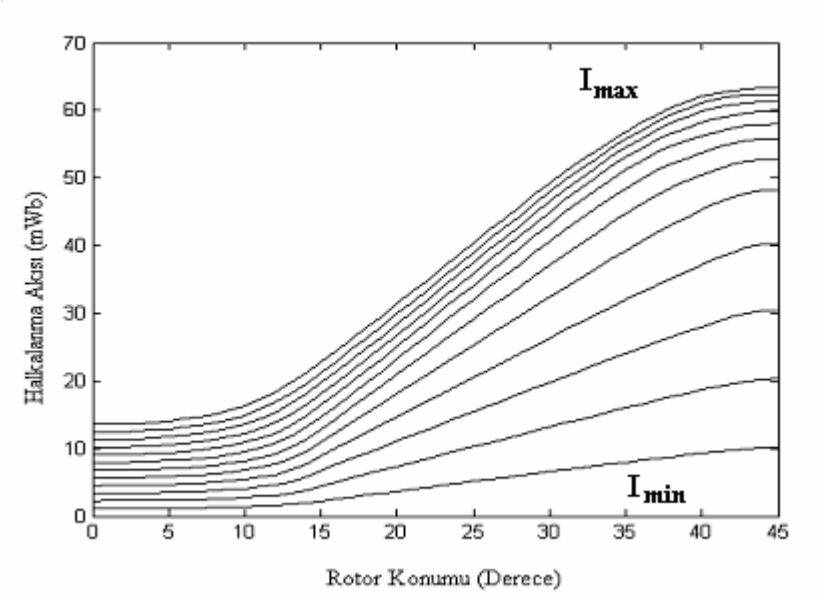


Şekil 2.11. Çeşitli Konumlar için Halkalanma Akılarının Durumları.

Şekil 2.11’ den de görüleceği üzere 15’ er derecelik aralıklarla verilmiş olan ve ortalanmış konumdan karşılıklı konuma kadar olan rotor konumu pozisyonlarında halkalanma akılarının bulabildikleri en kolay yol üzerinden dönüşlerini tamamlamak istemekte ve dolayısıyla da oluşan kuvvet ile rotoru da dönüş yönleri doğrultusunda döndürmektedirler. Dolayısıyla bu esnada relüktans değişimi maksimum değerden minimum değere doğru giderken indüktans değişimi bunun tersi olarak minimum değerden maksimuma doğru gerçekleşmektedir. Şekil 2.12 ve 2.13’ da çeşitli rotor konumlarında değişik akım değerlerinde elde edilen indüktans ve halkalanma akısı değerlerinin değişimi verilmiştir.

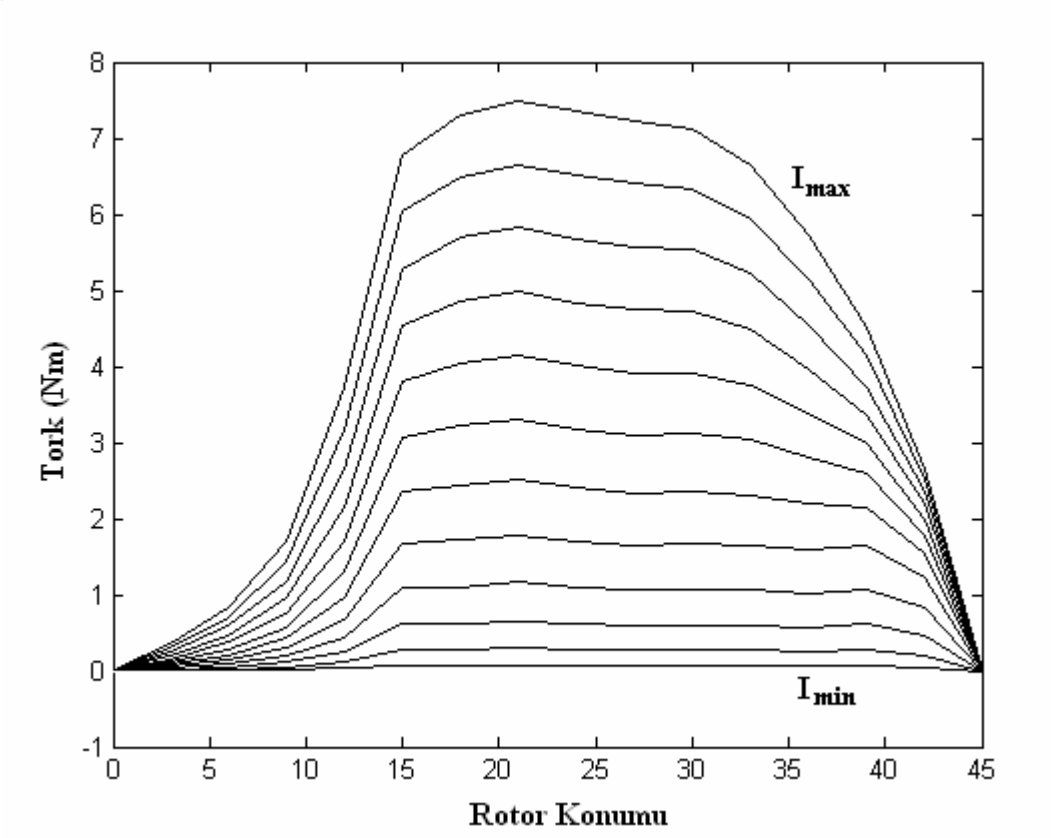


Şekil 2.12. Çeşitli Akım değerlerinde Rotor konumuna göre elde edilen İndüktans değişimi.



Şekil 2.13. Çeşitli Akım değerlerinde Rotor konumuna göre elde edilen Halka Akılarının değişimi.

Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.18' den de görüleceği üzere motor tarafından üretilen tork değeri o andaki akım değerine ve indüktans değişimine bağlı olduğundan tork değişimi de Şekil 2.14' da gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Çeşitli Akım değerlerinde Rotor konumuna göre elde edilen Tork değişimi.

2.3.7. Temel Parametreler

Anahtarlamalı relüktans motorlardan istenildiği gibi faydalanılabilmesi için birtakım önemli parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunlardan bazılarını açıklamak ileriki bölümler açısından fayda sağlayacaktır.

Anahtarlamalı relüktans motora ait faz sayısı, stator ve rotor kutup sayıları motora ait başlıca parametrelerin en önemlilerindendir. Stator ve rotor kutup sayıları arasındaki oran tasarımcıya çok geniş bir seçim yelpazesi sunmaktadır. ARM'lerin en çok kullanılanları 2, 3 ve 4 fazlı olup iki fazlı olanlarda kalkış problemi yaşanmaktadır. Dolayısıyla da bu tür ARM'lerde motorun herhangi bir konumdan kalkış yapmasını sağlayacak şekilde rotor kutup geometrisinin seçilmesi gerekmektedir. Faz sayılarının büyük değerlikli olduğu motorlarda tork dalgalılığı azalmakla birlikte bu motorların maliyeti artmaktadır [10].

ARM' de statora ait herhangi bir faz uyarıldığında rotor ekseninin stator üzerindeki belirli bir eksene göre hareket ettiği mesafeye rotor konum açısı denmektedir [10]. N_r, rotor kutup sayısını ve q faz sayısını belirtmek üzere rotor konum açısı Eşitlik 2.19 ile verilebilir:

$$\theta = \frac{360°}{qN_r} \tag{2.19}$$

Sırası ile rotor ve stator kutup konum açıları olan γ_r ve γ_s ise rotor ve statora ait çevre açılarının rotor ve statora ait olan kutup sayılarına bölümü ile elde edilebilir:

$$\lambda_r = \frac{360°}{N_r} \tag{2.20}$$

$$\lambda_s = \frac{360°}{N_s} \tag{2.21}$$

Rotor kutup uzunluğu l_r, d_i rotor iç yarıçapını göstermek üzere, rotor iç çevre uzunluğunun rotor kutup sayısına oranı ile elde edilebilir. Aynı durum stator için de geçerlidir:

$$l_r = \frac{d_i \pi}{N_r} \tag{2.22}$$

$$l_s = \frac{D_i \pi}{N_s} \tag{2.23}$$

Rotor iç yarıçapı ile dış yarıçapı arasındaki fark rotor kutbunun derinliğini verirken ilgili fark değerinin ikiye bölünmesi ile rotor derinliği y_r hesaplanabilir:

$$y_r = \frac{d_d - d_i}{2} \tag{2.24}$$

D_i, stator iç çapını ve $g_{\min}$ minimum hava aralığının göstermek üzere stator kutup derinliği ise Eşitlik 2.25' teki gibi verilebilir [10]:

$$y_s = \frac{D_i - d_d - 2g_{\min}}{2} \tag{2.25}$$

Rotor kutup açısı θ_r ile verilirse d_r rotor eni;

$$\sin(\frac{\theta_r}{2}) = \frac{\frac{d_r}{2}}{\frac{d_d}{2}} \tag{2.26}$$

olmak üzere,

$$d_r = d_d \sin(\frac{\theta_r}{2}) \tag{2.27}$$

ile verilebilir. Stator kutup eni ise;

$$\sin(\frac{\theta_s}{2}) = \frac{\frac{d_s}{2}}{g_{\min} + \frac{d_d}{2}} \tag{2.28}$$

olmak üzere,

$$d_s = (2g_{\min} + d_d)\sin(\frac{\theta_s}{2}) \tag{2.29}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Anahtarlamalı relüktans motorlar normalde yüksek hızlarda çalıştırılmasına karşın temel bir hız karakteristiğine sahiptir. Dolayısıyla temel hıza sahip bir motor oranlanmış bir moment ve çıkış gücü göstermektedir. k sabit bir değer olmak üzere l_b motor saç paketinin uzunluğu Eşitlik 2.30' da verilmiştir.

$$l_b = d_d k \tag{2.30}$$

Eşitlik 2.30'da yer alan k sabitinin değeri ilgili uygulama alanına göre değişiklik göstermesine karşılık, servo uygulamalar için 1 ile 3 arasında olurken servo olmayan uygulamalarda 0.25 ile 0.75 arasında olmaktadır [10].

3. BÖLÜM

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR ÇEVİRİCİ DEVRELERİ

3.1. Giriş

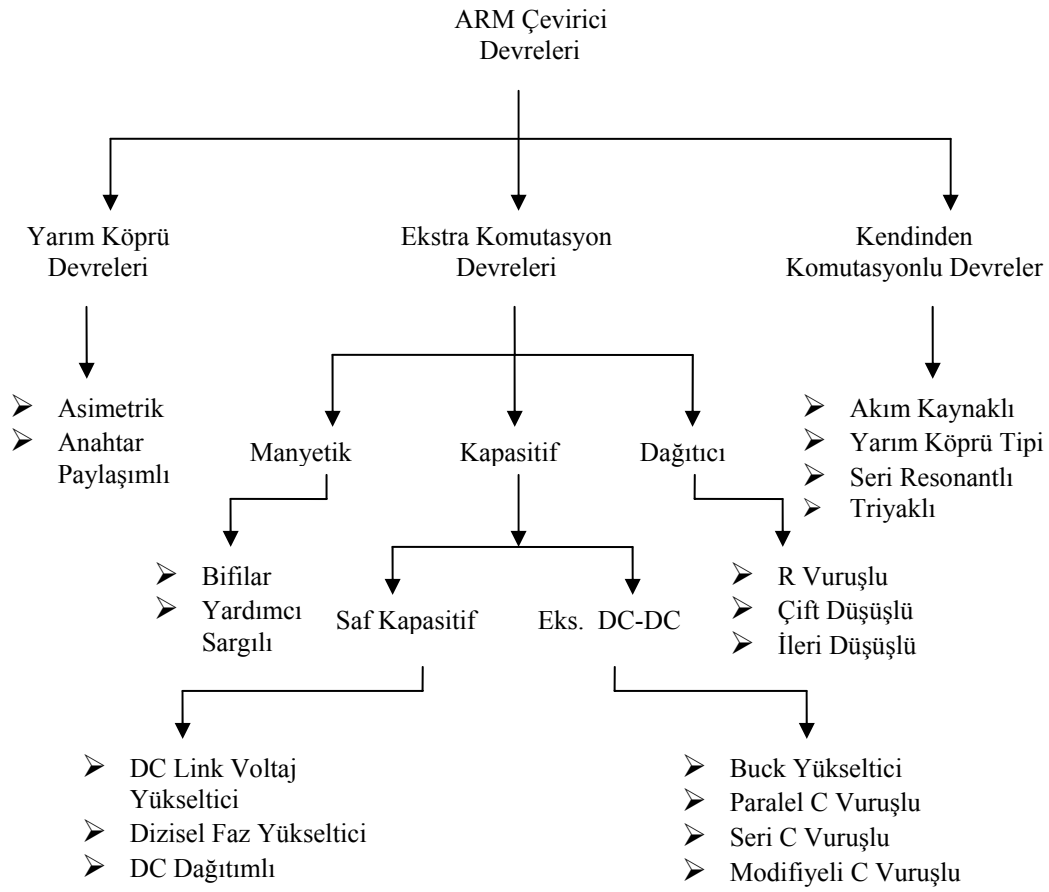
Bu bölümde Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM) sürücü devrelerinde kullanılan çevirici yapıları üzerinde durulacaktır. Her çevirici yapısının diğerlerine nazaran, maliyetine karşın sağladığı kontrol esnekliği bakımından farklılıkları vardır.

Temelde bütün ARM güç çeviricileri, akımın genliğini ve hatta dalga şeklini biçimlendirerek tork ve hız gereksinimlerini karşılamak için fazlara seri olarak bağlanmış yarı iletken anahtarlara ihtiyaç duyar. Aynı zamanda faz değişimleri esnasında, bir önceki faza ait sargılar üzerinde depolanan enerjinin motor üzerinde negatif tork oluşturmaması için, hızlı bir şekilde kaynağa döndürülebilmesi için hızlı geri dönüşüm diyotlarına sahip olmalıdır.

3.2. Çevirici Devreleri

ARM'lerin döndürme momenti akımın yönüne değil sadece genliğine bağlıdır. Dolayısıyla motorun sürücü devresinde kullanılacak yarı iletken sayısı diğer sürücülere nazaran daha azdır. Bunun yanında tork değeri indüktansın değişimine bağlı olduğundan, eğer akım indüktansın artma yönünde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olurken, akımın indüktansı azaltma yönünde olması durumunda ise negatif olacaktır. Dolayısıyla akım darbelerinin, indüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağının tespit edilmesi ve bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir.

ARM'ler için uygulama alanlarına ve yüke bağlı olarak çok sayıda güç elektroniği çevirici devreleri vardır. Bu devreler Şekil 3.1' deki gibi verilebilir [14].



Şekil 3.1. ARM Çevirici Sınıflandırması.

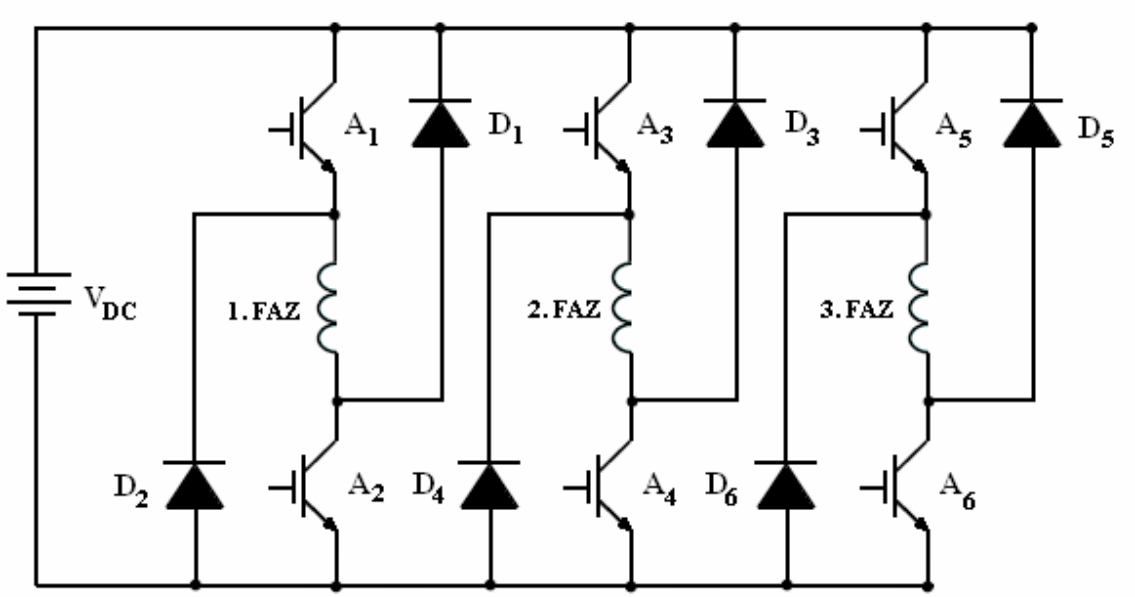
ARM'lerde üretilen tork, akımın yönünden bağımsız olduğundan ARM çeviriciler diğer motorlar için kullanılan çeviricilere göre birtakım avantajlara sahiptir. Bunlardan birkaçı şu şekilde sıralanabilir [11]:

- Her bir faz için sadece tekbir anahtar elemanını kullanılmasının yeterli olması,
- Motorda yer alan fazlar birbirlerinden bağımsız olduklarından herhangi bir fazın devre dışı kalması durumunda bile diğer fazların bu durumdan bağımsız olarak çalışmalarına devam edebilmesi,
- ARM'nin sıfır kısa devre akımı ve sıfır açık devre voltajına sahip olması sebebiyle herhangi bir hata karşısında minimum aşırı voltaj ve ısınma problemlerine sahip olunmaması.

ARM'ler için kullanılan çevirici devreler, genelde ARM'nin sahip olduğu faz sayısına karşılık içerdikleri anahtarlama elemanları ve serbest diyot elemanlarının sayılarına göre

çeşitli yapı topolojilerine ayrılmaktadır. İleriki kısımlarda bu amaçla sıkça kullanılmakta olan devre yapıları verilecektir.

ARM'nin sahip olduğu faz sayısının iki katı kadar anahtar elemanı içeren (2n tipi) klasik köprü tipi çevirici devrelerinde fazlar birbirlerinden bağımsız olduğundan her fazın ayrı ayrı kontrol edilebilmesi mümkün olmakta ve kullanılan anahtarlar düşük gerilime maruz kalmaktadır [12]. Bu özelliklerinin yanında bu çevirici topolojisi, minimum pasif eleman kullanarak maksimum kontrol esnekliği ve verim sağlamaktadır [9]. Şekil 3.2' de üç fazlı bir ARM için 2n tipi köprü çevirici devresi gösterilmiştir.

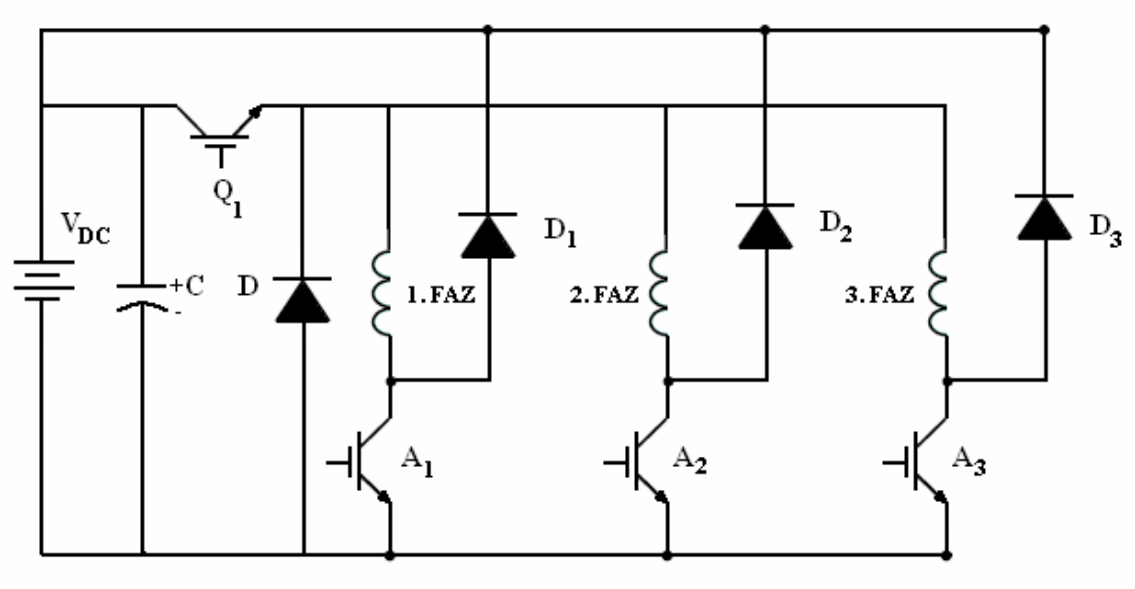


Şekil 3.2. Üç Fazlı Bir ARM için 2n Tipi Klasik Köprü Çevirici Devresi.

AC sürücülerde faz sargıları evirici ayaklarının ortasından beslendiği için sargıların alt ve üst uçlarındaki anahtarların aynı anda açılmasından sakınılmalıdır. Aksi takdirde DC kaynak kısa devre olmaktadır. Bu durumu önlemek için ek kontrol devrelerinin kullanılmasına ihtiyaç duyulabilmektedir. ARM sürücülerinde ise sargılar güç anahtarları ile seri bağlı olduğundan kısa devre ihtimali ortadan kalkmaktadır. Sargıların alt ve üst kısımlarındaki güç anahtarları her iletim periyodu yada tork vuruşu başlangıcında birlikte çalışmakta ve komütasyon noktasında birlikte kesime gitmektedir. Mantıksal olarak tasarımda, bir anahtarı komütasyon diğerini ise regülasyon için kullanmak uygun olmaktadır. İletim periyodu sonunda her iki anahtar da birden kesime

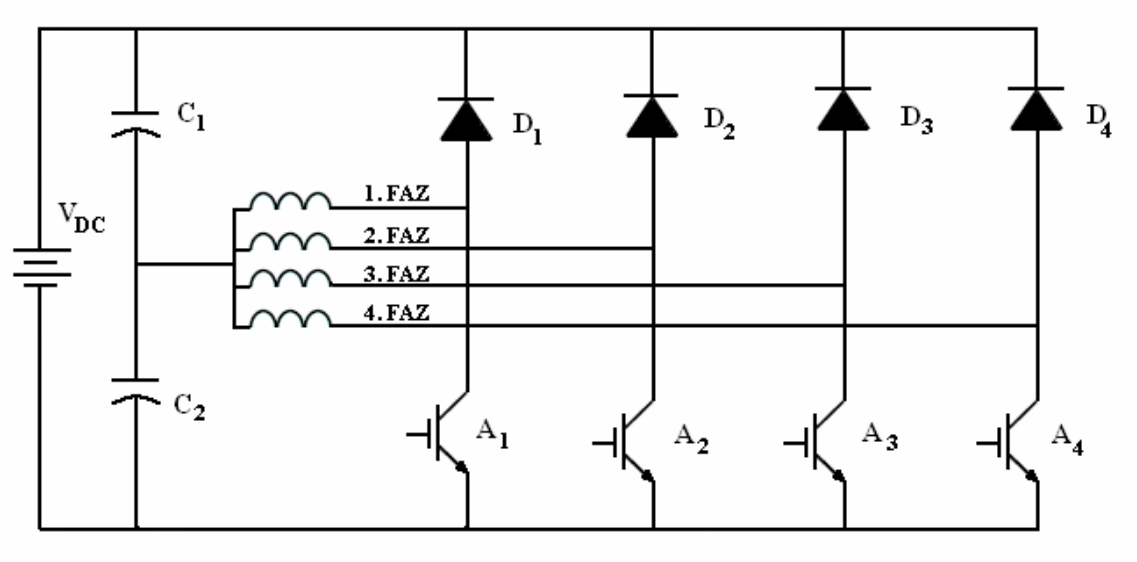
getirildiğinde, mekanik enerjiye dönüştürülmemiş olan ve sargıda depo edilen manyetik enerji hızlı diyotlar üzerinden kaynağa döndürülmektedir.

Düşük hızlı sürücülerde bütün hız aralığı boyunca darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation : PWM) kontrolü kullanılmaktadır. Bu durumda ARM çevirici devresindeki anahtar elemanlarının sayısının azaltılabilmesi mümkün olmaktadır. Böylece bütün fazlar için kıyıcı olarak ortak tek güç anahtarı kullanılabilmektedir. N fazlı bir sistem için faz sayısının bir fazlası kadar anahtar ve diyot elemanı gerektiren n+1 topolojisindeki çevirici devresi Şekil 3.3' de gösterilmiştir.



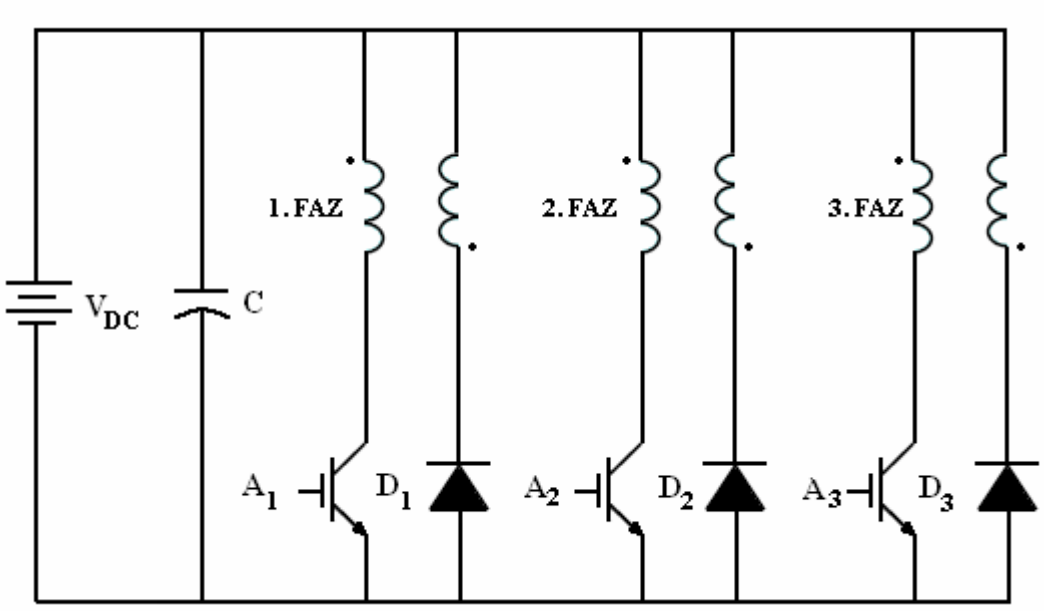
Şekil 3.3. n+1 Topolojisindeki ARM Çevirici Devresi.

Tek kutuplu sürme devresi kullanmanın bütün avantajlarından faydalanmak için anahtar sayısını faz sayısına indirmeye yönelik başka devreler de geliştirilmiştir. Ancak eleman sayısı faz başına indirildiğinde fazladan pasif elemanlar gerekmekte yada kontrol sınırlamalarından dolayı bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.4' de Tasc Drives Ltd. tarafından GTO (Gate Turn-Off) Thyristor elemanları kullanılarak gerçekleştirilen split-link devresi gösterilmiştir [12].



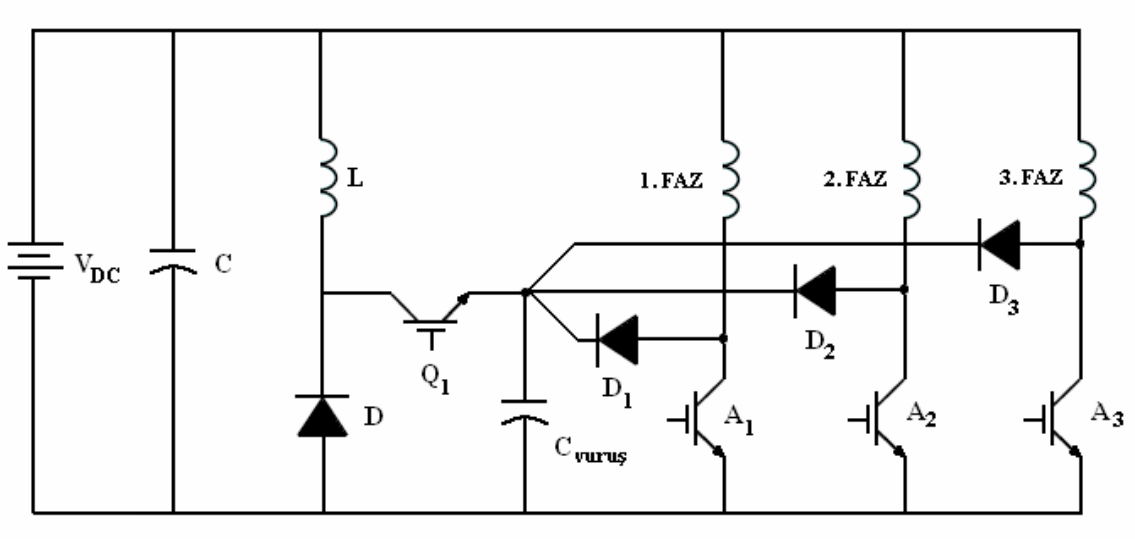
Şekil 3.4. Split DC Çevirici Devresi.

Bunun yanında yine faz başına tek bir anahtarlama elemanının yeterli olduğu bifilar (çift tel) sargılı çevirici devrelerinde, bifilar sargı bağlantı sayısını ikiye katlamakta ve bakırın verimsiz biçimde kullanılmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sargılar arasında eşit olmayan etkileşimden doğan gerilim sıçramaları sebebiyle problemler ortaya çıkabilmektedir. Şekil 3.5' de sözü edilen bifilar sargılı çevirici devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Üç Faz ARM için Bifilar Sargılı Çevirici Devresi.

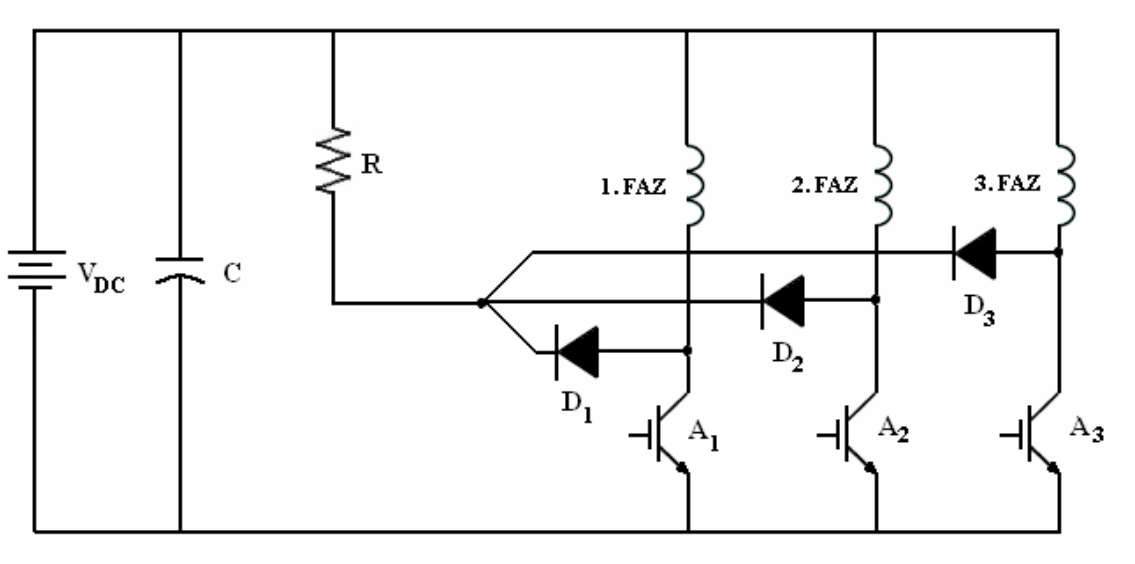
Şekil 3.6’ da gösterilen C-Vuruşlu çevirici devresinde, depolanmış enerjiyi boşaltma kapasitörü C’ den kaynağa step-down (azaltıcı) kıyıcı devresi ile iletecek eleman dahil eleman sayısı n+1 olmaktadır. Ortalama kapasitör gerilimi, komutasyondan sonra hızlı boşalmaya izin vermek için kaynak geriliminden yüksek tutulmaktadır. Bu devrenin verimi yüksek olmasına karşın, kontrolü karmaşıktır ve ilave elemanlar gerektirir. Enerji deşarj devresindeki bir kontrol hatası boşalma kapasitöründe hızlı bir şarj oluşumuna yol açmakta ve eğer koruyucu tedbirler alınmaz ise bütün çevirici devre elemanları yüksek gerilime maruz kalıp zarar görebilmektedir.



Şekil 3.6. Üç Faz ARM için C-Vuruş Tipi Çevirici Devresi.

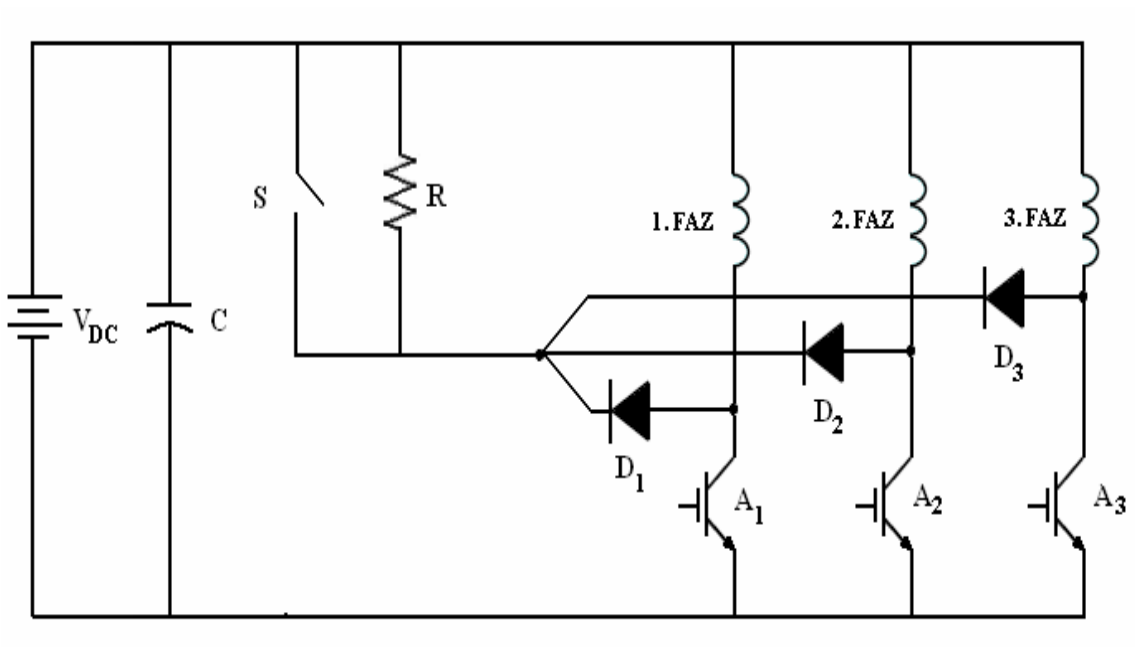
Çevirici düzenekleri içerisinde en ekonomik olan devre söndürme dirençli çevirici devresidir. Bu devre düşük performans ve maliyet istenilen uygulamalar için iyi bir seçenek olup kontrol edilmesi de oldukça basittir [12]. Bu çeviricide her bir faz için bir diyot ve bir anahtar yeterlidir. Depolanan enerji serbest dönüşüm esnasında R direnci üzerinde harcanmaktadır.

Şekil 3.7’ de üç fazlı bir sistem için söndürme dirençli çevirici devresi gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen söndürme dirençli çevirici devresinde R direncinin değeri büyük önem arz etmektedir. Direncin küçük değerde olması durumunda, hız yüksek iken bozucu tork üretimine sebep olur ve dolayısıyla da verim düşer. Direncin büyük değerlikli olması durumunda ise komütasyondaki faza bağlı anahtarda yarı iletken elemanlar için tehlikeli olan büyük değerlikli gerilim sıçramaları oluşur.



Şekil 3.7. Üç Fazlı ARM için Söndürme Dirençli Çevirici Devresi.

Söndürme dirençli çevirici devresinin bu dezavantajlarından dolayı Şekil 3.8' de gösterilen çift eğimli çevirici devresi tasarlanmıştır [12].



Şekil 3.8. Üç Faz ARM için Çift Eğimli Çevirici Devresi.

Söndürme dirençli çevirici devresine paralel bir anahtar eklenerek elde edilen bu devre, düşük gerilimli uygulamalar için çok elverişlidir. Sürücü boyutlarının küçük ve faz başına eleman sayısının az olması bu çeviricinin avantajları arasındadır. Düşük hızlı

çalışmalarda istenilen torku elde edebilmek için faz akımı sabit tutulmaktadır. Serbest dönüşüm anahtarı, kıyıcı işlem aralığında enerjiyi sönüm direncinde tutmak yerine sargıda tutar. Serbest dönüşüm anahtarının uygun kontrol edilmesi vasıtasıyla faz komütasyonundan sonra enerji depolamak mümkün olmaktadır [12, 13].

3.3. Çevirici Devrelerin Avantaj ve Dezavantajları

Anahtarlamalı relüktans motorlar yapıları sebebiyle diğer makineler ile karşılaştırıldığında kendilerine ait çevirici devrelerine de birtakım avantajlar kazandırmaktadır. Bu avantajlardan bir kısmını şöyle sıralamak mümkündür:

- Dört bölgeli çalışma için ARM'lerde akımın çift yönlü olmasına gerek olmadığından çoğu çevirici topolojisinde ARM'nin uygun olarak çalıştırılabilmesinde her bir faz için ikiden daha az anahtara gereksinim vardır.
- Güç anahtarları faz sargılarına seri bağlı olduklarından ve her biri DC kaynağa paralel olduğundan shoot-through hatası oluşmaz.
- Herhangi bir anahtarın gerektiği gibi çalışmaması durumunda ARM'nin çalışması aksamaz.
- Güç anahtarlarının sayılarının azaltılabilmesi vasıtasıyla ihtiyaç duyulan lojik devre ve bunlara ait güç kaynakları ile kapı sürücülerinin de sayısı azalacak ve dolayısıyla da çevirici hacmi ve maliyeti azalacaktır.

Sayılan bu avantajları yanında, ARM çeviricilerinin sahip olduğu dezavantajların başında her bir anahtar elemanı için ayrı bir serbest geri dönüşüm diyotuna gereksinim duyulması yer almaktadır. Bu durum tüm çevirici topolojileri için geçerlidir ve dolayısıyla da bu durum çeviricilere ait maliyeti artırmaktadır [1].

3.4. Uygulamalar

Döner motorlar için uygulamaların büyük bir çoğunluğunu düşük güç, orta güç, yüksek güç ve yüksek hızlı uygulamalar olarak sınıflandırmak mümkündür.

Düşük güç uygulamaları 3 hp' den daha düşük sürücüleri içermektedir. ARM'lerin bu alanda kullanıldıkları birçok uygulama yer almaktadır. Bunlardan bir kısmı şu şekilde sıralanabilir:

- Çizici Sürücüleri: Hewlett-Packart firması maksimum güç tüketimi 53 W olan ve 4000 dev/dak hızda 0.1275 Nm tork üretebilen bir ARM geliştirmiş ve bunu çizici cihazlarında kullanmıştır. Geliştirilen ARM üç fazlı olup altı adet stator ve dört adet rotor kutbuna sahiptir.
- İklimlendirme Sistemleri: A.O. Smith firması marketler için bu amaçla 0.5 hp gücünde bir motor geliştirmiştir.
- Paletli Araç Sürücüleri: Bir Fransız firması olan Radio Energie, bu amaçla 1.8 kW' lık bir sürücü geliştirmiş ve bu sürücünün verimi 3200 dev/dak değerinde % 82 olarak ölçülmüştür.
- Otomatik Kapı Sistemleri: Besam firması 300 dev/dak' da 5 Nm tork sağlayan 12 adet stator ve 8 adet rotor kutbuna sahip üç fazlı motor üretmektedir.

Orta güç uygulamaları genelde 300 kW değerinden daha düşük güçlere sahip olan sürücüleri içermektedir. ARM'lerin bu alanda endüstride çeşitli nedenlerden dolayı genel amaçlı sürücülerden ziyade özel uygulamalar için kullanılmakta olduğunu görmekteyiz. Düşük güç alanında ARM'lerin kullanıldığı uygulamalardan bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Endüstride Genel Amaçlı Sürücüler: Çok sayıda üretici firma 100 kW güçlerine ulaşan genel amaçlı sürücüler üretmektedir.
- Tren İklimlendirme Sistemleri: Normal Air Garrett firması trenlerdeki iklimlendirme sistemlerinde kullanılmak üzere 30000 dev/dak' da 40 kW güç değerine sahip üç fazlı altı adet stator ve dört adet rotor kutup sayısına sahip bir sürücü sunmaktadır.
- Madencilik Sistemleri: British Jeffrey Diamond firması 150 ve 300 kW güçlerine sahip sürücüler sunmaktadır. Her iki sürücü de on iki adet stator ve sekiz adet rotor kutup sayısına sahiptir.

Günümüzde yüksek güç uygulamaları için yeni yeni geliştirilen ve 750 kW değerlerine ulaşan ARM'ler mevcuttur. Ancak henüz yeterince kullanım alanı bulamamıştır. Fakat yüksek güçlerde özellikle çeviriciler için maliyet bir hayli arttığından dolayı ARM'lerin ucuz üretim maliyetlerinin, kendilerine uygulamalar için avantaj sağlayacağını söyleyebiliriz.

ARM'lerin yapısı gereği dayanıklılıklarının yüksek olması sebebiyle yüksek hızlı sistemler için çok uygun bir seçim olacağı ortada olan bir gerçektir. Kalıcı mıknatıslı motor sürücülerinin yapıları gereğince artan hız ile, eddy akımı kayıpları artmakta ve mıknatıslar ısınma eğiliminde olmaktadır. Bunun sonucu olarak işletim esnasında akı yoğunluğu ve dolayısıyla da çıkış gücü ile tork bundan etkilenmektedir. İndüksiyon makinelerinde de rotorun yapısı yüksek hızlarda sorun olmakta ve bu da uygulamalar için çok olumsuz bir durum oluşturmaktadır. Dolayısıyla ARM, hem kalıcı mıknatıslı hem de indüksiyon makineleri ile karşılaştırıldığında hassasiyete neden olan mıknatıs ve rotor sargısı bulundurmadığından yüksek sıcaklığa karşı hassasiyeti minimumdur. ARM' nin kullanıldığı bazı yüksek hız uygulamaları şu şekilde verilebilir:

- Tıbbi Uygulamalarda Santrifüj: Beckman Instruments şirketi 30000 dev/dak hıza ulaşabilen, 2.5kW' lık altı adet stator ve dört adet rotor kutbuna sahip bir santrifüj sürücü sistemi satışa sunmuştur.
- Uzay Uygulamaları: ARM'ler hava cihazları için oldukça uygundurlar. Motor haricinde bu alanda jeneratör olarak da kullanılabilirler. Örneğin ARM'ler jet motorları çalıştırıldıktan sonra jeneratör olarak devreye alındıklarında hava cihazına elektriksel bir geri dönüşüm sağlarlar ve 27000 ile 50000 devir arasında işletilebilirler. Bunun yanında yine uzay çalışmalarında gaz tribünü motoru olarak da kullanılabilmektedirler [1].

Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere sahip oldukları avantajlardan dolayı anahtarlamalı relüktans motorların kullanım alanları oldukça geniştir. Henüz endüstride her alanda uygulama alanı bulamamış olsalar da birtakım problemler ortadan kaldırıldıktan sonra gelecekte birçok alanda karşımıza çıkacakları kesin olan bir gerçektir.

4. BÖLÜM

SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI

4.1. Giriş

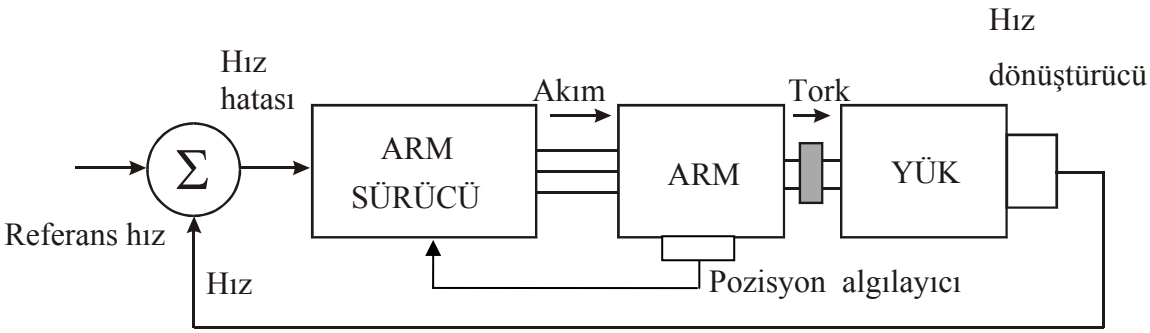
Bu bölümde Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) için gerçekleştirilen sürücü devreden bahsedilecektir. Bir elektrik motoru girişine uygulana elektrik enerjisini çıkışında mekanik enerjiye dönüştüren bir elektrik makinesi olarak tanımlanabilir. Bu tanım üç fazlı şebeke gerilimi ile doğrudan çalışabilen üç fazlı bir asenkron motor için yüzde yüz doğrudur. Adım motorları veya ARM'ler gibi özel motorlar doğrudan şebeke gerilimi yada DC bir kaynakla çalışamazlar. Bu veya benzeri özel motorların çalışabilmesi için motor sürücü devrelerine ihtiyaç vardır. Motor sürücü devreleri, girişine uygulanan kaynak enerjisini, çıkışana bağlanan motora aktaran devrelerdir. Bu bölümde 6/4'lük üç fazlı bir Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM) için tasarlanan sürücü devreden bahsedilecektir.

4.2. Donanım Tasarımı

Son yıllardaki yarı iletken teknolojisinde meydana gelen hızlı gelişmelerden hem güç elektroniği elemanları, hem de mikrodenetleyiciler olumlu yönde etkilenmişlerdir. Şöyle ki, tek bir yarı iletken anahtar, kontakları arasına uygulanan bin voltun üzerindeki potansiyel farkı nano saniyeler mertebesinde açıp kapatabilmekte ve bu süre zarfında akıttığı akım değerleri yüzlerce amperle ifade edilmektedir. Aynı zamanda mikrodenetleyicilerin performansları ile birlikte kapasiteleri de artmış ve motor kontrol devrelerinin vazgeçilemez özeliği olan PWM gibi birçok fonksiyonu donanımsal olarak desteklemekte ve programsal olarak da kullanıcıya birçok kolaylıklar sağlamaktadırlar.

ARM sürücünün yapısı AC ve DC sürücü yapılarına benzemektedir. Şekil 4.1'de kapalı döngü kontrol sistemi ile yüke bağlanmış anahtarlamalı relüktans motorunun blok

diyagramı görülmektedir. ARM girişi akım, çıkışı tork ve pozisyon bilgisi olan bir kutu olarak düşünülebilir. Akım bütün faz akımlarını içermekte ve dalga biçimi saf DC veya AC olmadığından ve hem hız ve hem de yükle değiştiğinden dalga biçiminin de kontrolünün yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. ARM Sürücüsünün hangi faz veya fazları tetiklemesi gerektiği, motor miline akuple edilmiş olan pozisyon sensörleri ile algılanır. Bu işlem faz akımlarının ölçülmesi ile sensörsüz olarak da yapılabilir. Fakat bu tasarımda kontrolünün basit ve maliyetinin düşük olmasında dolayı pozisyon sensörleri kullanılmıştır.



Şekil 4.1. ARM kontrol sisteminin yapısı

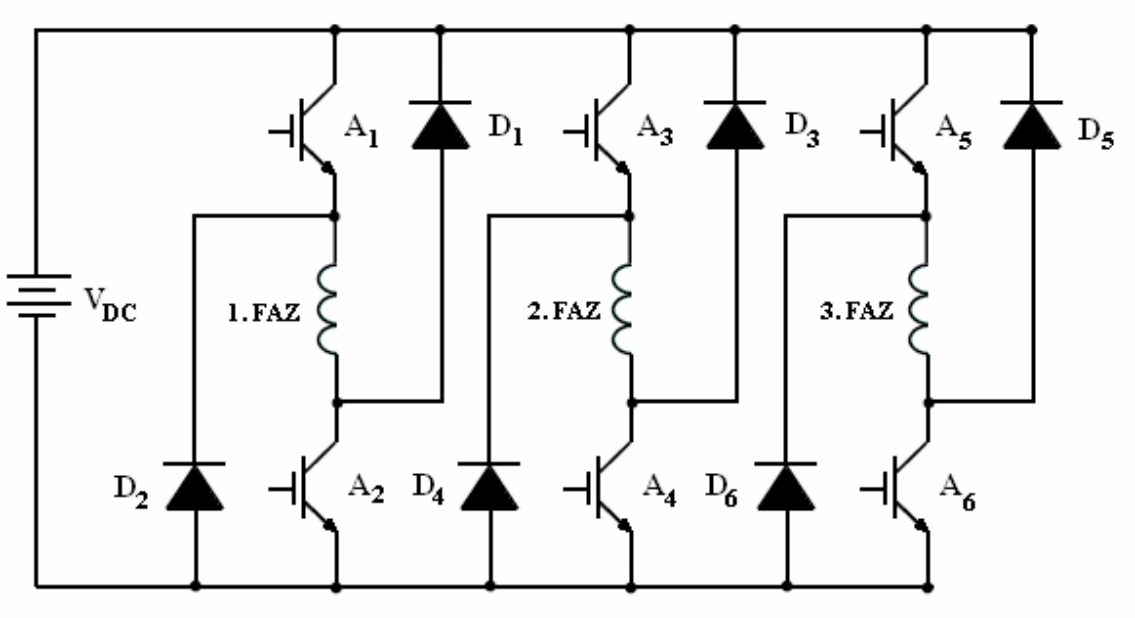
ARM sürücü girişi hız hatası ve pozisyon bilgisi, çıkışı motor akımı olan bir kutu olarak görülebilir. Hız hatası istenilen (referans) hız ile gerçek hız arasındaki farktır; gerçek hız yüke veya motora akuple edilmiş bir hız dönüştürücüsünden çıkartılabilineceği gibi, mikrodenetleyici tarafından, pozisyon bilgisinin bir fonksiyonu olarak da hesaplanabilir.

Hız dönüştürücüsü ve pozisyon algılayıcı olarak optik, Hall etkili veya diğer algılayıcı tipleri kullanılır. Bu tasarımda maliyetin düşük olması ve tasarım kolaylığı bakımından ayrıca bir hız dönüştürücü kullanılmamış bunun yerine hız, pozisyon algılayıcı olarak kullanılan optik pozisyon bilgisinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır.

Sürücü devresi kontrol devresi ve çevirici devresi olmak üzere temelde iki kısımdan oluşmaktadır. Çevirici devresi, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ve FWD (Free Welling Diode) gibi güç elektroniği elemanlarından oluşurken, kontrol devresi kısmı mikrodenetleyici, IGBT sürücü entegreleri ve özel lojik yapılar ihtiva etmektedir.

4.2.1. Çevirici Devresi

En yüksek verim, güvenilirlik ve kontrol esnekliği Şekil 4.2'deki gibi her faz için bağımsız yarım köprüye sahip bir devre ile elde edilmektedir. Şekildeki devre üç fazlı olmasına rağmen istenilen faz sayısı kullanılabilir. Bu devre en az pasif bileşenler ile maksimum kontrol esnekliği ve verim sağlamaktadır. Bu nedenle bu tasarımda bu yapı kullanılmıştır. En uygun güç kaynağı bir batarya veya doğrultulmuş güç kaynağıdır. Harmonikler hızla ve yükle geniş oranda değiştiğinden dolayı kaynak terminallerinde yeterli filtre kapasitörlerinin kullanılması gerekmektedir.



Şekil 4.2. Üç Fazlı Bir ARM için 2n Tipi Klasik Köprü Çevirici Devresi.

Son yıllarda geliştirilen anahtarlama kayıpları düşük ve hızları yüksek olan Metal Oksit Silikon Alan Etkili Transistor (Güç MOSFET'leri), İzole Kapılı Bipolar Transistor (IGBT) ve MOS Kontrollü Tristör (MCT) gibi yarı iletken güç elemanları sayesinde, çeviricilerde ortaya çıkan anahtarlama problemleri büyük ölçüde giderilmiştir.

Özellikle Bipolar Jonksiyonlu Transistörün (BJT'nin) yüksek akım ve gerilim anahtarlama kapasitesi, küçük gerilim düşümü ile güç MOSFET'lerin yüksek anahtarlama hızı ve ideal kontrol özelliğine sahip olan IGBT, PWM kontrollü dönüştürücü uygulamalarında en çok tercih edilen anahtarlama elemanları haline

gelmişlerdir. Bu nedenle bu sürücü devre tasarımının çevirici devresinde yarı iletken güç anahtarı olarak IGBT'ler kullanılmıştır.

IGBT'ler sürme açısından MOSFET'ler gibi davranırken güç iletimi açısından bipolar transistör gibi davranmaktadır. Bu elemanlar uygun pozisyonlarda doğru bir şekilde sürüldükleri takdirde hem kontrolü kolay hem de verimi yüksektir.

Kontrol devresi tarafından üretilen bu PWM sinyalleri, sürücü entegrelerden geçirilerek IGBT'lere uygulanmıştır. Çeviricinin bir koluna ait alt ve üst elemanların aynı anda iletime geçmesi AC motor sürücülerinde kaynağı doğrudan kısa devre edeceği için hiç istenmeyen bir durumdur. Tam aksine ARM sürücülerin çalışabilmesi için gerekli olan temel şartlardan birisidir.

4.2.1.1. Çevirici Devresinin çalışma prensibi

Daha öncede belirtildiği gibi çevirici devresinin görevi kaynaktan gelen enerjiyi kontrol devresinden gelen sinyaller eşliğinde fazlara dağıtmaktır. Şekil 4.2'den de görüleceği gibi her faz için iki adet yarı iletken anahtar (IGBT) ve iki adet diyot kullanılmıştır.

Bu çerici devresinde enerji verilecek olan fazın alt koldaki IGBT sürekli iletimde tutulurken üst koldaki IGBT'ye PWM sinyali uygulanır. Böylece gerekli voltaj regülasyonu yapılarak o faz enerjilendirilmiş olur.

Üst koldaki IGBT iletimde iken (PWM sinyalinin 1 olduğu anda) akım her iki IGBT üzerinden de geçerek devreyi tamamlar. Birinci fazı ele alacak olursak A1 ve A2 IGBT'leri iletimdedir ve bu anda diyotlar üzerinden herhangi bir akım akmayacaktır.

Üst koldaki IGBT kesimde iken ise (PWM sinyalinin 0 olduğu anda) o anda birinci faz üzeride depolanan akım sadece alt koldaki IGBT üzerinden de geçerek devreyi diyot üzerinden tamamlayacaktır. Yani D1 diyotu ve A2 IGBT'si iletimdedir ve bu anda D2 diyotu üzerinden herhangi bir akım akmayacaktır.

İlgili fazın enerjisi kesilmek istendiğinde ise her iki IGBT'nin aynı anda kesime gitmesi sağlanır. Bu durumda ise faz üzeride depolanan akım D1 ve D2 diyotları üzerinden

devreyi tamamlayarak kaynağa geri dönecektir.

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli durum bir fazın enerjisi kesilip diğer faz enerjilendirileceği zaman bir önceki fazda hali hazırda depolanmış olan enerjinin çok kısa bir süre içerinde boşaltılarak frenleme torku etkisi yapmasına engel olmaktır. Bunun için kullanılan IGBT'lerin ve Diyotların hızlarının yeterli olmasına dikkat edilmelidir.

Bu tasarımda kullanılan IGBT ve Diyotların isimleri ve özellikleri Ek-2 ve Ek-3 de verilmiştir. Dikkat edilmesi gereken temel özellikler aşağıdaki gibidir.

IGBT

- Azami Besleme Voltajı 600 V
- Gate Voltajı +/-20 V
- Kollektör Akımı (90 °C) 35 A
- İletime geçme süresi 30 ns
- Kesime geçme süresi 320 ns

Diyot

- Azami İletim Voltajı 1200 V
- Azami İletim Akımı 11 A
- İletime geçme süresi 50 ns

4.2.2. Kontrol Devresi

Kontrol devresinin temelini mikrodenetleyici oluşturmaktadır. Bilgisayar, mikrobilgisayar ve mikrodenetleyicilerin sahip olduğu kabiliyetler, sağladığı imkanlar, fiyatları, donanım özellikleri ve kullanım alanları farklıdır. Bunlardan en ucuz, kullanımı kolay ve basit yapıda olanı mikrodenetleyicilerdir [15].

Bugün pek çok günlük uygulamada mikrodenetleyiciler ve mikrobilgisayarlar kullanılmaktadır. Endüstriyel alanda ise mikrodenetleyicilerin kullanım alanı sıralanamayacak kadar geniştir [16].

Elektronik sistemlerde sayısal devrelere sıklıkla rastlanır. Pek çok aritmetik ve mantıksal işlemi sayısal devreler sayesinde yapmak mümkündür [17]. Sayısal bir sistemde gereken fonksiyonları yerine getiren bir devre kurmak veya tasarlamak için birkaç seçenek vardır.

İstenilen fonksiyonu yapmak üzere üretilmiş basit bir entegre devre piyasada mevcut olabilir. Buna şöyle bir örnek verilebilir: Amacımızın ikili sistemdeki iki sayıyı karşılaştırmak olduğunu varsayalım. Sayısal elektrik sinyalleri ile ifade edilen sayıları karşılaştırıp 'büyük', 'küçük' veya 'eşit' gibi sonuçlar veren entegre devreler piyasada mevcuttur ve oldukça ucuzdur. Bu durumda doğru olan bu devreleri kullanmaktır.

PLD (Programmable Logic Device) olarak adlandırılan programlanabilir yongalar her türlü mantıksal işlemi yapma kabiliyetine sahiptir. İstenilen fonksiyona göre tekrar programlanabilir olması en önemli özelliğidir. Kullanımı yukarıda bahsedilen entegre devreler kadar kolay değildir. Ayrıca maliyeti de daha yüksektir.

Bahsedeceğimiz son seçenek amacımıza uygun bir mikrodenetleyici kullanmaktır. Basit entegre devrelerin ve PLD'lerin yetersiz kaldığı durumlarda mikrodenetleyici kullanmak özellikle karmaşık sayısal sistemler için avantajlıdır. Günümüzde mikrodenetleyicileri programlamak PLD'leri programlamaktan zor olmadığı gibi mikrodenetleyiciler PLD'lerin sağlayamadığı pek çok kabiliyete de sahiptir. Bu üstün özellikleri sebebiyle pek çok elektronik kontrol sisteminde mikrodenetleyiciler tercih edilmektedir. Bu nedenle bu tasarımda da bir mikrodenetleyici kullanılmıştır.

Bu tasarımda kullanılan mikrodenetleyicinin özellikleri Ek-5 de verilmiştir. Dikkat edilmesi gereken temel özellikler aşağıdaki gibidir.

- CPU hızı 40 MHz
- Program hafızası 16384 byte
- Ram hafizası 1536 byte
- EEPROM 256 byte
- Giriş-Çıkış Sayısı 33

- Sayıcı (16 bit / 8 bit) 3/1
- PWM 10 bit 39 KHz
- RS232 (USART) 115200 Kbps

4.2.2.1. IGBT Sürücü Entegreleri

IGBT sürücü entegrelerinin görevi mikrodenetleciden alınan bilgilerin IGBT'lere uygulamaktır. Mikrodenetleyiciler genelde 5V ile çalışır. IGBT'lerin ise iletime geçirilebilmesi için kapılarına en az 10V uygulamak gerekmektedir.

Çeviricinin beslendiği DC bara gerilimi IGBT'lerin kontrolü açısından çok önemlidir. Özellikle yüksek voltajlarda sürücü entegre kullanmadan IGBT'leri kullanmak nerede ise imkansız görünmektedir. Bu yüzden Şekil 4.2'deki her faz sargısının altındaki A2, A4 ve A6 IGBT'lerini sürmek kolaydır, fakat üst taraftaki A1, A3 ve A5 IGBT'lerinin emiter voltajları, DC bara gerilimi ile sıfır volt arasında çok kısa sürelerde ve yüksek frekanslarda değiştiği için zordur. Bu nedenle üst taraftaki IGBT'lerin sürücü entegreleri olmadan kontrol edilebilmesi için izole ve ayrık bir besleme kaynağı gerekmektedir. Bu hem maliyet açısında yüksek, hem devre tasarımı açısından karmaşık hem de verim açısından yeterli olmayacaktır.

Normal MOSFET sürücü entegreleri IGBT'ler içinde kullanılabilir. Bu tasarımda kullanılan Sürücü Entegrenin ismi ve özellikleri Ek-1 de verilmiştir. Bu sürücü entegrelerin içerisindeki özel yapı ve haricen takılan bir kapasitor yardımıyla ayrık bir besleme kaynağına ihtiyaç kalmamaktadır. Önemli olan ilk olarak IGBT'lerin açık ve kapalı kalma sürelerini belirleyen PWM sinyallerini üretmek, daha sonra bu işareti güç katına iletmek ve orada IGBT'leri sürmektir.

4.2.2.2. Motor Pozisyon Sensörleri

Pozisyon sensörlerinin görevi motorun konumunu doğru olarak algılama ve bu bilgiyi mikrodenetleyici ye ulaştırmaktır. Motor pozisyonun doğru bir şekilde algılanması performans açısından çok önemlidir. Genelde pozisyon sensörlerinden istenen hassasiyet birkaç dereceden yukarı değildir.

Bu uygulamda kullanılan ve Arçelik A.Ş. AR-GE laboratuarlarında üretilmiş olan 6/4 lük ARM için kullanılan motor pozisyon sensörü yerleşimi Şekil 4.3'de görüldüğü gibidir. Birinci fazın statorları ile aynı hizada yerleştirilen ilk sensörden sonra diğer sensörler 30'ar derece ara ile yerleştirilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi birinci faz stator sargıları ile tam doğrultulu pozisyona geldiği anda motorun ileri yönde hareket ettiği düşünülecek olursa B sensörü 7.5 derece geçilmiş olacaktır. Geri yönde ise aynı şekilde A sensörü 7.5 derece geçilmiş olacaktır.

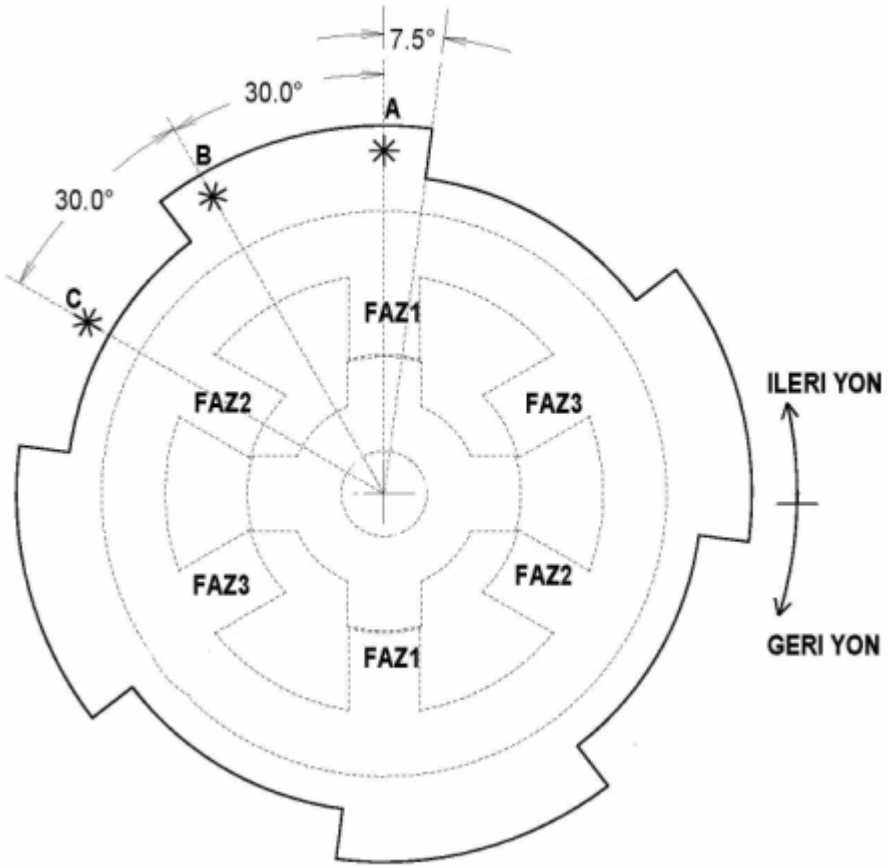
Bunun sebebi fazlar tam doğrultulu pozisyona gelmeden 7.5 derece önce durumun algılanması ve tork üretiminde ölü bölgeye gelmeden önce, ilgili fazın enerjisi kesilerek, diğer faza geçmek ve motordan azami verimi alabilmektir.

Bu tasarımda kullanılan Pozisyon Sensörünün ismi ve özellikleri Ek-4 de verilmiştir. Şekil 4.3'deki A, B ve C sensörlerinin fiziksel yapısı ve elektronik şeması Şekil 4.4'deki gibidir.

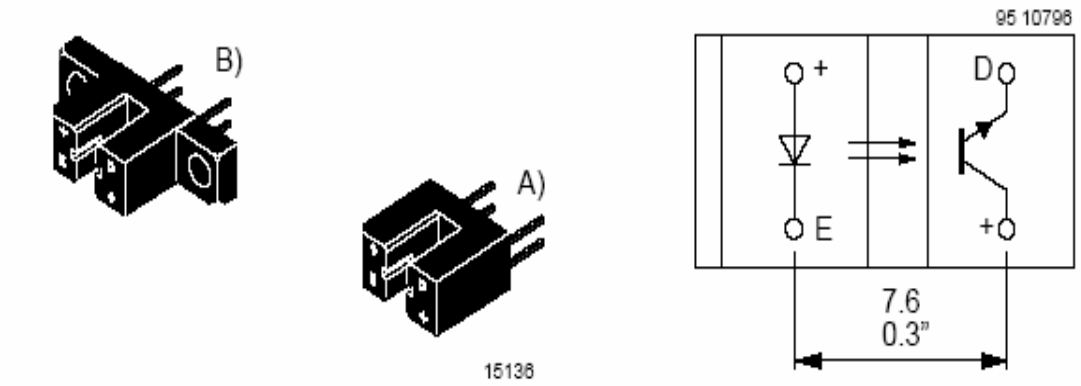
4 adet elektriksel terminali bulunan bu sensörün bir tarafında IR led diğer tarafında ise IR foto transistör bulunmaktadır. Sensör arasında herhangi bir fiziksel engel olmadığı müddetçe transistör iletimdedir. Aksi durumda kesime gidecektir.

Şekil 4.3'de verilen pozisyon sensörü yerleşimindeki A, B ve C algılayıcı çıkışlarının motor konumu ile değişimi Şekil 4.5'deki gibidir. Motor milinin arka kısmına yerleştirilmiş ve disk şeklindeki 45'er derecelik 4 adet çıkıntısı bulunan metal Şekil 4.3'de koyu çizgilerle belirtilmiştir. Bu disk motor gövdesine Şekil 4.3'deki gibi yerleştirilmiş olan 3 adet pozisyon sensörünün tam ortasından geçecek şekilde, motor miline, rotorla birlikte dönebilecek şekilde sabitlenmiştir.

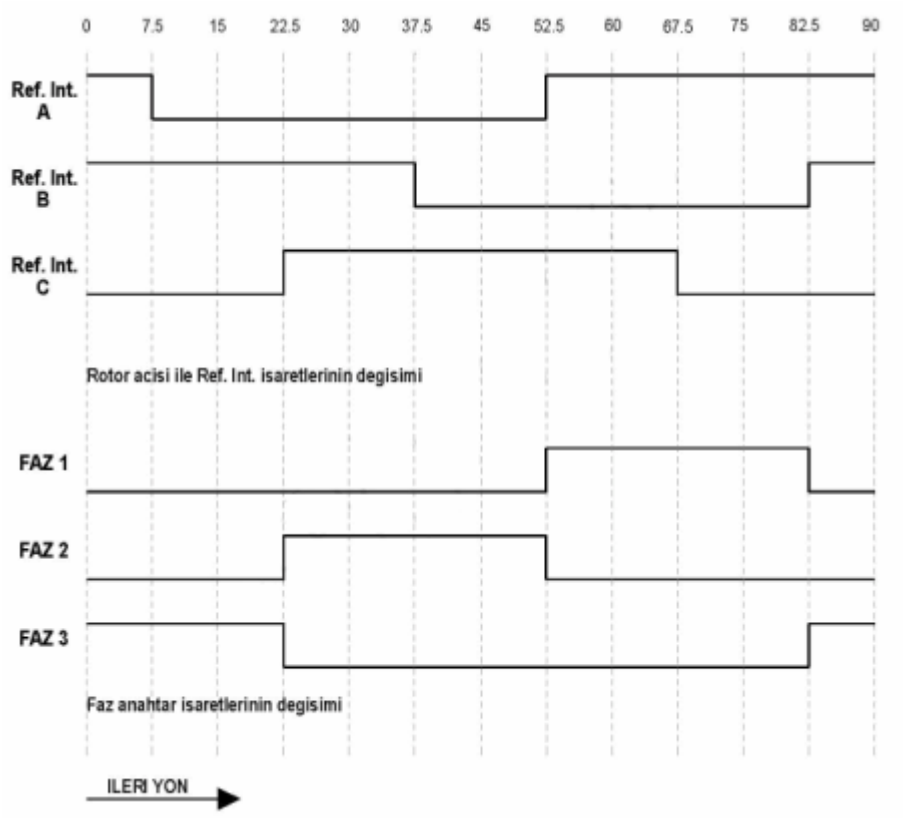
Şekil 4.4'deki transistorün D terminali toprağa çekilerek + terminali 10Kohm'luk bir dirençle +5V ta bağlanmıştır. Bu nedenle sensörlerden herhangi birinin arasında fiziksel bir engel olduğu zaman çıkışı 1 (+5V), aksi durumda 0 (0V) olmaktadır.



Şekil 4.3. Motor pozisyon sensörü yerleşimi.



Şekil 4.4. Motor pozisyon sensörleri



Şekil 4.5. Sensör çıkışlarının rotor konumu ile değişimi
ve faz anahtar işaretlerinin değişimi.

Başlangıç konumunda A ve B sensörleri metal disk ile kapalı C sensörü ise açık olduğu için sensör çıkışları A=1, B=1 ve C=0 şeklinde olacaktır. Bu durumlar Tablo 4.1'de lojik tabloda özetlenmiştir. Tablodanda anlaşıldığı gibi normal çalışma durumunda faz anahtarlarının lojik formülü FAZ1 = $A.\hat{B}$, FAZ2 = $\hat{A}$.C ve FAZ3 = $B.\hat{C}$ şeklindedir.

Tablo 4.1. Sensör çıkışları ve faz anahtar işaretlerinin değişimi

A	B	C	FAZ1	FAZ2	FAZ3
0	0	0	TANIMSIZ		
0	0	1	OFF	**ON**	OFF
0	1	0	OFF	OFF	**ON**
0	1	1	OFF	**ON**	OFF
1	0	0	**ON**	OFF	OFF
1	0	1	**ON**	OFF	OFF
1	1	0	OFF	OFF	**ON**
1	1	1	TANIMSIZ		

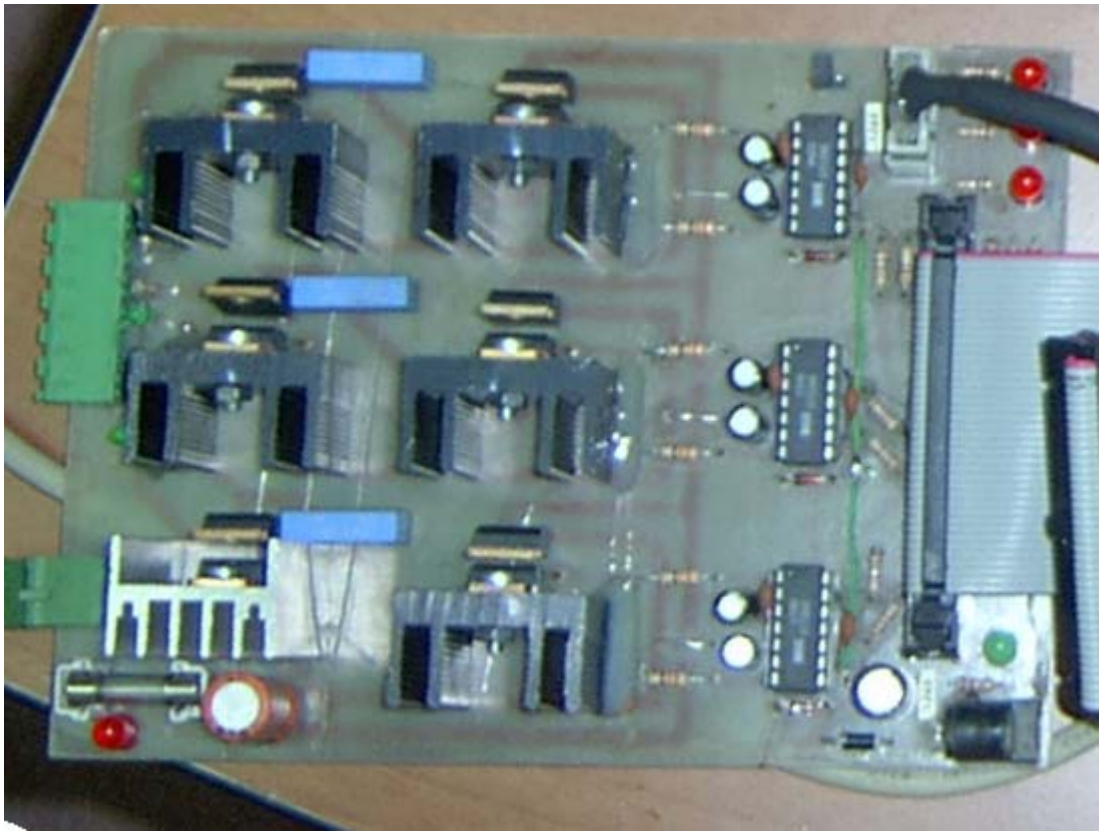
4.2.2.3. Motor Kontrol Butonları

Kontrol kartı üzerinde bulunan 5 adet buton ile motor duruş ve kalkış komutları verilebilmektedir. Ayrıca motor hız ayarını yapabilmek için PWM oranı değiştirilebilmektedir. PWM frekansının etkilerini inceleyebilmek amacıyla bu frekans 2.5 KHz ile 25 KHz arasında ayarlanabilmektedir.

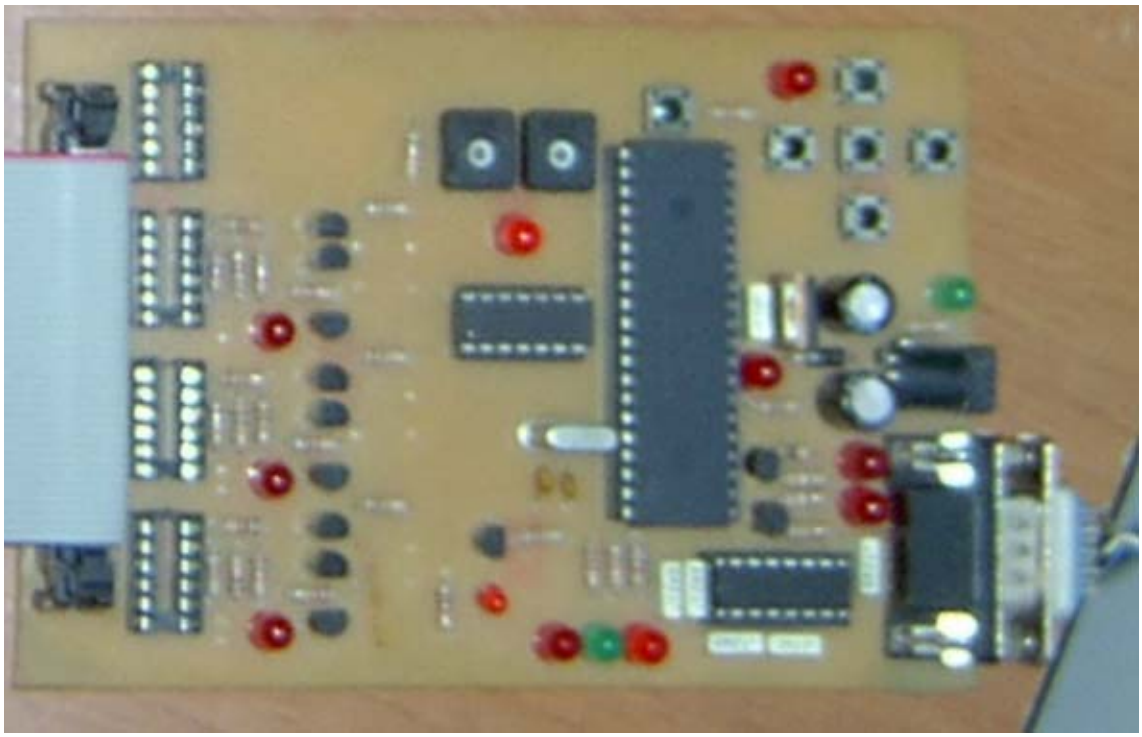
4.2.2.4. Bilgisayar Bağlantısı

Kontrol kartı üzerinde bulunan RS232 soketi ile bilgisayar bağlantısı yapılabilmektedir. Bu bağlantı sayesinde motorun hızı, anlık PWM frekansı ve PWM oranı yüzde olarak bilgisayardan izlenebilmekte ve PWM oranı bilgisayardan değiştirilebilmektedir. RS232 bağlantı tipi 8N1 ve hızı 115200 Kbps'dır.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sırasıyla gerçekleştirilen çevirici devresinin ve kontrol devresinin fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.6 Çevirici devresi fotoğrafı



Şekil 4.7 Kontrol devresi fotoğrafı

4.3 Yazılım Tasarımı

Bu tasarımda kullanılan programlama dili C'dir. Genellikle gömülü tasarımlarda bu dil tercih edilmektedir. Bunun sebebi C dilinin orta seviyeli bir dil olmasıdır. Bu nedenle hem donanım hakimiyeti yüksek hem de yazılması kolay ve anlaşılabilirliği yüksektir.

Yazılımın temelini kesmeler (Interrupts) oluşturmaktadır. Hemen hemen bütün işlemler kesmeler tarafından gerçekleştirilmektedir. Ana programda ise butonlar kontrol edilerek PWM görev döngüsü ve PWM frekansı değiştirilmektedir.

4.3.1 Kesmeler

Kesme bir girişin değişmesi, ayarlanan bir sürenin dolması, RS232 den bilgi gelmesi v.b. olayların olması durumunda mikrodenetleyicinin o anda yapmakta olduğu işlemi bırakarak, sabit bir adrese yönelmesi ve o adresteki komutları işleyip bitirdikten sonra daha önceden yapmakta olduğu işleme geri dönmesi şeklinde özetlenebilir. Bu

tasarımda kullanılan mikrodenetleyicinin iki farklı kesme adresi vardır. Bunlardan birisi diğerinden daha önceliklidir. Program içerisinde kesmelerin görevleri şunlardır:

Yüksek öncelikli Kesmeler

- Pozisyon değişimlerini algılamak
- Motor Start veya Stop komutunu işlemek

Düşük öncelikli Kesmeler

- Üç saniyelik süreyi ayarlamak
- Motor koruma süresi kontrol etmek
- Bilgisayardan gelen komutları algılamak

Yüksek öncelikli kesmeler motor kontrolü için kullanılmıştır. Yani mikrodenetleyici ister düşük öncelikli kesme içerisinde olsun ister normal çalışma durumunda olsun motor konumu değiştiğinde yada Start/Stop komutu verildiğinde, o anda yapmakta olduğu işlemi bırakarak motoru kontrol edecektir.

Düşük öncelikli kesme içerisindeki motor koruma ise her hangi bir sebeple motor çalışırken 5.000 PWM darbesi süresince (5KHz'de 1sn, 25KHz'de 0,2sn) pozisyon sensörlerinden herhangi bir bilgi gelmezse çevirici devresi tamamen kapatılarak motorun ve devrenin zarar görmesini engellenmektir.

4.3.2 Mikrodenetleyici Yazılımı

Bu yazılımın gerçekleştirilmesinde Microchip firmasına ait MPLAM IDE editör ve MCC18 C derleyici kullanılmıştır. Gerçekleştirilen yazılım ile motor yaklaşık 20.000 Devir/Dakika (RPM) hızına ulaşabilmiştir. Tablo 4.2'de verilen değerlere bakıldığı zaman yüksek hızlara ulaşabilmek içim, devre tasarımında kullanılan elemanların hızlarının yanı sıra yazılımın, motor pozisyonunu algılayarak bu elemanları kontrol etmede, ne kadar sade ve bir o kadar da yüksek performanslı olması gerektiği daha iyi anlaşılmaktadır.

Tablo 4.2. 20.000 RPM'de gerçekleşen bazı olaylar.

Azami Hız	20.000	*RPM*
Bir saniyedeki tur sayıyı	333	*Tur*
Bir saniyedeki faz değiştirme sayıyı	4.000	*Adet*
Bir tur süresi	3.000	*us*
Bir fazın iletimde kalma süresi	250	*us*
IGBT sürme frekansı	25000	*Hz*
IGBT sürme periyodu	40	*us*
Bir faza düşen darbe sayısı	6,25	*Adet*
Rotorun 30 derece dönme süresi	250,00	*us*
Rotorun 45 derece dönme süresi	375,00	*us*
Rotorun 90 derece dönme süresi	750,00	*us*

Kontrol kartından bilgisayara gönderilen veri formatı aşağıdaki gibidir.

H=19770 f=25000 t=400 D=380 %95
H=19790 f=25000 t=400 D=380 %95
H=19810 f=25000 t=400 D=380 %95
H=19880 f=25000 t=400 D=380 %95
H=19980 f=25000 t=400 D=380 %95
H=20085 f=25000 t=400 D=380 %95

Buradaki 'H=20085' motor hızının o anda 20.085 olduğunu, 'f=25000' üst koldaki IGBT'lerin sürme frekansının (PWM frekansının) 25 KHz olduğunu, 't=400' PWM periyodunun 40 us olduğunu, 'D=380' PWM görev döngüsünün (Duty Cycle) 38 us olduğunu ve '%95' ise PWM görev döngüsünün PWM periyoduna oranını vermektedir.

Motor hız hesabı A pozisyon sensörü kullanılarak yapılmaktadır. Bu sensör çıkışı mikrodenetleyici deki sensör girişi ile paralel olarak birde sayıcı girişine uygulanmıştır. Motorun her turunda A sensöründen 4 adet darbe gelmektedir. Her 3 saniyede bu sayıcıdaki değer alınarak bir önceki değerden çıkarılmakta ve sayıcı sıfırlanmaktadır.

Hız birimi Devir/Dakika olduğu için 1 dakikadaki (60 saniyedeki) devir sayısını bulmak için hız formülü "Hız = (3 Saniyedeki Motor tur sayısı) x 20" şeklinde olacaktır. Her turda 4 adet pals geldiği için, 3 Saniyedeki Motor tur sayısı ise sayıcıdaki değerin 4'te

1'ine eşittir. Dolayısıyla "Hız = (Sayıcıdaki değer / 4) x 20" yani "Hız = Sayıcıdaki değer x 5" şeklinde olur. Bu nedenle hız değerleri 5'in katı şeklindedir. Kontrol kartının motor hızını hesaplama hatası azami +/- 2.5 Devir/Dakika dır.

Motor hız ayarı kontrol kartı üzerinde bulunan butonlarla yapılabilği gibi aynı zamanda bilgisayar klavyesinden herhangi bir anda + ve – tuşları kullanılarak da yapılabilmektedir. Yani her iki durumda da motor güç ayarı veya hız ayarı işlemi motor çalışırken veya dururken yapılabilir.

4.4. Deneysel Çalışma

Yapılan çalışmada tasarlanan sürücü devresinden önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Deney çalışmasında kullanılan ARM'nin yapısal özellikleri Tablo 4.3'deki gibidir.

Tablo 4.3. Kullanılan ARM yapısının özellikleri

Stator kutup sayısı	6
Rotor kutup sayısı	4
Stator tel çapı	0.85 mm
Stator sarım sayısı	70
Paket boyu	100 mm
Stator kutup yayı genişliği	30°
Rotor kutup yayı genişliği	31.5°
Stator yarıçapı	63 mm
Stator kutup dış merkez uzaklığı	32.830 mm
Stator kutup iç merkez uzaklığı	52.520 mm
Stator kutup yatay genişliği	16.994 mm
Rotor kutup dış yarıçapı	32.530 mm
Rotor kutup iç yarıçapı	22.700 mm
Stator sargı akımı	1 A
Stator sargı voltajı	30 V
Hava aralığı	0.30 mm

Yapılan çalışmada, 6/4, 3 faz ARM tasarlanan sürücü devre çıkışına ve motor pozisyon sensörleri kontrol kartına bağlanarak çalıştırılmıştır. Yazılım geliştirme ve kart test aşamalarında sürücü kartı girişine 30 V bağlanarak çalışılmıştır. İlk etapta motora %20 oranında çıkış gücü uygulanarak motor yaklaşık 1000 Dev/Dak hızlarda çalıştırılmıştır. Bu esnada sürücü kartı çıkış gücü oranı %10'luk adımlarla arttırılarak, her adımda

çıkabildiği azami hıza ulaştıktan sonra yaklaşık 10-15 dakika süreyle çalışması gözlemlenmiştir. Bu gözlemler neticesinde, gerçekleştirilen sürücü devrede aşrı ısınma veya herhangi bir kararsızlık olmadığı anlaşılmıştır.

Bu işlemlerden sonra sürücü devre motora yük bağlanarak test edilmiştir. Bu testler sonucunda motorun aşırı yüklü olması durumunda ve çıkış gücü oranı yüksek olduğu durumlarda IGBT sürücü entegrelerinin zarar gördüğü tespit edilmiştir. [18] de verilen öneriler doğrultusunda bu problem aşılarak motorun yükte ve % 99,50 çıkış gücü oranı ile problemsiz bir şekilde ve devre elemanlarına zarar vermeden kalkışı sağlanmıştır.

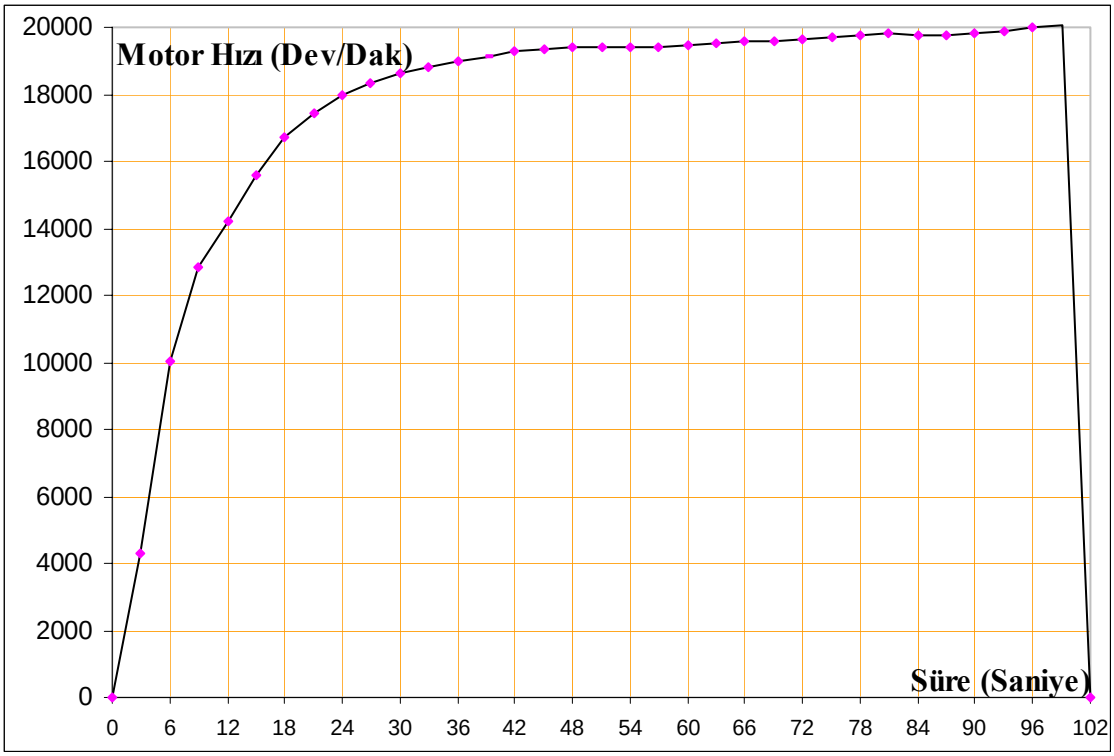
Tasarlanan devrenin özellikleri Tablo 4.4'deki gibidir:

Tablo 4.4. Tasarlanan devrenin özellikleri

Açıklama	Durum	Min	Standart	Max	Birim
Çıkış Faz Sayısı	-	-	3	-	Adet
DC Bara Gerilimi	-	0	200	600	V
DC Akım	90 °C	0	10	35	A
Kart Çıkış Gücü	25 KHz	0	1,90	19,95	KW
PWM Frekansı	-	2,50	-	25	KHz
Güç Aktarma Oranı	25 KHz	1	-	95	%
Güç Aktarma Oranı	2.5 KHz	0,25	-	99,50	%
Güç Aktarma Adım Oranı	25 KHz	-	0.25	-	%
Güç Aktarma Adım Oranı	2.5 KHz	-	1	-	%
Çevirici Kartı Besleme Voltajı	-	12	15	20	V
Kontrol Kartı Besleme Voltajı	-	8	12	15	V

Motor 20.085 Dev/Dak hıza ulaştığı anda yaklaşık 240 Km/h teğetsel hızda dönmekte olan rotordan bir parça koparak rotor ve stator arasına sıkışmış ve motor mekanik olarak kilitlenmiştir. Bu esnada sürücü devre sensörlerden hareket bilgisi gelmediği için çıkış gücünü 0,2 saniye gibi kısa bir sürede keserek hem devre elemanlarını hem de motor sargılarını korumuştur.

Bu tasarımın gerçekleştirilen sürücü devre ile elde edilen motor hızlanma grafiği Şekil 4.8'da verilmiştir.



Şekil 4.8. Motor Hızlanma Grafiği

5. BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmanın neticesinde 3 fazlı bir ARM için 1,90 KW gücünde bir sürücü devre tasarlanmıştır. Bu tasarım, gerektiğinde 4 fazlı bir ARM'yi kontrol edebilecek şekilde gerçekleştirilmiştir.

Sürücü kartını besleyen DC bara voltajı 120 volta çıkarılarak sürücü devresi test edilmiştir. Bu testler sonucunda motorun aşırı yüklü olması durumunda ve çıkış gücü oranı yüksek olduğu durumlarda IGBT sürücü entegrelerinin zarar gördüğü tespit edilmiştir. [18]'de verilen öneriler doğrultusunda bu problem aşılarak motorun yükte ve % 99,50 çıkış gücü oranı ile problemsiz bir şekilde ve devre elemanlarına zarar vermeden kalkışı sağlanmıştır.

25 KHz'de yapılan bu testlerin sonuncusunda motor dururken, % 95 güçle yol verilerek yaklaşık 1.5 dakika kadar çalıştırılmıştır. Bu esnada motorun kalkış anında 10 Amper normal çalışma süresince ise 4-5 Amper civarında akım çektiği gözlemlenmiştir. Motor 3. saniyede 4.280 Dev/Dak hıza, 6. saniyede 10.030 Dev/Dak hıza ve 99. saniyede ise 20.085 Dev/Dak hıza ulaşmıştır. Motorun kalkışı anında 3. ve 6. saniyeler arasındaki hız farkı 5.750 Dev/Dak'dır.

ARM'ler için literatürde belirtilen azami hız 50.000 Dev/Dak dır. Bunun yanı sıra bazı ARM üreticileri 120.000 Dev/Dak hızlarda çalışabilecek motorlar ürettiklerini belirtmektedirler. ARM'ler diğer motorlara nazaran yüksek hızlara çok rahat çıkabilmelerine rağmen çok yüksek hızlara çıkabilmek için özel ARM tasarımları yapmak gerekmektedir.

Bu çalışmada kullanılan motorun, gücünün düşük olması ve hava aralığının büyük

olması gibi faktörlerden dolayı 20.000 Dev/Dak azami hıza çıkılabilmiştir. Fakat tasarlanan sürücü devre 20.000 Dev/Dak için 6,25 olarak elde edilmiş olan, her bir faza uygulanan darbe sayısının 1 olması şartıyla teorik olarak 125.000 Dev/Dak hızı destekleyecek kapasitededir.

KAYNAKLAR

1. Krishnan, R., Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications, London, CRC Press, 2001.
2. Nasar, S.A., Ofsenani R., D.C. Switched Reluctance Motor, In Proceedings Of The Institution Electrical Engineers, 116(6),1048, 1969.
3. Diril, O., Anahtarlamalı Relüktans Motorda Moment Dalgalılığını Enazlama Üzerine Bir Çalışma, Doktora Tezi, İTÜ, 1999.
4. Hsu, J.S., Liou , P.S., Woodson, H.H., Peaked-MMF Smooth-Torque Reluctance Motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, 5(1), 104-109, 1990.
5. Xu, L., Wang, C., Accurate Rotor Position Detection and Sensorless Control of SRM for Super-High Speed Operation, IEEE Transactions on Power Electronics, 17(5), 757-763, 2002.
6. Özoğlu, Y., Anahtarlamalı Relüktans Motorunda Kutup Başlarına Şekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması, Doktora Tezi, İTÜ, 1999.
7. Gücüyetmez, M., Anahtarlamalı Relüktans Motorlarda Akustik Gürültünün Azaltılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2005.
8. Lu, Y., Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motors, Master of Science Thesis, The University of Tennesse, 2002.
9. Miller, T.J.E., Switched Reluctance Motors and Their Control, New York, Magna Physics Publishing & Clarendon Press, 1993.
10. Gizlier, E., Anahtarlı Relüktans Motorunun Manyetik Analizi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 2001.
11. Yadlapalli, N., Implementation of a Novel Soft-Switching Inverter for Switched Reluctance Motor Drives, Ms. Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1999.
12. Sefa, İ., Sliding Mode Yaklaşımı ile Anahtarlamalı Relüktans Motorun Hız Kontrolü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 1997.
13. Ehsani, M., Husain, I. Ramani, KR Galloway, Dual-Decay Converter for Switched Reluctance Motor Drives in Low-Voltage Applications, IEEE Transactions on Power Electronics, 8(2), 224-230, 1993.

14. Barnes, M., Pollock, C., Power Electronic Converters for Switched Reluctance Drives, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 13, No. 6, November 1998.
15. Gadre, Dhananjay V., Programming and Customizing the AVR Microcontroller, McGraw Hill, 2000
16. Peatman, John B., Design With PIC Microcontrollers, Prentice Hall, NJ, 1997
17. Altınbaşak, O., Mikrodenetleyiciler ve PIC Programlama, Atlaş Yayınları, İstanbul, 2001
18. Chey, C., Parry, J., Managing Transients in Control IC Driven Power Stages, International Rectifier, 233 Kansas Street, El Segundo, CA 90245 USA, 2003

EKLER

Ek-1. Tasarımda kullanılan IGBT Sürücü Entegresi

International
IOR Rectifier

Data Sheet No. PD60147 Rev.T

IR2110(S)/IR2113(S) & (PbF)

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
  Fully operational to +500V or +600V
  Tolerant to negative transient voltage
  dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
  Separate logic supply range from 3.3V to 20V
  Logic and power ground ±5V offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs
- Also available LEAD-FREE

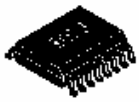
Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
I_O+/-	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

Packages



14-Lead PDIP
IR2110/IR2113

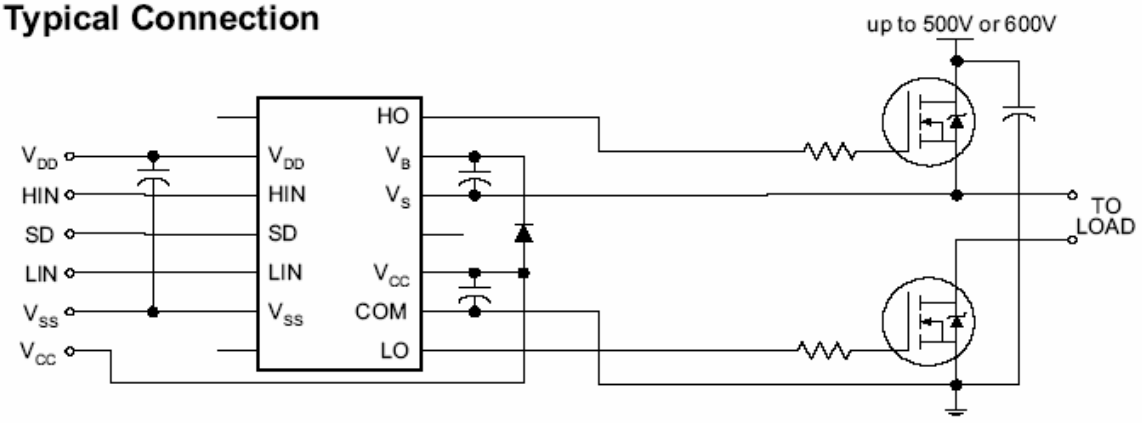


16-Lead SOIC
IR2110S/IR2113S
(Also available
LEAD-FREE (PbF))

Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Typical Connection



(Refer to Lead Assignments for correct pin configuration). This/These diagram(s) show electrical connections only. Please refer to our Application Notes and DesignTips for proper circuit board layout.

Ek-2. Tasarımda kullanılan Hızlı Geri-dönüşüm Diyotu

IXYS

Fast Recovery Epitaxial Diode (FRED)

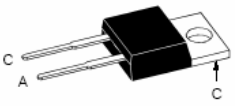
DSEI 12

I_{FAVM} = 11 A
V_{RRM} = 1200 V
t_{rr} = 50 ns

V_{RSM} V	V_{RRM} V	Type
1200	1200	DSEI 12-12A



TO-220 AC



A = Anode, C = Cathode

Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings	
I_{FRMS}	$T_{VJ} = T_{VJM}$	25	A
I_{FAVM} ①	T_C = 100°C; rectangular, d = 0.5	11	A
I_{FRM}	t_P < 10 µs; rep. rating, pulse width limited by T_{VJM}	150	A
I_{FSM}	T_{VJ} = 45°C; t = 10 ms (50 Hz), sine	75	A
	t = 8.3 ms (60 Hz), sine	80	A
	T_{VJ} = 150°C; t = 10 ms (50 Hz), sine	65	A
	t = 8.3 ms (60 Hz), sine	70	A
I^2t	T_{VJ} = 45°C t = 10 ms (50 Hz), sine	28	A^2s
	t = 8.3 ms (60 Hz), sine	27	A^2s
	T_{VJ} = 150°C; t = 10 ms (50 Hz), sine	21	A^2s
	t = 8.3 ms (60 Hz), sine	20	A^2s
T_{VJ}		-40...+150	°C
T_{VJM}		150	°C
T_{stg}		-40...+150	°C
P_{tot}	T_C = 25°C	78	W
M_d	Mounting torque	0.4...0.6	Nm
Weight		2	g

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values typ.	max.	
I_R	T_{VJ} = 25°C $V_R = V_{RRM}$		250	µA
	T_{VJ} = 25°C V_R = 0.8 • V_{RRM}		150	µA
	T_{VJ} = 125°C V_R = 0.8 • V_{RRM}		4	mA
V_F	I_F = 12 A; T_{VJ} = 150°C		2.2	V
	T_{VJ} = 25°C		2.6	V
V_{T0}	For power-loss calculations only		1.65	V
r_T	$T_{VJ} = T_{VJM}$		46.2	mΩ
R_{thJC}			1.6	K/W
R_{thCK}		0.5		K/W
R_{thJA}			60	K/W
t_{rr}	I_F = 1 A; -di/dt = 50 A/µs; V_R = 30 V; T_{VJ} = 25°C	50	70	ns
I_{RM}	V_R = 540 V; I_F = 12 A; $-di_F/dt$ = 100 A/µs	6.5	7.2	A
	L ≤ 0.05 µH; T_{VJ} = 100°C			

Features

- International standard package JEDEC TO-220 AC
- Planar passivated chips
- Very short recovery time
- Extremely low switching losses
- Low I_{RM}-values
- Soft recovery behaviour
- Epoxy meets UL 94V-0

Applications

- Antiparallel diode for high frequency switching devices
- Anti saturation diode
- Snubber diode
- Free wheeling diode in converters and motor control circuits
- Rectifiers in switch mode power supplies (SMPS)
- Inductive heating and melting
- Uninterruptible power supplies (UPS)
- Ultrasonic cleaners and welders

Advantages

- High reliability circuit operation
- Low voltage peaks for reduced protection circuits
- Low noise switching
- Low losses
- Operating at lower temperature or space saving by reduced cooling

① I_{FAVM} rating includes reverse blocking losses at T_{VJM}, V_R = 0.8 V_{RRM}, duty cycle d = 0.5
Data according to IEC 60747
IXYS reserves the right to change limits, test conditions and dimensions

033

© 2000 IXYS All rights reserved

Ek-3. Tasarımda kullanılan IGBT

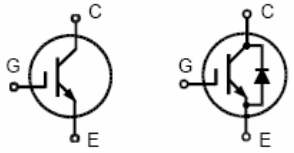
IXYS

IGBT with optional Diode

IXDP 35N60 B
IXDH 35N60 B
IXDH 35N60 BD1

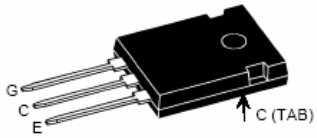
V_{CES} = 600 V
I_{C25} = 60 A
$V_{CE(sat)\ typ}$ = 2.1 V

High Speed,
Low Saturation Voltage

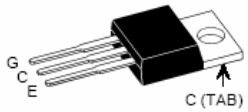


IXDH 35N60 B IXDH 35N60 BD1
IXDP 35N60 B

TO-247 AD IXDH ...



TO-220 AB IXDP ...



G = Gate, E = Emitter
C = Collector, TAB = Collector

Symbol	Conditions		Maximum Ratings	
V_{CES}	T_J = 25°C to 150°C		600	V
V_{CGR}	T_J = 25°C to 150°C; R_{GE} = 20 kΩ		600	V
V_{GES}	Continuous		±20	V
V_{GEM}	Transient		±30	V
I_{C25}	T_C = 25°C		60	A
I_{C90}	T_C = 90°C		35	A
I_{CM}	T_C = 90°C, t_p = 1 ms		70	A
RBSOA	V_{GE} = ±15 V, T_J = 125°C, R_G = 10 Ω Clamped inductive load, L = 30 µH		I_{CM} = 110 $V_{CEK} < V_{CES}$	A
t_{SC} (SCSOA)	V_{GE} = ±15 V, V_{CE} = 600 V, T_J = 125°C R_G = 10 Ω, non repetitive		10	µs
P_C	T_C = 25°C	IGBT Diode	250 80	W W
T_J			-55 ... +150	°C
T_{stg}			-55 ... +150	°C
Maximum lead temperature for soldering 1.6 mm (0.062 in.) from case for 10 s			300	°C
M_d	Mounting torque	TO-220 TO-247	0.4 - 0.6 0.8 - 1.2	Nm Nm
Weight			6	g

Symbol	Conditions		Characteristic Values (T_J = 25°C, unless otherwise specified) min.	typ.	max.	
$V_{(BR)CES}$	V_{GE} = 0 V		600			V
$V_{GE(th)}$	I_C = 0.7 mA, V_{CE} = V_{GE}		3		5	V
I_{CES}	V_{CE} = V_{CES}	T_J = 25°C T_J = 125°C		 1	0.1	mA mA
I_{GES}	V_{CE} = 0 V, V_{GE} = ±20 V				± 500	nA
$V_{CE(sat)}$	I_C = 35 A, V_{GE} = 15 V			2.2	2.7	V

Features

- NPT IGBT technology
- low switching losses
- low tail current
- no latch up
- short circuit capability
- positive temperature coefficient for easy paralleling
- MOS input, voltage controlled
- optional ultra fast diode
- International standard package

Advantages

- Space savings
- High power density

Typical Applications

- AC motor speed control
- DC servo and robot drives
- DC choppers
- Uninterruptible power supplies (UPS)
- Switch-mode and resonant-mode power supplies

021

© 2000 IXYS All rights reserved

Ek-4. Tasarımda kullanılan Pozisyon Sensörü

VISHAY

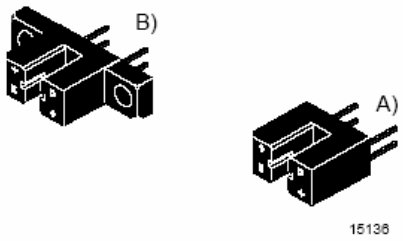
TCST110. up to TCST230.

Vishay Telefunken

Transmissive Optical Sensor with Phototransistor Output

Description

This device has a compact construction where the emitting-light sources and the detectors are located face-to-face on the same optical axis. The operating wavelength is 950 nm. The detector consists of a phototransistor.

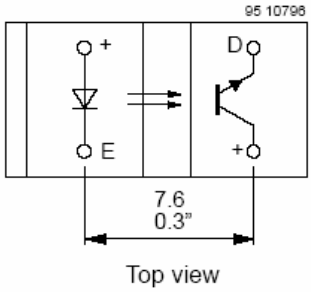


Applications

- Contactless optoelectronic switch, control and counter

Features

- Compact construction
- No setting efforts
- Polycarbonate case protected against ambient light
- 2 case variations
- 3 different apertures
- CTR selected in groups (regarding fourth number of type designation)



Top view

Order Instruction

Ordering Code	Resolution (mm) / Aperture (mm)	Remarks
TCST1103[A)]	0.6 / 1.0	No mounting flags
TCST2103[B)]		With two mounting flags
TCST1202[A)]	0.4 / 0.5	No mounting flags
TCST2202[B)]		With two mounting flags
TCST1300[A)]	0.2 / 0.25	No mounting flags
TCST2300[B)]		With two mounting flags

Ek-5. Tasarımda kullanılan Mikrodenetleyici

MICROCHIP

PIC18FXX2

28/40-pin High Performance, Enhanced FLASH Microcontrollers with 10-Bit A/D

High Performance RISC CPU:

- C compiler optimized architecture/instruction set
  - Source code compatible with the PIC16 and PIC17 instruction sets
- Linear program memory addressing to 32 Kbytes
- Linear data memory addressing to 1.5 Kbytes

Device	On-Chip Program Memory		On-Chip RAM (bytes)	Data EEPROM (bytes)
	FLASH (bytes)	# Single Word Instructions		
PIC18F242	16K	8192	768	256
PIC18F252	32K	16384	1536	256
PIC18F442	16K	8192	768	256
PIC18F452	32K	16384	1536	256

- Up to 10 MIPs operation:
  - DC - 40 MHz osc./clock input
  - 4 MHz - 10 MHz osc./clock input with PLL active
- 16-bit wide instructions, 8-bit wide data path
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single Cycle Hardware Multiplier

Peripheral Features:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupt pins
- Timer0 module: 8-bit/16-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Timer1 module: 16-bit timer/counter
- Timer2 module: 8-bit timer/counter with 8-bit period register (time-base for PWM)
- Timer3 module: 16-bit timer/counter
- Secondary oscillator clock option - Timer1/Timer3
- Two Capture/Compare/PWM (CCP) modules. CCP pins that can be configured as:
  - Capture input: capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns (TCY/16)
  - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (TCY)
  - PWM output: PWM resolution is 1- to 10-bit, max. PWM freq. @: 8-bit resolution = 156 kHz, 10-bit resolution = 39 kHz
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module, Two modes of operation:
  - 3-wire SPI™ (supports all 4 SPI modes)
  - I^2C™ Master and Slave mode

Peripheral Features (Continued):

- Addressable USART module:
  - Supports RS-485 and RS-232
- Parallel Slave Port (PSP) module

Analog Features:

- Compatible 10-bit Analog-to-Digital Converter module (A/D) with:
  - Fast sampling rate
  - Conversion available during SLEEP
  - Linearity ≤ 1 LSb
- Programmable Low Voltage Detection (PLVD)
  - Supports interrupt on-Low Voltage Detection
- Programmable Brown-out Reset (BOR)

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced FLASH program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory
- FLASH/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own On-Chip RC Oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options including:
  - 4X Phase Lock Loop (of primary oscillator)
  - Secondary Oscillator (32 kHz) clock input
- Single supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

- Low power, high speed FLASH/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption:
  - < 1.6 mA typical @ 5V, 4 MHz
  - 25 µA typical @ 3V, 32 kHz
  - < 0.2 µA typical standby current

© 2002 Microchip Technology Inc.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Aksaray'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı ilde tamamladıktan sonra 1997 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Bölümünde okumaya hak kazandı. Bir yıllık hazırlık eğitiminin ardından lisans eğitimine başladı. 2003 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen aynı bölümde eğitimine devam etmektedir.

İletişim

Adres: Seyitgazi Mah. Mahmutpaşa Sk.
Seyitburhanettin Apt. No: 40/8
Melikgazi / KAYSERİ

E-posta: mutlumut@gmail.com