

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**

**12/8 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU VE 2N TİPİ  
SÜRÜCÜ TASARIMI VE GERÇEKLEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CİHANGİR YAVUZ**

**DENİZLİ, EKİM - 2015**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**



**12/8 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU VE 2N TİPİ  
SÜRÜCÜ TASARIMI VE GERÇEKLEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CİHANGİR YAVUZ**

**DENİZLİ, EKİM - 2015**

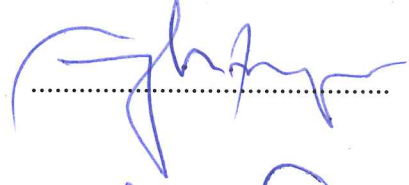
## KABUL VE ONAY SAYFASI

**CİHANGİR YAVUZ** tarafından hazırlanan “**12/8 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU VE 2N TİPİ SÜRÜCÜ TASARIMI VE GERÇEKLEMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 05.10.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.


Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Ceyhun KARPUZ



Üye  
Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZEK  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN  
Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02.12.2015 tarih ve 45/18 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**CİHANGİR YAVUZ**



## ÖZET

### 12/8 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU VE 2N TİPİ SÜRÜCÜ TASARIMI VE GERÇEKLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CİHANGİR YAVUZ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. CEYHUN KARPUZ)

DENİZLİ, EKİM - 2015

Anahtarlamalı relüktans motoru gelişen yarı iletken teknoloji ile yeniden hayat bulmuştur. Yüksek verim, düşük maliyet, basit mekanik gibi avantajlarından dolayı hızlı bir şekilde günlük hayatta hak ettiği yeri almaya başlamıştır. Anahtarlamalı relüktans motorun çalışması için bir çevirici devre kullanmak şarttır.

Bu tez kapsamında yeni bir anahtarlamalı relüktans motoru ve sürücüsü tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında katı hal çizimi için SolidWork programını ve manyetik analiz için maxwell programını kullanılmıştır. 1.5kW gücünde bir anahtarlamalı relüktans motorunu 2N köprü tipi sürücü devresi ile birlikte tasarlanmıştır.

**ANAHTAR KELİMELEER:12/8 AR Motor, 2N Tipi AR Motor Sürücü, 3 Faz AR Motor**

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF 12/8 SWITCHED RELUCTANCE MOTOR AND 2N TYPE DRIVER**

**MSC THESIS**

**CİHANGİR YAVUZ**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:PROF. DR. CEYHUN KARPUZ)**

**DENİZLİ, OCTOBER 2015**

Switched reluctance motor has found a large application with the evolving semiconductor technology. Due to its high efficiency, low cost, simple mechanic structures, switched reluctance motor have began to take place it deserved in daily life. It is essential to use a converter circuit for operation of the switched reluctance motors

In this thesis a new switched reluctance motor and its driver is designed. The SolidWorks is used for solid-state drawing at the design stage and Maxwell is used for magnetic analysis. A 1,5 kW switched reluctance motor has been designed with 2N type bridge converter circuit.

**KEYWORDS:12/8 SR Motor, 2N Type SR Motor Driver, 3 Phase SR Motor**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Tarihi Gelişmesi .....	2
<b>2. ANAHTARLAMAalı RELÜKTANS MOTORUN TEMELLERİ.....</b>	<b>5</b>
2.1 Geleneksel Elektrik Makineleri.....	5
2.1.1 Geleneksel Elektrik Makinelerinin Yapısı.....	6
2.2 Anahtarlamaalı Relüktans Motorlarının Yapısı ve Çalışma Prensipleri	7
2.2.1 Anahtarlamaalı Relüktans Motorlarının Temel Özellikleri.....	7
2.2.2 Değişken Relüktans .....	9
2.2.3 Endüktans Değişimi .....	10
2.2.4 Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Çalışma Prensipleri .....	13
2.2.5 Tork.....	14
2.2.6 AR Motor Eşdeğer Devre .....	19
2.2.7 AR Motorda Tork-Hız Eğrisi.....	20
<b>3. ANAHTARLAMAalı RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI.....</b>	<b>22</b>
3.1 Tasarımda İstenilen Özellikler .....	22
3.2 Rotorun Ölçülendirilmesi .....	23
3.3 Hava Aralığı .....	24
3.4 Stator ve Rotor Çıkık Kutuplarının Kalınlıklarının Hesaplanması ....	25
3.5 Rotor Oyuk Derinliğinin Hesaplanması .....	26
3.6 Rotor Boyunduruk Kalınlığı.....	26
3.7 Rotor Mili Çapının Hesaplanması .....	27
3.8 Stator Boyunduruk Kalınlığının Hesaplanması.....	27
3.9 Stator Oyuk Derinliğinin Hesaplanması.....	27
<b>4. AR MOTOR İÇİN SÜRÜCÜ DEVRELERİ .....</b>	<b>28</b>
4.1 AR Motor Çevirici Devre Çeşitleri .....	29
4.1.1 2n Tipi Klasik Köprü Çevirici Devresi.....	29
4.1.2 n+1 Tipi AR Motor Çevirici Devresi.....	30
4.1.3 Split Tip DC Çevirici Devresi .....	31
4.1.4 C Vuruş Tipi AR Motor Çevirici Devresi .....	31
4.1.5 Çift Tel (Bifilar) Sargılı AR Motor Sürücü Devresi.....	32
4.1.6 Söndürme Dirençli AR Motor Sürücü Devresi.....	33
<b>5. AR MOTOR İÇİN SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI VE GERÇEKLEMESİ.....</b>	<b>34</b>
5.1 AR Motor Çevirici Devre Tasarımı.....	34
5.1.1 Sürücü Devresinde Kullanılan Elemanlar ve Seçimi.....	35
5.1.1.1 Mosfetler .....	35
5.1.1.2 Hızlı Geri Dönüşüm Diyotları.....	36
5.2 Kontrol Kartı Tasarımı .....	36

5.2.1	Kontrol Katında Kullanılan Mikrodenetleyici .....	37
5.2.2	MOSFET Sürücü Entegresi .....	38
5.2.3	Konum Algılayıcı Sensör.....	39
<b>6.</b>	<b>MAXWELL İLE ARM SİMÜLASYONU VE SONUÇLARI .....</b>	<b>42</b>
6.1	Maxwell'de 12/8 3 Faz ARM'nin Geometrik Yapısının Oluşturulması .....	43
6.2	Maxwell 2D Design Sonuçları .....	45
6.2.1	Maxwell 2D Design'da Akı Yolları Gösterimi.....	45
6.2.2	Maxwell 2D Design'da Elde Edilen Grafikler .....	50
<b>7.</b>	<b>BULGULAR .....</b>	<b>57</b>
<b>8.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>61</b>
<b>9.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>69</b>
<b>10.</b>	<b>EKLER.....</b>	<b>73</b>
	EK A	73
	EK B	74
	EK C	75
	EK D	76
	EK E	77
	EK F	78
<b>11.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>82</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2. 1: 12/8 ARM yapısı.....	9
Şekil 2. 2: ARM’de rotor pozisyonu ile ideal faz indüktansı ve faz momenti değişim grafikleri .....	10
Şekil 2. 3: ARM’nin çalışması , (a) c fazı tam hizalı konumda, (b) a fazı tam hizalı konumda.....	13
Şekil 2. 4: Akı ve halkalanma akısı arasındaki ilişki .....	15
Şekil 2. 5: ARM’nin bir fazına ait eşdeğer elektriksel devre.....	19
Şekil 2. 6: ARM’nin tork-hız eğrisi .....	21
Şekil 4. 1: 2n tipi ARM çevirici devresi.....	29
Şekil 4. 2: n+1 tipi sürücü devresi.....	30
Şekil 4. 3: Split DC çevirici devresi.....	31
Şekil 4. 4: C-vuruş tipi ARM sürücü devresi.....	32
Şekil 4. 5: Bifilar sargılı ARM sürücü devresi.....	32
Şekil 4. 6: Söndürme dirençli ARM sürücü devresi .....	33
Şekil 5. 1: 2n tipi ARM sürücü devresi.....	34
Şekil 5. 2: Kullanılan mosfetin bacak bağlantıları ve dış kılıfı.....	35
Şekil 5. 3: Kullanılan hızlı diyotun bacak bağlantıları ve dış kılıfı .....	36
Şekil 5. 4: Kullanılan hızlı diyotun bacak bağlantıları ve dış kılıfı .....	37
Şekil 5. 5: Kullanılan PIC’in bacak bağlantıları ve dış kılıfı .....	38
Şekil 5. 6: TLP250’nin içyapısı .....	39
Şekil 5. 7: TLP250’nin bağlantı şekli .....	39
Şekil 5.8: H21A1 konum algılama sensörü .....	40
Şekil 5. 9: 12/8 3 faz ARM’ye konum algılama aparatlarının montajı.....	41
Şekil 5. 10: Alınan sensör verilerine göre fazların ON/OFF durumu .....	41
Şekil 6. 1: ARM’nin ilk fazı uyarıldığında oluşan akı yolu.....	43
Şekil 6. 2: ARM’nin ilk fazı uyarıldığında oluşan akı yolu.....	46
Şekil 6. 3: ARM’nin uyarılan fazı ile rotor kutuplarının çakışmaya başlama anı.....	46
Şekil 6. 4: ARM’nin 6. dereedeki akı dağılımı .....	47
Şekil 6. 5: ARM’nin 11. derecedeki akı dağılımı .....	48
Şekil 6. 6: 15. derecede rotor ve stator kutuplarının tam çakışma anı .....	49
Şekil 6. 7: ARM’nin halkalanma akısı-akım eğrisi.....	50
Şekil 6. 8: ARM’nin sabit akımda tork-zaman eğrisi .....	51
Şekil 6. 9: ARM’de A fazı gerilim-zaman grafiği. ....	51
Şekil 6. 10: ARM’de A fazı akım-zaman grafiği.....	52
Şekil 6. 11: ARM’de A fazı akı-zaman grafiği.....	52
Şekil 6. 12: ARM’de B fazı gerilim-zaman grafiği.....	53
Şekil 6. 13: ARM’de B fazı akım-zaman grafiği.....	53
Şekil 6. 14: ARM’de B fazı akı-zaman grafiği.....	54
Şekil 6. 15: ARM’de C fazı gerilim-zaman grafiği.....	54
Şekil 6. 16: ARM’de C fazı akım-zaman grafiği.....	55
Şekil 6. 17: ARM’de C fazı akı-zaman grafiği .....	55

Şekil 6. 18: ARM’de fazların enerjilenme sırası.....	56
Şekil 7. 1: ARM’de oluşturulan 4 kutup yapısı.....	57
Şekil 7. 2: ARM’de oluşturulan çift kutup yapısı. ....	58
Şekil 7. 3: ARM’de oluşturulan 2 kutup yapısı sonucu oluşan akı yolları. ....	58
Şekil 7. 4: ARM’de oluşturulan dört kutup yapısı sonucu oluşan akı yolları. ...	59
Şekil 7. 5: ARM’de oluşturulan çift kutup ve dört kutup yapısı(koyu çizgi) sonucu tork eğrilerinin kıyaslanması.....	60
Şekil 7. 6: ARM’de oluşturulan çift kutup ve dört(koyu çizgi) kutup yapısı sonucu oluşan akımların kıyaslanması. ....	60
Şekil 8. 1 : Sarım işlemi tamamlanmış halde 12/8 ARM.....	61
Şekil 8. 2: Bir fazdaki gerilim ve akım(gerilim probu *10 kademesindedir.) ..	63
Şekil 8. 3 : Tez kapsamında yapılan 12/8 1.5kW 3 faz ARM ve sürücüsü.....	64
Şekil 8. 4 : Optik sensörler ve diskin motora montajı.....	64
Şekil 8. 5 : Tez kapsamında yapılan sürücü .....	65
Şekil 8. 6 : Kontrol katının ares çizimi .....	66
Şekil 8. 7 : Kontrol katı .....	66
Şekil 8. 8 : Güç katı devresi çizimi .....	67

## TABLO LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Tablo 3.1: TRV, $\sigma$ ve $C_0$ 'ın tipik değerleri $\sigma$ .....	23
Tablo 6.1: Tasarlanan ARM'nin elektriksel ve geometrik değerleri .....	46
Tablo 8.1: Tasarlanan ARM'nin farklı gerilim seviyesindeki çalışmasında akım ve hız değerleri .....	62

## SEMBOL LİSTESİ

$D_s$	: Stator çapı
$D_r$	: Rotor çapı
$D_{sh}$	: Rotor mil çapı
$d_{sh}$	: Rotor mil yarıçapı
$t_s$	: Stator kutup genişliği
$t_r$	: Rotor kutup genişliği
$y_r$	: Rotor boyunduruk kalınlığı
$y_s$	: Stator boyunduruk kalınlığı
$r_1$	: Rotor yarı çapı
$\beta_s$	: Stator kutup açısı
$\beta_r$	: Rotor kutup açısı
$d_r$	: Rotor oyuk derinliği
$d_s$	: Stator oyuk derinliği
$g$	: Hava aralığı
$F$	: Manyetik kuvvet
$\mathfrak{R}$	: Relüktans
$\phi$	: Akı
$C_0$	: Çıkış katsayısı
$\phi$	: Akı
$r_0$	: Rotor küçük yarıçapı
$L_{stk}$	: Motor saç paket uzunluğu
$\sigma$	: Hava aralığı kesme stresi
$q$	: Motor faz sayısı

## ÖNSÖZ

Tez kapsamında 12/8 üç faz anahtarlamaalı relüktans motoru ve bu motoru sürmekte kullanmak üzere 2n klasik köprü tipi sürücü tasarımı yapılmıştır. Tez kapsamında karşılaştığım zorluklarda benden yardımını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ceyhun Karpuz'a, Doç. Dr. Sinan Kıvrak'a teşekkürlerimi sunarım.

Motor tasarımı ve maxwell analizlerinde her türlü yardımını esirgemeyen Metin Ersöz'e, bobinaj işlemlerinde büyük katkı sağlayan Hatek Elektrik sahibi Ekrem Okluoğlu'na, mekanik imalat ve tedarikte göstermiş olduğu katkılardan dolayı Arslan Talaşlı İmalat ve Makine Sanayii genel müdürü Bünyamin Arslan'a ve makine mühendisi Mahmut Tokgöz'e ve yetişmemde her türlü fedakarlığı gösteren öğrendiğim her kelimedede hakkı olan babam İbrahim Yavuz ve annem Zeynep Yavuz'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

# 1. GİRİŞ

Anahtarlı relüktans(AR) motorun çalışma prensibi 1838 yılında ortaya atılmasına rağmen motorun uzun yıllar uygulaması mümkün olmamıştır. Çünkü anahtarlı relüktans motorun konumunu okuyacak ve ona göre fazlardan akım akıtacak anahtar elemanlar yoktu. Ancak 1960'lı yılların başında güç elektroniğindeki gelişme ile beraber bu motorun sürülmesi mümkün olmuştur. Bilinen en eski motor olmasına rağmen anahtarlı relüktans motorun incelenmesi ve araştırılması yenidir. Özellikle 1980 yılından sonra bu motor üzerinde yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır (Krishnan 2001). Anahtarlı relüktans motorun gündeme gelmesi sadece elektronikteki gelişmelere bağlı değildir. Teknolojideki gelişmeler bu motorun uygulanabilirlik açısından önünü açmıştır. Anahtarlı relüktans motorun yapısının basit olması, üretim maliyetinin düşük olması ve bakım-onarım masrafının az olması kendisine olan ilginin diğer bir kaynağıdır. Kolay hız ayarı ve çok yüksek hızlarda dönebilme bu motorların diğer üstünlüklerindedir. Anahtarlı relüktans motorlar üzerine yapılan ilk çalışmalar İngiltere'de başlamıştır. Ancak takip eden yıllarda diğer Avrupa ülkelerinde, Amerika Birleşik Devletlerinde ve Uzakdoğu ülkelerinde anahtarlı relüktans motorlar incelenmeye ve araştırılmaya başlanmıştır. Bugün itibarıyla yukarıda adı geçen ülkelerde bazı şirketler anahtarlı relüktans motorları ticari olarak imal etmekte ve dünya çapında pazarlamaktadır. Ülkemizde ise bu motorlar üniversitelerin katkıları ile tanınmaya ve az da olsa endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Anahtarlı relüktans motorlarda iki temel sorun ile karşılaşılır. Sorunlardan biri AR motor çalışırken oluşan akustik gürültüdür. Diğeri ise motorun ürettiği momentteki dalgalanmalardır. Aslında bu iki problemin ana sebebi motorun yapısıdır. Anahtarlı relüktans motorun statoru ve rotoru çıkık kutuplu bir yapıya sahiptir. Stator kutupları üzerindeki sargılardan akım akınca elektromıknatis prensibine göre stator kutbu rotor kutbunu kendine doğru çeker. Rotor kutupları arasındaki boşluk stator ile rotor arasındaki hava aralığı mesafesinin değişken olmasına sebep olmaktadır. Böylece rotor dönerken rotor kutbuna etki eden radyal ve aksel kuvvetler sürekli değişir. Gürültüyü oluşturan magnetik kaynakların başında rotora etki eden radyal kuvvetler gelmektedir. Rotor çıkık kutuplarına etki eden yarıçap yönünde oluşan kuvvetler rulmanlarda titreşimlere neden olmaktadır. Bu titreşimler statorda akustik gürültü olarak görülür. Rulmanlara

gelen bu mekanik titreşimler bir süreden sonra rulmanları bozmaktadır. Motorun tasarımında yapılacak değişiklikler ile titreşimi ve gürültüyü azaltmak mümkündür.

Anahtarlı relüktans motorda üretilen toplam moment fazların her birinin bağımsız ürettiği momentlerin toplamına eşittir. Her bir fazın ürettiği moment akımın karesi ve indüktansın değişimine bağlıdır. Doymanın olmadığı, akıma bağlı akımın değişiminin doğrusal kabul edildiği doğrusal çalışma durumunda akım sabit tutulursa üretilen moment de düzgün olacaktır. Ancak akımın bir fazdan diğer faza geçtiği komütasyon aralığında akımı sabit tutmak mümkün olamamaktadır. Moment eğrilerindeki çökmeler çoğunlukla komütasyon aralığında meydana gelir.

### **1.1 Anahtarlamalı Relüktans Motorun Tarihi Gelişmesi**

Anahtarlı relüktans motorlarla ilgili ayrıntılı çalışmalar İngiltere’de 1967 yılında Leeds Üniversitesinde ve daha sonra 1973 yılında Nottingham Üniversitesinde başlamıştır. 1976 yılına kadar AR motorlarla ilgili dünya çapında 67 patent, 1976 ile 1999 yılları arasında ise 1755 patent alınmıştır. Yine 1976 yılına kadar AR motor ile ilgili 11 makalenin, 1976 ile 1999 yılları arasında 1847 makalenin yayınlandığı tespit edilmiştir. Cruickshank, Anderson ve Menzies 1966 ile 1968 yılları arasında geliştirdikleri alan anahtarlamalı relüktans motor, AR motorlarda ilgili önemli bir örnek olmuştur. Modern relüktans motorların ve sürücülerinin bazı özelliklerini bu çalışmada bulmak mümkündür. General Elektrik şirketinde 1972 yılında Bedford vd. modern anahtarlı relüktans motorun tüm özelliklerini tanımlayan iki patent almıştır. General elektrik anahtarlı relüktans motor ve adım motorlarla beraber birçok özel motor üretmiştir (Krishnan 2001).

Lawrenson ve Stephenson Leeds Üniversitesin ’de anahtarlı relüktans motorlar üzerine birlikte çalışmaya başlamış, kurdukları Switched Reluctance Drivers Ltd. şirketi ile ARM’leri ticari noktaya taşımıştır ve sonra bu şirket 1994 yılında Emerson şirketi ile birleşmiştir. AR motor sürücünün volt-ampere ihtiyacı, kontrolü, konum okuyucu ihtiyacı ve gürültü seviyesi gibi konular üzerinde durulmuştur. 1970’lı yılların başından itibaren teknolojiye paralel olarak anahtarlı relüktans motorlarda yeni gelişmeler meydana gelmiştir. Örneğin güç transistör, güç MOSFET

ve IGBT anahtarlama elemanları tristörden sonra icat edilmiştir ve tristörden farklı olarak çok yüksek frekanslarda anahtarlama imkânı vermiştir.

1980 yılında, Lawrenson ve arkadaşları AR motorların değişken hızlı uygulamalarda kullanılabileceğini göstermişlerdir (Miller 1993). AR motor ticari amaçlı olarak ilk kez 1983 yılında Oulton Drives Ltd. lisansı ile Tasc Drives tarafından İngiltere’de üretilmeye başlanmıştır.

1985 yılında Bose, Szczesny, Miller ve Bicknell, Intel 8751 mikroişlemci kullanarak 5 hp gücünde bir AR motorun kapalı döngü denetim ile hız ve moment kontrolünü laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir ve olumlu sonuçlar alınmıştır (Bose ve diğ. 1986).

Krishnan ve çalışma arkadaşları Siemens SAB 80535 mikroişlemci kullanarak 6/4 kutuplu bir AR motorun kapalı çevrim akım ve hız kontrolünü gerçekleştirmişlerdir (Krishnan ve diğ. 1990). Bu çalışmada Krishnan ve arkadaşları anahtarlama relüktans motorun sürücü maliyetini azaltmayı amaçlayarak motorun kullanım alanını genişletmek istemişlerdir evsel araçlarda kullanmayı da gözletmişlerdir.

Kjaer ve çalışma arkadaşları 6/4 AR motor ve 8 bitlik 80C517A mikroişlemci kullanılan bir uygulamada, gerilim kontrollü AR motorda elektrik enerjisi tüketimini azaltan ve verimi artıran iletim açısı kontrol algoritması gerçekleştirmişlerdir (Kjaer ve diğ. 1995). PWM tekniği kullanarak istenilen hıza daha hızlı ulaşmaya çalışmışlardır.

Kjaer ve çalışma arkadaşları dört çalışma bölgesinde, 3 hp gücünde 8/6 kutuplu bir AR motorun kontrolünün yapıldığı, 32 bitlik Motorola MC68332 mikroişlemci kullanılan bir çalışmada geniş hız aralığında, momentte az dalgalanma ve yüksek verim sağlayacak şekilde AR motor moment kontrolünü gerçekleştirmişlerdir (Kjaer ve diğ. 1996).

Fecir Duran TMS320F2812 sayısal işaret işlemci ile akım ve gerilim sensörleri kullandığı çalışmada, endüstriyel çamaşır makinelerinde kullanılan AR motorun akıllı kontrolünü gerçekleştirmiştir (Duran 2008). Fecir Duran ve Ömer Faruk Bay çalışmaları sonucunda anahtarlama relüktans motoru kullanılan bir çamaşır



makinesinin geleneksel motor kullanılan çamaşır makinelerine nazaran daha az enerji sarfettiği sonucuna ulaşmışlardır.

Karagöz 3 fazlı 6/4 kutuplu marş motoru olarak kullanılacak AR motor için kontrol devresi tasarımında, AR motorun sürücü sinyallerinin üretildiği sürüş işlemcisi ile haberleşme ve gösterge mikroişlemcisi olmak üzere iki adet PIC16F877A mikroişlemci ve opamp kullanılan kontrol devresi gerçekleştirmiştir (Karagöz 2009). Kullanılan mikroişlemci ve opamplar performansı artırdığı gibi maliyeti de artırmıştır.

Zeki Omaç ve çalışma arkadaşları 18/12 kutuplu AR motor tasarımı, incelenmesi ve kontrolünü yaptıkları çalışmada, kapalı çevrim hız kontrol uygulamasını TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi kullanarak gerçekleştirmişlerdir (Omaç ve diğ. 2007). Bu alışmada Zeki Omaç ve arkadaşları manyetik alan kaynaklı stator titreşimlerine ve gürültüye radyal kuvvet sebep olduğu için, rotor kutuplarına etki eden radyal kuvveti azaltmak amacıyla stator ve rotor kutup sayısını artırarak yeni bir anahtarlamalı relüktans motoru tasarlamışlardır.

## 2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TEMELLERİ

Tezin bu kısmında anahtarlamaalı relüktans motorlarının çalışma prensipleri üzerinde durulacaktır. Öncelikli kısımda elektrik motorları hakkında genel bilgiler verilecek ve daha sonraki kısımlarda anahtarlamaalı relüktans motorunun elektrik motorları arasında yeri ve öneminden ve yapısından bahsedilecektir.

### 2.1 Geleneksel Elektrik Makineleri

Çeviriciler herhangi bir formdaki enerjiyi diğere 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 değışken relüktans mekanizmalarıdır. Elektromanyetik olarak tork üretiminin olduğı 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 çoğı bu prensiple çalışmaktadır. DC, indüksiyon ve daimi mıknatıslı motorlar bu motorlara örnek olarak verilebilir. Değışken relüktans ile tork üretimi yapan ikinci kategorideki makinelerde, hareket, rotor ve stator arasındaki hava aralığındaki değışken relüktansın sonucu olarak üretilir. Relüktans, manyetik devrede akıya karşı gösterilen zorluk olarak tanımlanabilir. Bu durumda bir stator sargısına enerji verildiğı zaman, bu enerji tek bir manyetik alan üreterek, rotoru minimum relüktans konumuna hareket ettirecektir. Anahtarlamaalı Relüktans Motorlar bu ikinci çalışma prensibi ile tork üreten motorlardır (Krishnan 2001).

### 2.1.1 Geleneksel 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 makineler, 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(asekron) 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 ya da bakır çubukların rotor gövdesindeki oluklara yerleştirilerek sonları kısa devre edilmek sureti ile elde edilir (Lawrenson ve diğ. 1980).

## **2.2 Anahtarlamalı Relüktans Motorlarının Yapısı ve Çalışma Prensipleri**

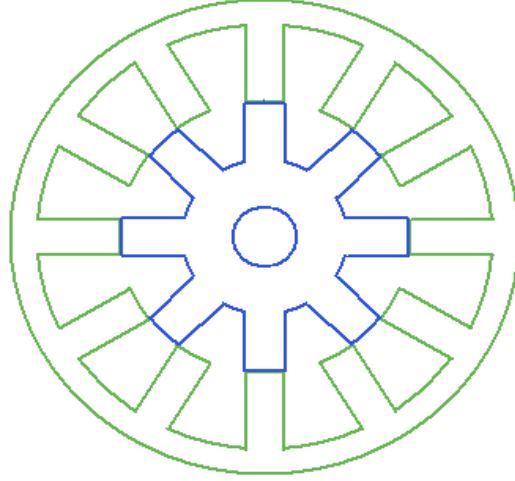
Anahtarlamalı relüktans motorlar, taşıdığı özellikleri ve yapısı ile senkron ve asenkron makinelerden oldukça farklıdır, ancak hem senkron hem de asenkron makinelerin yapısından faydalanılarak meydana getirilmiştir. Stator ve rotorun geometrik yapısı üzerinde değişiklikler yapılarak oluşturulan yeni yapılar incelenmiş ve sonuçta daha verimli motorlar elde edilmeye çalışılmıştır. İlk AR motor, senkron motor yapısı üzerinde değişiklikler yapılarak tasarlanmıştır. Yapılan bu çalışmalarda stator ve rotor arasındaki hava boşluğunda depolanan enerjiden daha fazla istifade edilebilmesi amaçlanmıştır. İlk AR motorlar indüksiyon motorlarından daha ağır ve daha geniş boyutlarda idiler. Ancak bu motorlar üzerinde yapılan çalışmalar ile hacimleri küçültülmüş ve dolayısıyla hafifletilmiştir. Günümüzde AR motorlar üzerinde en çok çalışma yapılan elektrik makinelerinin başında gelmektedir. Bunun en önemli sebebi ise diğer motorlara nazaran önemli avantajlara sahip olmalarıdır.

### **2.2.1 Anahtarlamalı Relüktans Motorlarının Temel Özellikleri**

Anahtarlamalı relüktans motorlar, hem stator hem de rotorlarında çıkıntılar bulduklarından çift çıkıntılı bir yapıya sahiptir. Bu sebeple çıkıklı ya da çift çıkıklı motorlar olarak bilinmektedirler.

Gerçekte bir çeşit senkron motor olan AR motorların rotorlarında herhangi bir mıknatıs, sargı yada kısa devre halkası bulunmayıp sadece masif demir veya saç paketi içermektedir. Stator da ise DC motorların sargılarına benzer şekilde basit yapılı ve ince telli sarımlardan oluşan yoğun sargılar bulunmaktadır. Adım motorundakine benzer şekilde AR motorlarda da 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 AR motorlarda, 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. AR motorlarda 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 (Krishnan 2001). 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 ya da birbirine eşit olabilir. Çoğunlukla stator çıkık sayısı rotor çıkık sayısından daha fazladır. Stator ve rotor çıkık sayıları ya da AR motorun tipi stator sayısı/ rotor sayısı şeklinde ifade edilmektedir. Örneğin 8/6, 8 stator çıkığına, 6 rotor çıkığına sahip bir AR motoru temsil ederken, 6/4, 6 stator çıkığına ve 4 rotor çıkığına sahip bir AR motoru temsil etmektedir. Karşılıklı olarak birbirine seri şekilde bağlantısı yapılmış olan 2 stator kutup sargısı AR motorun bir fazını oluşturmaktadır. AR motorların 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'de görüldüğü gibi AR motorun stator ve rotoru çıkık kutuplardan oluşmaktadır. 12/8 ifadesi ise sırası ile stator çıkık kutup sayısını ve rotor çıkık kutup sayısını ifade etmektedir (Lawrenson ve diğ. 1980).



Şekil 2. 1:12/8 AR motor yapısı

### 2.2.2 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.

AR motorlarda 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.

$$\mathfrak{R} = \frac{F}{\phi} \quad (2.1)$$

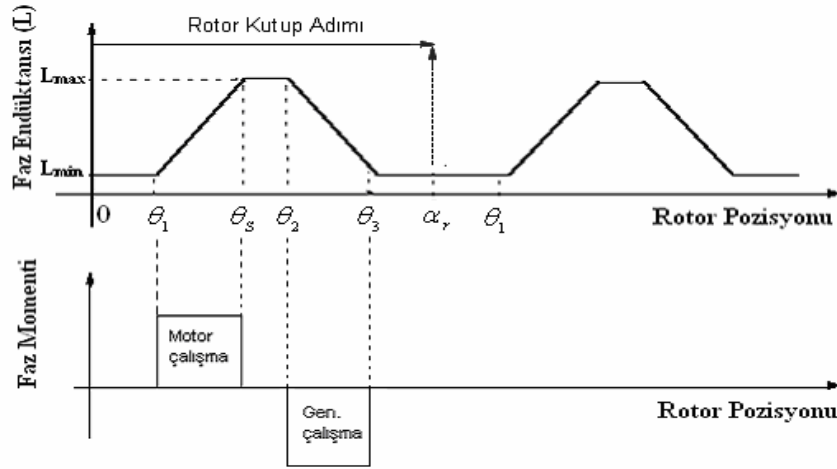
Eşitlik (2.1) ifadesinde yer alan  $\mathfrak{R}$  gösterimi relüktansı,  $F$  magneto motor kuvvetini,  $\phi$  akıyı belirtmektedir.

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2) ifadesinde L bir faza ilişkin endüktansı N bir faza ilişkin bobin tur sayısını  $\mathfrak{R}$  ise relüktans değerini ifade etmektedir.

### 2.2.3 Endüktans Değişimi

Anahtarlı relüktans motorunun kontrol imkânları ve kısıtlamaları için en can alıcı parametre olan tork eğrisinin, akım ve akının bir fonksiyonu olan rotor konumunun arasındaki bağıntının incelenmesi gerekmektedir. Şekil 2.2’de sabit bir akım için faz indüktansının rotor konumuna göre ideal değişimi verilmektedir. İndüktans eğrisindeki değişimi stator ve rotor kutup sayıları ile stator ve rotor kutup açıları belirlemektedir. Genellikle AR motorun dizaynında çakışık durum için akı kaybının en aza indirilmesi gözetilerek rotor kutup açısının, stator kutup açısından daha büyük olduğu için Şekil 2.2.’deki gösterimde de böyle olduğu varsayımı yapılmıştır. Şekil 2.2’de gösterilen çeşitli açı değerlerinin eşitlikleri aşağıda verilmektedir.



Şekil 2. 2: AR motorda rotor pozisyonu ile ideal faz indüktansı ve faz momentini değişim grafikleri

Bir faz için çizilmiş olan ideal indüktans değişim eğrisinde birbirinden farklı dört bölge vardır. Şekil 2.2’ye göre bu dört bölgenin motorda ne anlama geldiği aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır. Bu şekildeki  $L_{min}$  ve  $L_{max}$  sırasıyla minimum indüktans ve maksimum endüktansı göstermektedir.

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{2\pi}{N_r} - (\beta_s - \beta_r) \right] \quad (2.3)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s \quad (2.4)$$

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) \quad (2.5)$$

$$\theta_5 = \alpha_r + \theta_1 = \frac{2\pi}{N_r} \quad (2.6)$$

$$\alpha_r = \theta_3 + \beta_s \quad (2.7)$$

**•0 -  $\theta_1$  ve  $\theta_3 - \alpha_r$  aralıkları**

Rotorun 0 konumundan  $\theta_1$  konumuna kadar devam etmekte olan bu bölgede, stator ve rotor kutupları çakışmaz. Endüktans minimum değeri olan  $L_{min}$  değerinde sabit kalır. Aynı durum  $\theta_3 - \alpha_r$  aralığı için de geçerlidir.

**• $\theta_1 - \theta_s$  aralığı;**

Bu bölgede rotor ve stator kutup kenarları karşılaşır ve  $\theta_s$ 'e doğru rotorun hava aralığını dolayısıyla relüktansı azaltacak yönde dönmektedir bu dönme hareketinin sonucunda endüktans dönme hareketi ile birlikte lineer olarak artmaya başlar (+dL/d) ve  $\theta_s$  konumunda bu artış kutuplar tamamen çakışınca kadar devam eder. Bu noktada indüktans maksimum değeri olan  $L_{max}$  değerine ulaşır.

Moment değeri bu bölgede pozitifdir. AR motor, motor olarak çalıştırılmak isteniyorsa faz uyarımı bu bölgede yapılmalıdır.

**• $\theta_s - \theta_2$  aralığı;**

Bu aralıkta indüktans maksimum değerinde sabit kalır.  $\theta_s$ 'ten  $\theta_2$ 'ye kadar rotor ve stator kutup çıkıntılarının genişlik farkından oluşan çakışık konumdaki 'ölü bölge' olarak adlandırılır. Bu bölgeye ölü bölge denmesinin sebebi moment üretiminin sıfır olmasıdır. Moment üretimi olmamasının temel sebebi indüktans değişiminin olmamasıdır.



• $\theta_2 - \theta_3$  aralığı;

Rotorun  $\theta_2$  konumundan  $\theta_3$ 'e kadar hareket ettiği bu bölgede endüktans, minimum değerine kadar ( $-dL/d\theta$ ) bağıntısı ile lineer olarak azalır (Ünlü 2006). İndüktans değişiminin türevinin bu bölgede negatif değerli olduğuna dikkat edilmelidir. AR motor momentinin endüktansın türevi ile ilişkili olduğu da göz önüne alınır, motor bu bölgede uyarılacak olursa jeneratör olarak çalışacağı sonucuna varılır.

Şekil 2.2'deki indüktans değişiminin eğrisini matematiksel olarak ifade edersek (Ünlü 2006), i. faz için;

$$L(\theta)_i = L_i(\theta) \cdot \left[ \theta - \frac{\alpha_r}{q} \cdot (i - 1) \right] \quad (2.8)$$

Denklem 2.8: Bir fazın idealleştirilmiş indüktans değişimini rotor konumunun bir fazın stator kutup uçlarına göre fonksiyonu olarak göstermektedir. Her tur için indüktans değişim döngüsü rotor kutup çiftlerinin sayısı ile orantılıdır. Bu döngünün uzunluğu da rotor kutup adımına eşittir. Rotor kutup adımı Denklem 2.9'da olduğu gibi ifade edilir

$$\alpha_r = \frac{2\pi}{N_r} \text{ rad.} \quad (2.9)$$

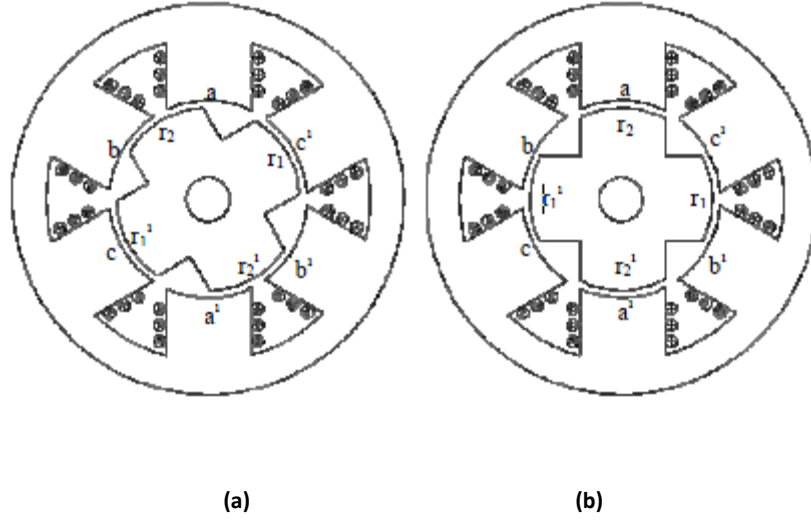
Rotor adım açısı ise mekanik olarak bir rotor kutup adımında her bir fazın ne kadar süre iletimde kalacağını belirlenmesini sağlar. Rotor adım açısı matematiksel olarak aşağıdaki ifade ile gösterilir (Liptak 2004).

$$\theta_s = \frac{2\pi(N_s - N_r)}{N_s N_r} \quad (2.10)$$

Denklem 2.10'u 12/8 bir kutuplu bir anahtarlamalı relüktans motora uygulayacak olursak; bir faz için indüktans değişiminin mekaniksel olarak 45 derecede bir tekrarlanacağını ve her bir fazın yine mekaniksel olarak 15 derece iletimde kalacağı sonucuna varırız.

## 2.2.4 Anahtarlamalı Relüktans Motorun Çalışma Prensibi

Anahtarlamalı relüktans motorlarında, uygun olan faza doğru gerilim verildiğinde, dönmekte olan rotor, manyetik devrenin relüktansını azaltacak yönde hareket etmek isteyecek ve relüktansı azaltacak yönde dönmeye başlayacaktır. Uygun bir anahtarlama devresi ile fazlar sıra ile uyarılmaya devam edildiğinde hareket süreklilik kazanmaktadır. Şekil 2.3'te gösterilen 3 fazlı 6 stator ve 4 rotor kutbundan oluşan (6/4) bir AR motorda, motorun temel çalışma mantığı aşağıdaki gibi incelenebilir.



Şekil 2. 3: AR motorun çalışması , (a) c fazı tam hizalı konumda, (b) a fazı tam hizalı konumda

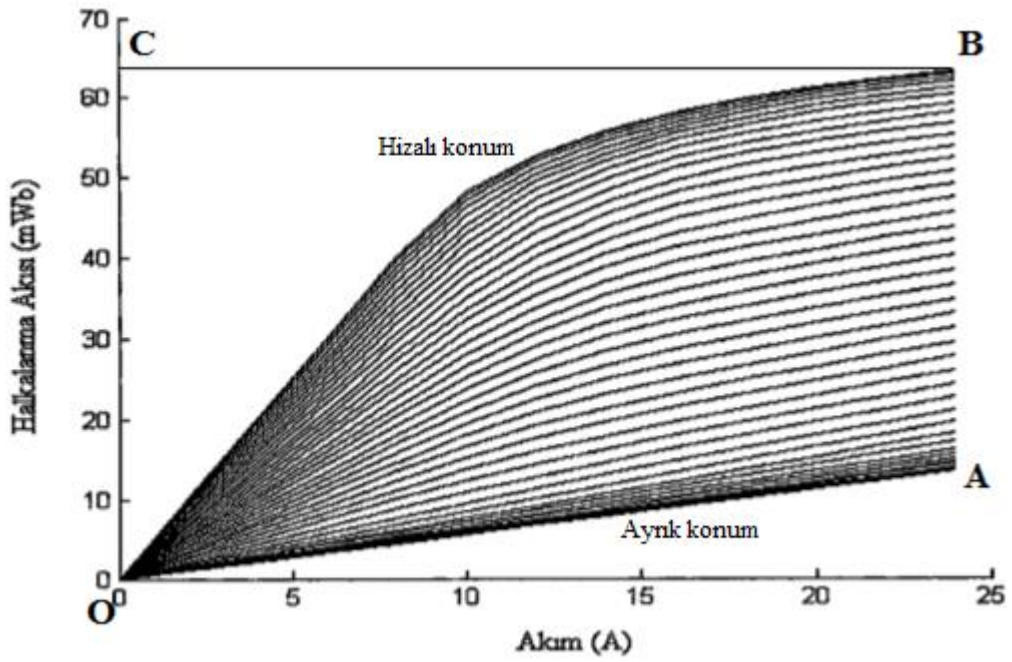
Anahtarlı relüktans motorda stator ve rotor kutup sayıları farklı olmak şartıyla birçok kombinasyon vardır bu farklı kombinasyonların temel amacı her zaman hareket etmeye elverişli olan rotor ve stator kutup geometrilerini elde etmektir. Rotorun belirlenen bir yönde hareket etmesi için belirlenen yönün tersinde uygun olan fazlara sırası ile gerilim verilmelidir. Motor dönüş yönünü değiştirmek için fazların uyarım yönünü değiştirecek değiştirmek yeterli olacaktır.

Şekil 2.3.(a)'daki  $r_1$  ve  $r_{1'}$  rotor kutupları ile  $c$  ve  $c'$  stator kutupları başlangıç anı olarak çakışık konumdadır. Bu durumda, şekilde gösterilen  $a$  fazına bir DC kaynaktan gerilim uygulandığında,  $a$  fazında oluşacak olan akı,  $a$  ve  $a'$  stator kutupları ile  $r_2$  ve  $r_{2'}$  rotor kutupları üzerinden geçmek isteyecektir. Bu durumda,  $a$  ve  $a'$  stator kutupları üzerlerinden geçen manyetik akıyı hava aralığını azaltarak karşı tarafa aktaracağından dolayı kendilerine en yakın olan rotor kutbunu kendine doğru çekmek ister ve rotor Şekil 2.3.(b)'de gösterilen konuma geçer. Bu esnada,  $a$  fazı artık çakışık duruma geldiği için, yani rotor uygun rotor kutuplarıyla tamamen karşılıklı hale geldiği için bu fazdaki akım kesilmekte ve sıradaki faz olan  $b$  fazı uyarılmaktadır.  $B$  fazının uyarılmasıyla bu sefer  $r_1$  ve  $r_{1'}$  rotor kutupları  $b$  ve  $b'$  kutuplarına doğru çekilir ve saat yönünde dönme hareketi sağlanmış olur. Benzer şekilde  $c$  faz sargısı uyarıldığında  $r_2$  ve  $r_{2'}$  rotor kutupları aynı hizaya geleceklerdir. Bu komütasyon adımlarından anlaşılacağı üzere rotora  $90^\circ$ 'lik bir dönme hareketi yaptırmak için sırasıyla üç fazın uyarılması gerekmektedir. Rotor dönme hareketinin ters yönde olması istenilirse Şekil 2.3.(a)'daki rotor konumuna göre  $b$ - $a$ - $c$  fazları sırasıyla uyarılması gerekmektedir (Ünlü 2006).

### 2.2.5 Tork

Stator faz sargılarına uygun sıralarda DC voltaj verilmesi ile anahtarlamalı relüktans motorun her iki yönde sabit ortalama tork üretmesi mümkün olmaktadır. Makine üzerindeki manyetik devre simetrik çıkıntılardan oluştuğundan ve devrenin mıknatıslanma etkisi göstermesi manyetik akının yönünden bağımsız olduğundan dolayı oluşan tork stator faz sargılarındaki akımın yönünden de bağımsız olarak üretilir (Bacarre ve Miller 1993). Anahtarlamalı relüktans motorda farklı sayılarda stator ve rotor sayısı kombinasyonları vardır. Bu kombinasyonlarda stator ve rotor kutup sayısı arttıkça önemli dezavantajlardan biri olan tork dalgalanmasının önüne geçmek mümkün olmakla birlikte yüksek rakamlı kombinasyonların kullanılması faz sayısının artması demek olacak ve fazladan anahtarlama elemanı maliyeti olarak karşımıza çıkacaktır. Anahtarlama elemanı fazla olan çevirici devreler daha karmaşık bir hal alacaktır (Ehsani ve diğ. 1998). Bir anahtarlamalı relüktans motorun davranışını izah etmek için rotor pozisyonu, akı ve akım eğrilerini kullanılabilir. Bu eğriler belirli aralıktaki rotor açısı için akımla birlikte manyetik akı hatlarının değişimini,

manyetik devrenin hava aralığının ve çelik laminasyon saçlardan oluşan kısımlarının manyetik geçirgenliğine bağlı olarak göstermektedir (Miller ve McGilp 1990). Stator ve rotor kutupları ayırık konumda iken eğri doğrusaldır ve manyetik devreyi oluşturan çelik kısımlar üzerinde doyum yoktur. Stator ve rotor kutupları hizalı konumda olduğu durumda doyumdan dolayı eğri doğrusal değildir (Stephenson ve El-Khazender 1989). Şekil 2.4’de rotor ve stator kutuplarının hizalı ve ayırık konumları için akı ve akım eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 2. 4: Akı ve halkalanma akısı arasındaki ilişki

Şekil 2.4’deki grafik başlangıç anında stator ve rotor kutupları ayırık konumda iken ani olarak sabit bir akım sağlanarak rotor ve stator kutupları hizalı konuma gelinceye kadar uygulanan akım sabit tutularak elde edilebilmektedir (Akçayol 2001). Rotor kutupları sabit akımın uygulanmış olduğu stator kutupları ile hizalı hale geldiği anda tekrar ani olarak kesilmektedir. Şekil 2.4’de OABO alanı elektromanyetik enerji (W) temsil etmektedir. Bu enerji her bir çalışma periyodu boyunca mekanik işe dönüştürülmektedir. Şekil 2.4’dekidiğer enerji dilimini oluşturmakta olan OBCO alanı ise depo edilen manyetik enerjiye ( $W_f$ ) eşittir. Motorun sargılarında depo edilen bu enerji tekrar motoru beslemekte olan kaynağa çevirici devre yardımıyla aktarılabilmektedir. Motorun ayırık pozisyondan hizalı pozisyona geçiş yaparken besleme kaynağından çektiği elektrik enerjisi ( $W_e$ ) OABCO alanı ile temsil edilmektedir. Motorun besleme kaynağından çekilen bu enerji elektromanyetik enerji

ile motorun faz sargısında depo edilmiş olan manyetik enerjinin toplamına eşittir. Motorun elektromekaniksel enerji çevrimi, depo edilen enerji ve elektromanyetik enerji yardımı ile  $W/(W+W_f)$  şeklinde ifade edilmektedir. Enerji çevrim ifadesi genel bir ifade olup verilen giriş enerjisine göre ne kadar enerji çevrimi sağlandığını göstermektedir (Buja ve Valla 1991).

AR motor tarafından oluşturulan ani tork, rotorun bir pozisyondan diğer pozisyona hareket ettiği zamanki koenerjinin değişim oranıyla orantılıdır (Akçayol 2001). Ve Eşitlik 2.11 ile ifade edilir;

$$T_e = \left[ \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial \theta} \right]_{i=\text{sabit}} \quad (2.11)$$

$T_e$ : Tork

$W$ : Koenerji

$\theta$ : Rotor konum açısı

$i$ : faz sargı akımı

Koenerji rotor konum bilgisinin ve faz akımının bir fonksiyonudur ve akım ile açığa bağlı olan integrali alınarak aşağıdaki ifade yardımı ile bulunabilir;

$$W(\theta, i) = \int_0^i \phi(\theta, i). di \quad (2.12)$$

$\phi$  : Manyetik akı

Kısmi türev alınma esnasında belirtilen değişkeni sabit tutmak gerekmektedir. Herhangi bir andaki rotor konumu için manyetik akı ile akım arasındaki bağıntı, lineer olmayan manyetik değişim ihmal edildiğinde lineer olarak değişmekte ve eğimi alındığında indüktansı vermektedir. Sonuç olarak,

$$\phi = L. i \quad (2.13)$$

olmaktadır. Tork için eşdeğer eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$T_e = -\left[\frac{\partial W_f(\theta, i)}{\partial \theta}\right]_{\phi=\text{sabit}} \quad (2.14)$$

Bu ifade de,

$$W_f(\theta, i) = -\int_0^{\phi} i \cdot d\phi \quad (2.15)$$

olduğundan manyetik sistemde depo edilen enerji aşağıdaki gibi gösterilir,

$$W_f = \frac{1}{2} L \cdot i^2 \text{ (joule)} \quad (2.16)$$

ve neticede tork eşitliği yeniden yazılacak olursa,

$$T_e(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.17)$$

(2.17) eşitliği elde edilir.

L: Herhangi bir rotor konumu anındaki faz indüktansı

Bu durum sadece manyetik doyumun ihmal edildiği durumlarda geçerlidir. Tork değerini belirleyebilmek için rotor konumuna göre endüktans değişiminin bilinmesi gerekmektedir.

Denklem 2.17’de indüktans değişimi ideal olarak alınmıştır. Bu sebeple tork lineer indüktansla lineer olarak değişim göstermektedir. Ancak pratikte, AR motorların indüktans değişimi lineer değildir ve bunun sonucu olarak tork titreşimli olarak elde edilir.

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 uygulanacağını tespit edilmesi ve dolayısıyla da bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir.

Bu nedenle ilgili rotor pozisyonu bilgisinin elde edilebilmesi için optik ya da alan etkili sensörlerin kullanımı gerekmektedir.

AR 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 ulaşacaktır. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi tam hizalı konumda elektromanyetik alan çizgileri tam olarak karşı karşıyadır ve dolayısıyla indüktans da bu hizalı konum boyunca maksimum değerinde sabit kalır. Tork grafiğinden de anlaşılacağı gibi indüktansta değişimin olmamasına bağlı olarak, hizalanmış konumda herhangi bir tork üretilmez.

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, AR motor 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.
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.

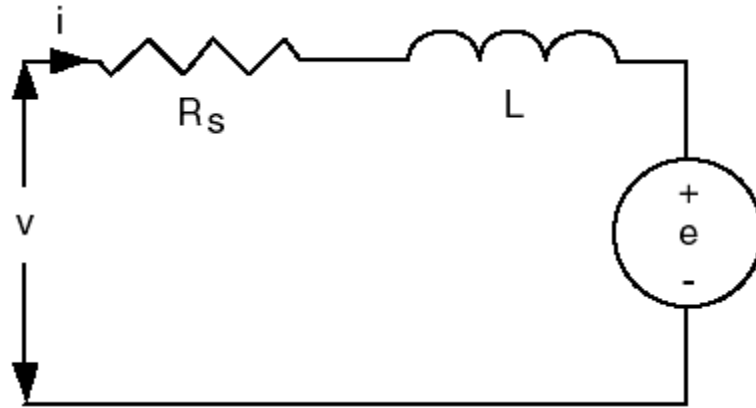
8. Makine, çalışması için kontrol devrelerine ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla, sabit hızlı uygulamalarda motor sürücü indüksiyon ve senkron motorlara kıyasla pahalıdır.

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

10. AR motorda makine faz sarımları arasında çok küçük bir ortak indüktans vardır ve neredeyse tüm pratik uygulamalarda bu etki ihmal edilmektedir. Ortak kuplaj etkisi olmaması sebebiyle, 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 (Lawrenson ve diğ. 1980).

### 2.2.6 AR Motor Eşdeğer Devre

AR motorların çalışması ilkesi değişken relüktans kuvvetine dayanmakta ve dönel hareketli, çıkık kutup yapılı rotorun, bulunduğu manyetik devre içerisindeki akımın, en kolay yol bulabileceği en küçük relüktans konumuna kadar kuvvet uygulayarak çekilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Şekil 2.5’de AR motorun tek fazına ait eşdeğer devre gösterilmiştir.



Şekil 2. 5: AR motorun bir fazına ait eşdeğer elektriksel devre

$R_s$ : Bir fazın stator sargı direnci

$L$ : Bir fazın indüktans değeri



Bu eşdeğer devrede uygulanan DC gerilimin değeri eşitlik (2.18) ile verilebilir.

$$V = R_s \cdot i + \frac{d\phi(\theta, i)}{dt} \quad (2.18)$$

ve

$$\phi = L(\theta, i) \cdot i \quad (2.19)$$

şeklinde gösterilebilir. Giriş gücü ise eşitlik (2.20) ile gösterilebilir.

$$P_i = R_s \cdot i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) \cdot i \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.20)$$

(2.20) eşitliğinde

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L(\theta, i) \cdot i^2 \right) = L(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.21)$$

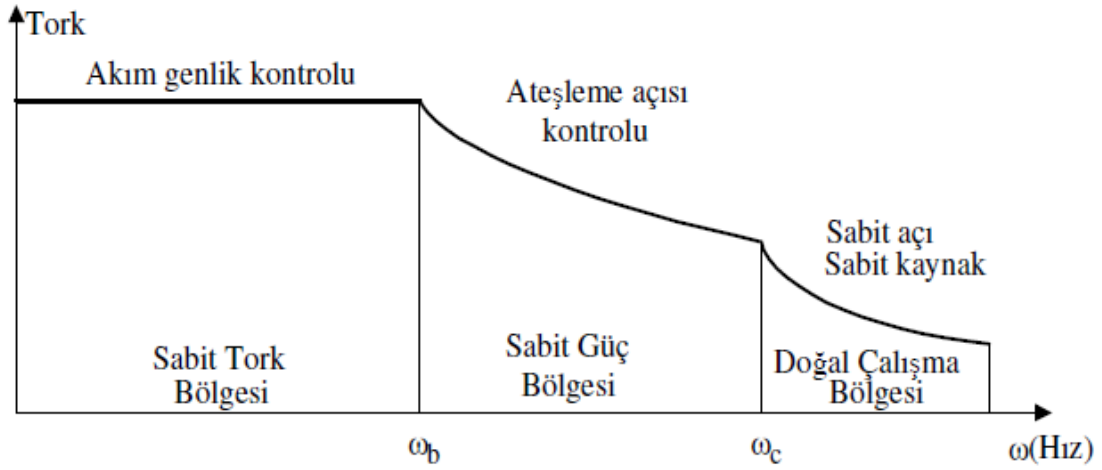
(2.21) eşitliği yerine yazılabilir ve sonuç olarak giriş gücü,

$$P_i = R_s \cdot i^2 + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L(\theta, i) \cdot i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.22)$$

Sonuç olarak giriş gücü eşitlik (2.22) ile ifade edilebilir.

### 2.2.7 AR Motorda Tork-Hız Eğrisi

AR motorlarda tork-hız eğrileri üretici firma tarafından belirlenmemiştir. Motora uygulanan kontrol şekline göre tork-hız eğrileri oldukça geniş bir banda sahiptir. Bir AR motor için çalışma şartları Şekil 2.6'da gösterildiği gibi motor hızına göre sabit tork bölgesi, sabit güç bölgesi ve doğal çalışma bölgesi olarak üç farklı bölgeye ayrılmaktadır (Güvenç 2005).



Şekil 2. 6:ARM'nin tork-hız eğrisi

Sabit tork bölgesi, taban hız  $\omega_b$  'den daha küçük hız değerleri için, sürücünün tetikleme açısı sabit bir değerde tutulmakta ve böylece motor torku, en az dalgalanma ile en büyük değere çıkarılabilmektedir. Motor faz akımları ayarlanarak motor ortalama torku kontrol edilmektedir. Motor stator fazları sıralı bir şekilde enerjilendirilmektedir ve böylelikle bir anda sadece bir stator fazı aktif olmaktadır. Tork kontrollü çalışmalarda, aktif olan stator faz sargılarındaki akım bir akım regülatörü tarafından kontrol edilmektedir.

Sabit güç bölgesinde, taban hız  $\omega_b$  'nin üzerindeki hızlar için akım regülatörü kullanmak etkili olmamaktadır, bunun sebebi; bu çalışma bölgesinde motorun ürettiği zıt emk yükselmekte ve zorlama voltajı sabit bir akım sağlamak için yeterli olmamaktadır. Sürücü ateşleme açısı, hızın bir fonksiyonu olarak artırılarak, motor hızı artırılabilir ve böylece  $T \cdot \omega$  değeri sabit değere getirilebilmektedir.

Doğal çalışma bölgesi, motor hızı  $\omega_c$  hızından daha büyük bir değerde olduğu zaman, sürücü tetikleme açısı en büyük değerine getirilebilmektedir. AR motor böylelikle doğal tork-hız eğrisi ile çalışabilmektedir. Yani  $T \cdot \omega^2$  değeri seri DA motorlardaki gibi yaklaşık olarak sabit olmaktadır (Miller 2001).

### **3. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI**

Bir anahtarlamalı relüktans motorda istenilen özellikler tork ve hız gibi ihtiyaçlardan ve sıcaklık artışı, kaynak gerilimi ve boyutlar gibi kısıtlamalardan meydana gelmektedir. Bir tasarım, motoru ve sürücüyü tanımlayan parametrelerden ibarettir ve malzemelerin istenilen özelliklerini ve imalat işlemlerini içermektedir. Motor için istenilen özellikler bazen muhafazanın dış boyutlarını içerir; eğer muhafazanın dış boyutları istenilmiyorsa tasarımdaki ilk işlerden biri boyutun bir başlangıç tahmininin yapılmasıdır. Muhafaza boyutları bilindikten sonra dahili boyutların tahminleri muhafaza boyutlarının bir oranı ile başlatılabilir; elbette ki bu tahmin yapılırken standart orantılardan başlanması tercih edilmelidir.

Başlangıç boyutlandırmasını, tasarım parametrelerinde istenilmeyen kısımlar atılarak eleme işlemi takip etmelidir; bu etapta tasarımcı, tasarımının performans ve kalitesini aşamalı olarak geliştirir. Eleme işlemi uygun bir bilgisayar işlemi, prototiplerden test verisi ve hepsinin üzerinde deneyimlerle kolaylaştırılır. Dikkate değer tasarım gelişimleri bu yolla birikmeye devam etmektedir; hatta DC motorlar gibi olgunlaşmış ürünlerde bile bu gelişim görülmektedir (Gürdal 2001).

#### **3.1 Tasarımda İstenilen Özellikler**

Bir motordan istenilen özelliklerde en temel gereksinimler tork, hız, yük faktörü ve besleme gerilimidir. Motorun her iki yönde döndürülüp döndürülmeme gerekliliği ve frenleme veya jeneratör modunun gerekli olup olmadığının belirtilmesi temel öğelerdir. Uyulması gereken standartlar veya yönetmeliklerin yanında ortam sıcaklığı, kaynak gerilimindeki değişimler ve özel faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerekir.

AR motor faz sayısı, stator ve rotor kutup sayıları motora ait parametrelerin en önemlilerindedir. Stator ve rotor kutup sayıları arasındaki oran tasarımcıya çok geniş bir seçim aralığı sunmaktadır. 2, 3 ve 4 fazlı AR motorlar en çok kullanılan motorlar olup, iki fazlı AR motorlarda kalkış problemi yaşanmaktadır. Dolayısıyla bu tür AR

motorlarda, motorun herhangi bir konumdan kalkış yapmasını sağlayacak şekilde rotor kutup geometrisinin seçilmesi gerekmektedir. Faz sayılarının büyük değerlikli olduğu motorlarda tork dalgalanması azalmaktadır. Bununla birlikte bu motorların maliyeti artmaktadır (Gizlier 2001).

Tez kapsamında tasarımı yapılan motorda aşağıdaki başlıklarda verilecek olan formüller doğrultusunda hesap yapılmıştır ve Maxwell 2D ile yapılan analizler sonucu değerlendirmeler yapılarak optimizasyon çalışmaları ile (Gürdal 2001)'de belirtilen sınırlar dahilinde bazı değerler verilen aralıklar içerisinde tasarımı daha iyi hale getirme doğrultusunda optimize edilmiştir.

### 3.2 Rotorun Ölçülendirilmesi

Elektrik motorlarının tasarım aşaması geleneksel olarak çıkış eşitliği ile başlar. Tork değeri kullanılarak bu eşitlik en sade biçimiyle aşağıda eşitlik (3.1)'de olduğu yazılabilir (Gürdal 2001).

$$T = C_0 \cdot D_r^2 \cdot L_{stk} \quad (3.1)$$

Burada  $C_0$ ; elektrik ve manyetik yüklerin çarpımıdır ve tipik değerleri aşağıda Tablo 3.1'de gösterilmiştir (Gürdal 2001).

Tablo 3.1:TRV, $\sigma$  ve  $C_0$ 'ın tipik değerleri  $\sigma$

	$\sigma$		$C_0$		TRV
	kN/m <sup>2</sup>	Ibf/in <sup>2</sup>	kNm/m <sup>3</sup>	Ibf-in/in <sup>3</sup>	kNm/m <sup>3</sup>
Tamamen kapalı küçük motorlar	0,7-3,5	0,1-0,5	1-5,5	0,15-0,8	2,5-7
Tam-HP endüstriyel motorlar	3,5-14	0,5-2	5,5-20,7	0,8-3	7-30
Yüksek performanslı servo motorlar	7-21	1-3	10,3-34,5	1,5-5	15-50
Hava taşıtı makineleri	14-35	2-5	20,7-51,7	3-7,5	30-75
Büyük sıvı soğutmalı makineler	70-105	10-15	103-1379	15-200	100-205

Aynı maksatla bazen kullanılan diğer iki katsayı birim rotor hacmi başına tork ( $TRV$ ) ve hava aralığı kesme stresidir ( $\sigma$ ). Bunlar  $C_0$  ile orantılıdır ve aralarındaki ilişkiler aşağıdaki eşitlik (3.2)'deki gibidir (Gürdal 2001).

$$TRV = \frac{T}{\frac{\pi}{4} \cdot D_r^2 \cdot L_{stk}} \quad (3.2)$$

Bu ifadeden dolayı  $TRV = 4C_0/\pi$ 'dir. Hava aralığı kesme stresi ( $\sigma$ ) süpürülen rotor yüzey alanının birimi başına tanjant kuvvettir (tork üreten tanjant kuvveti) (Gürdal 2001):

$$TRV = 2\sigma \quad (3.3)$$

Bu ifadeden dolayı;

$$C_0 = \frac{\pi}{2} \cdot \sigma = \frac{\pi}{4} TRV \quad (3.4)$$

yazılır. Bu kısımda tercih edilen katsayı  $\sigma$  ve birimi  $N.m/m^2$ 'dir. Eğer  $D_r$  ve  $L_{stk}$  m biriminde ise Tork  $N.m$  olacaktır.

### 3.3 Hava Aralığı

AR motor dengeli faz akımlarının sürdürülmesi ve akustik gürültünün minimum seviyeye indirilmesi için düzgün bir hava aralığı ve iyi eş merkezliliğe ihtiyaç duyar. Özel torkun en yüksek değerine çıkarılması ve sürücünün volt-ampere ihtiyacının minimum seviyeye indirilmesi hava aralığının küçük olması gereklidir. Statorun çerçeveye tam olarak uydurulması için statorun dış çapının makine ile işlenmiş olması gerekebilir ve genelde stator paketi bundan önce kaynaklanmış olacaktır. Bu aşamalar ile hava aralığı 0.1 mm kadar küçük yapılabilir. Bu derece küçük değerler sadece özel durumlarda kullanılmasına rağmen step motorlarında ise düzenli olarak kullanılmaktadır.

Yukarıdaki bilgiler ışığında ve hava aralığının manyetik akının verimini olumsuz yönde etkilediğini göz önünde bulundurarak hava aralığı ( $g$ ) değerini aşağıdaki eşitlikten hesaplayabiliriz (Gürdal 2001).

$$g = 0.005D_r \quad (3.5)$$

### 3.4 Stator ve Rotor Çıkık Kutuplarının Kalınlıklarının Hesaplanması

Stator ve rotor kutup yayları hesaplanırken akı yolunun daha verimli olmasını sağlayan  $\beta_r \geq \beta_s$  açı koşulunun dikkate alınması büyük önem teşkil etmektedir. Genişlikler dikkate alınarak rotor kutup genişliği( $t_r$ ), stator kutup genişliği( $t_s$ )'yi  $g$  ve  $2g$  arasında sınırlı kalacak bir değer kadar geçmelidir. Bu durumun sebebi statordan rotora aktarılacak olan akıda oluşacak kaçak akının en az seviyeye çekilmek istenmesidir.

En düşük  $(\beta_r, \beta_s) \geq \epsilon$ , ateşleme açısı veya adım açısı şartı sağlanmalıdır. Bu şart saçak akısının olmadığı ideal durumda bütün rotor pozisyonlarında torkun üretilebileceğini garanti altına alır (kutup ve faz sayılarının geçerli bir kombinasyonda olması şartıyla). Bu durum ideal doğrusal teoriden kaynaklanır; burada bir faz, hangisi daha küçükse stator veya rotor kutup yayına eşit bir açı üzerinde tork üretebilir. Pratikte kutup yayları adım açısından daha az yapılabilir fakat bunun ne kadar olduğu, etkin örtüşme oranına bağlıdır. Dört fazlı motorlar etkin örtüşme oranının daha yüksek değerlerine sahip olmaya eğilimlidir ve bu durumdan dolayı kutuplar tork iniş çıkışları oluşma durumu gözükmezsiniz adım açısından daha dar olacak şekilde tasarlanabilir; bununla beraber dar kutuplar maksimuma getirilmiş indüktansı ve indüktans oranını azaltır (Gürdal 2001).

$\beta_s < 2\pi/N_r - \beta_r$ . Bu şart hizalı duruma gelinmemiş bir konumda rotor ve stator kutupları arasında bir açıklık olmasını garanti altına alır. Hizalı konuma gelinmemiş konumda stator ve rotor kutup köşeleri arasındaki açısal açıklık  $\pi/N_r - \beta_r$ 'dir ve bunun yeteri kadar düşük olması, hizalı konuma gelinmemiş indüktansın oluşması durumunun garantiye alınması için bir kaç derece olması gerekir (Gürdal 2001).

Kutup yaylarının açıları kullanacağımız motor geometrisine göre seçildikten sonra aşağıdaki ifadelerden sırasıyla stator kutup genişliği ve rotor kutup genişliği olan  $t_s$  ve  $t_r$  hesaplanabilir.

$$t_s = 2(r_1 + g) \cdot \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (3.6)$$

$$t_r = 2r_1 \sin\frac{\beta_r}{2} \quad (3.7)$$

$$r_1 = \frac{D_r}{2} \quad (3.8)$$

### 3.5 Rotor Oyuk Derinliğinin Hesaplanması

Rotor oyuk derinliği doğruluya gelmemiş düşük indüktansın elde edilebilmesi için hava aralığının en az 20-30 katı olmalıdır. Bunun yanında rotor oyuğunun çok derin yapılmasının anlamı yoktur çünkü doğrultuya gelmemiş pozisyonda stator kutbundaki akı rotor kutuplarının kenarlarında saçaklanma eğilimi gösterir (Gürdal 2001). Eğer açılal açıklık çok küçükse rotor oyuklarının derinleştirilmesi azaltılmış doğrultuya gelmemiş indüktansa bir yararı yoktur. Rotor oyuk derinliği rotor boyunduruğunun doyum olmaksızın tepe akıyı taşıyacak şekilde yeteri kadar kalın yapılma ihtiyacı ile ve mil çapının olabildiği kadar büyük yapılma gereği ile de sınırlanır.

Rotor oyuk derinliği aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir:

$$d_r = r_1 - r_0 \quad (3.9)$$

### 3.6 Rotor Boyunduruk Kalınlığı

Rotor boyunduruk kalınlığı ( $y_r$ ) doyum olmaksızın tepe rotor akısının tepe rotor akısını taşıyabilecek yeterliliğe sahip olmalıdır. 2 kutuplu akı paterni ile AR motorda ana akı rotor kutbunu terk ederken ve rotor boyunduruğuna girerken iki eşit parçaya ayrılır. Boyunduruk kısımlarının birbiri ile örtüşebilen farklı fazlar arasında paylaşıldığı gerçeğinden dolayı bir toleransın verilmesi için boyunduruk kalınlığı en azından  $t_s/2$ 'ye veya tercih olarak bu değer %20-40 daha fazlası da seçilebilir.

$$y_r = \frac{2}{3}t_r \quad (3.12)$$

### 3.7 Rotor Mili apının Hesaplanması

Büyük mil çapı rotorun yanal bükölmezliğinin artması için istenilmektedir. Akustik gürültünün azaltılması ve ilk kritik üretilmesine büyük ölçüde yardımcı olur (Gürdal 2001).

$$D_{sh} = D_r - 2(d_r + y_r) \quad (3.15)$$

### 3.8 Stator Boyunduruk Kalınlığının Hesaplanması

Stator boyunduruk kalınlığı( $y_s$ ) rotorun boyunduruk kalınlığı( $y_r$ ) ile aynı sınırlamalar dahilinde hesaplanır. Eğer  $t_s$  kutup genişliği ise bu durumda  $y_s > t_s/2$  ve tercih olarak boyunduruk kısımlarının birbiri ile örtüşebilen farklı fazlar arasında paylaşıldığı esasından dolayı bir toleransın verilmesi için bu değerin %20-40 daha fazlası olmalıdır. Statorun boyunduruk kısımları rotorun boyunduruk kısımlarından daha uzundur, bundan dolayı mümkünse ekstra boyunduruk kalınlığının verilmesi önemlidir. Aşağıdaki ifadeyi kullanarak stator boyunduruk kalınlığını hesaplayabiliriz.

$$y_s = \frac{2}{3}t_s \quad (3.16)$$

### 3.9 Stator Oyuk Derinliğinin Hesaplanması

Stator oyuk derinliğinin değeri sargı alanının maksimuma çıkartılması ve bakır kayıplarını minimuma indirebilecek yeterli bakırın kolayca yerleştirilmesi için olabildiği kadar büyük olmalıdır. Bu özellikle, tamamen kapalı makinelerde çok önemlidir. Aşağıdaki ifade stator oyuk derinliğini göstermektedir.

$$d_s = \frac{1}{2}(D_s - D_r - 2(g + y_s)) \quad (3.17)$$



## 4. AR MOTOR İÇİN SÜRÜCÜ DEVRELERİ

AR motor için sürücü devreleri başlığı altında; anahtarlamalı relüktans motor için kullanılan sürücü devrelerinden ve bu sürücü devrelerinin farklılıklarından bahsedilecektir. Her sürücü devresi diğer sürücü devreleri ile karşılaştırıldığında, maliyetine karşın sağladığı kontrol esnekliği bakımından farklılıklar göstermektedir. Esasında bütün AR motor sürücü devreleri, akımın genliğinin yanında dalga şeklini de oluşturarak tork ve hız ihtiyaçlarını sağlamak için fazlara seri olarak bağlanmış yarı iletken anahtarlara gereksinim duymaktadır. Aynı zamanda faz değişimleri sırasında, bir önceki pozisyonda enerjilendirilmiş olan faz sargılarında depolanan enerjinin hızlı bir şekilde besleme kaynağına aktarılması gerekmektedir bu sebepten ötürü sürücü devrelerinde hızlı geri dönüşüm kullanılır. Aksi takdirde bir önceki faz sargısında kalmış olan bu depolanan enerji motorda negatif tork oluşmasına ve ortalama torkun düşmesine sebebiyet vermektedir. Bir faz sargısına enerji sağlamakta olan mosfetler kesime girdiği anda depolanan bu enerjinin hızlı bir şekilde besleme kaynağına aktarması motorun verimi içinde büyük öneme sahiptir.

Anahtarlamalı relüktans motorlarda üretilen moment, faz sargıları üzerinden geçen akımın yönünden bağımsız olarak üretildiğinden AR motor sürücü devreleri diğer motorlar için kullanılan sürücülere göre bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlardan bazıları aşağıdaki gibi gösterilebilir (Yadlapalli 1999):

- Motor faz sargılarının birbirinden bağımsız olması nedeniyle herhangi bir fazın sargısının bir arıza nedeni ile devre dışı kalması durumunda, diğer fazların bu durumdan bağımsız olarak çalışmalarına devam edebilmesi.
- Her bir faz için sadece tek bir yarı iletken anahtarlama elemanı kullanılması yeterli olabilen sürücü devre şekillerinin var olması.
- Güç anahtarlama elemanlarının sayılarının düşürülebilmesi vasıtasıyla ihtiyaç duyulan lojik devre ve bunlara ait güç kaynakları ile kapı sürücülerinin de sayısı azalacak ve neticede sürücü boyutu ve maliyeti azalacaktır.

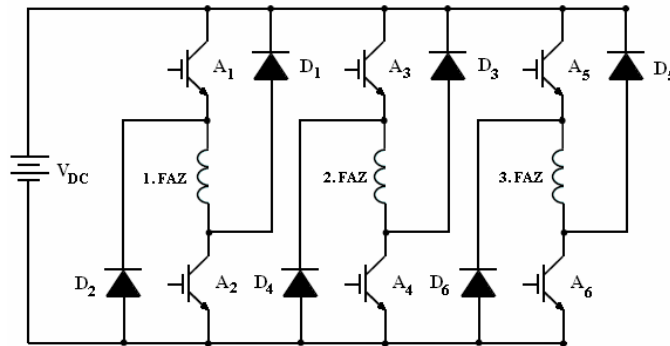
▪ ARM sürücü devresindeki anahtarlama elemanlarının sıfır kısa devre akımı ve sıfır açık devre voltajına sahip olması ihtimali sebebiyle herhangi bir hata karşısında aşırı voltaj ve ısınma problemlerine sahip olmaması.

#### 4.1 AR Motor Çevirici Devre Çeşitleri

AR motorlarda üretilen momentin akımın yönüne değil sadece genliğine bağlı olduğuna yukarıdaki başlıkta da değinilmiştir. AR motorların sahip olduğu bu özellikten dolayı motorun sürücü devresinde kullanılacak yarı iletken anahtarlama elemanı sayısı diğer sürücülere kıyasla 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 (Mutlu 2006). Dolayısıyla akım darbelerinin, indüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağını tespit edilmesi ve bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir.

##### 4.1.1 2n Tipi Klasik Köprü Çevirici Devresi

Şekil 4.1’de 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 maruz kalmaktadır. Bu özelliklerinin yanında bu çevirici topolojisi, minimum pasif eleman kullanarak maksimum kontrol esnekliği ve verim sağlamaktadır.

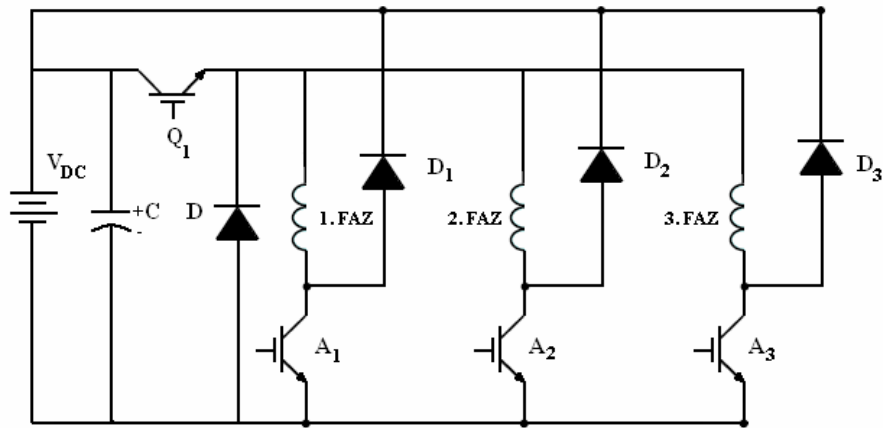


Şekil 4. 1: 2n tipi AR Motor çevirici devresi

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. AR motor sürücülerinde ise sargılar güç anahtarları ile seri bağlı olduğundan kısa devre ihtimali ortadan kalkmaktadır. Sargıların alt ve üst kısımlarındaki güç anahtarları her iletim periyodu ya da tork vuruşu başlangıcında birlikte çalışmakta ve komütasyon noktasında birlikte kesime gitmektedir. Mantıksal olarak tasarımda, bir anahtar komütasyon diğeri 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 (Polat 2010).

#### 4.1.2 n+1 Tipi AR Motor Çevirici Devresi

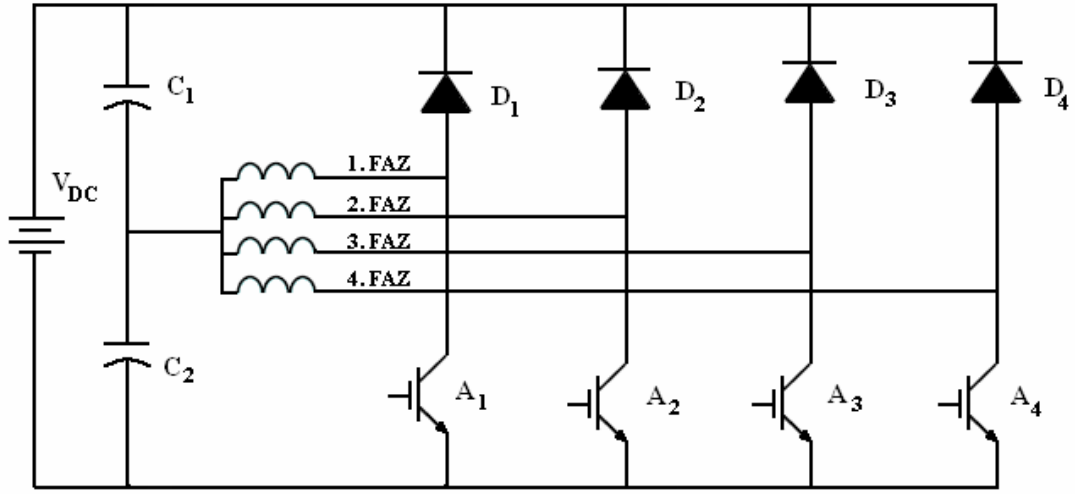
Düşük hızlı çalışmalarda kullanılan sürücülerde bütün hız aralığı boyunca darbe genişlik modülasyonu (PWM) kontrolü kullanılmaktadır. Bu durumda AR motor sürücü devresindeki anahtarlama elemanlarının sayısının azaltılabildiği mümkün olmaktadır. Böylece bütün fazlar için kısıyıcı olarak ortak tek güç anahtarlama elemanı kullanmak mümkün olmaktadır. N fazlı bir motor için faz sayısının bir fazı kadar anahtarlama elemanı ve hızlı geri dönüşüm diyotu gerektiren n+1 tipi sürücü devresi olarak adlandırılan sürücü devresi Şekil 4.2’ de gösterilmiştir (Polat 2010).



Şekil 4. 2: n+1 tipi sürücü devresi

### 4.1.3 Split Tip DC Çevirici Devresi

Tek kutuplu sürücü devresi kullanmanın bütün avantajlarından faydalanmak için anahtarlama elemanı sayısını, motor faz sayısına indirmeyi amaçlayan farklı devre yapıları da geliştirilmiştir. Ancak anahtarlama elemanı sayısı motor faz sayısına indirildiğinde fazlardan pasif elemanlar gerekliliği oluşmakta ya da kontrol sınırlamalarından dolayı bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.3'te Tasc Drives Ltd. tarafından GTO (Gate Turn-Off) Thyristor elemanları kullanılarak gerçekleştirilen split-link devresi gösterilmektedir (Sefa 1997).

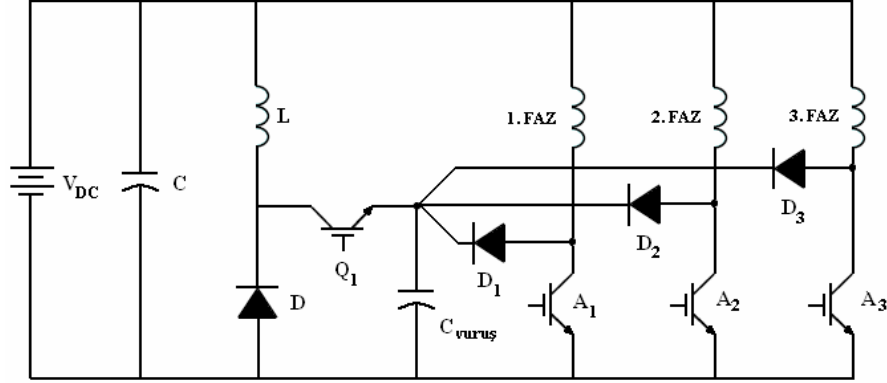


Şekil 4. 3: Split DC çevirici devresi

### 4.1.4 C Vuruş Tipi AR Motor Çevirici Devresi

Şekil 4.4'de C-vuruşlu sürücü devresinde, depolanmış enerjiyi boşaltma kapasitörü C' den kaynağa azaltıcı kıyıcı devresi ile iletecek eleman dâhil eleman sayısı  $n+1$  olmaktadır. Ortalama kapasitör gerilimi, komutasyondan sonra hızlı boşalmaya izin vermek için kaynak geriliminden daha yüksek tutulmaktadır. Bu devrenin verimi yüksek olmasına karşın, kontrolünün sağlanması karmaşıktır ve ilave elemanlar gerektirir. Enerji deşarj devresindeki bir kontrol hatası boşalma kapasitöründe hızlı bir şarj oluşumuna sebebiyet vermekte ve eğer koruyucu tedbirler alınmaz ise bütün sürücü devre elemanları yüksek gerilime maruz kalıp zarar görebilmektedir. Sürücü düzenekleri içerisinde en ekonomik olan devre söndürme dirençli çevirici devresidir. Bu devre düşük performans ve maliyet istenilen

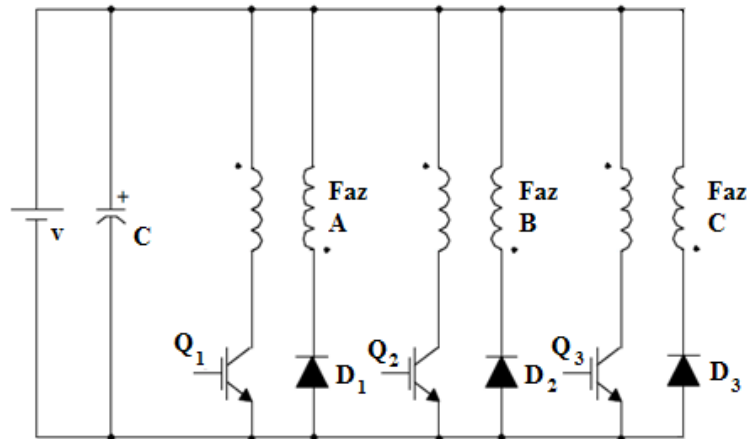
uygulamalar için iyi bir seçenek olup kontrol edilmesi de oldukça basit sayılabilir. Bu çeviricide her bir faz için bir diyot ve bir anahtar yeterlidir. Depolanmış enerji serbest dönüşüm esnasında R direnci üzerinde harcanmaktadır.



Şekil 4. 4: C-vuruş tipi AR motor sürücü devresi

#### 4.1.5 Çift Tel (Bifilar) Sargılı AR Motor Sürücü Devresi

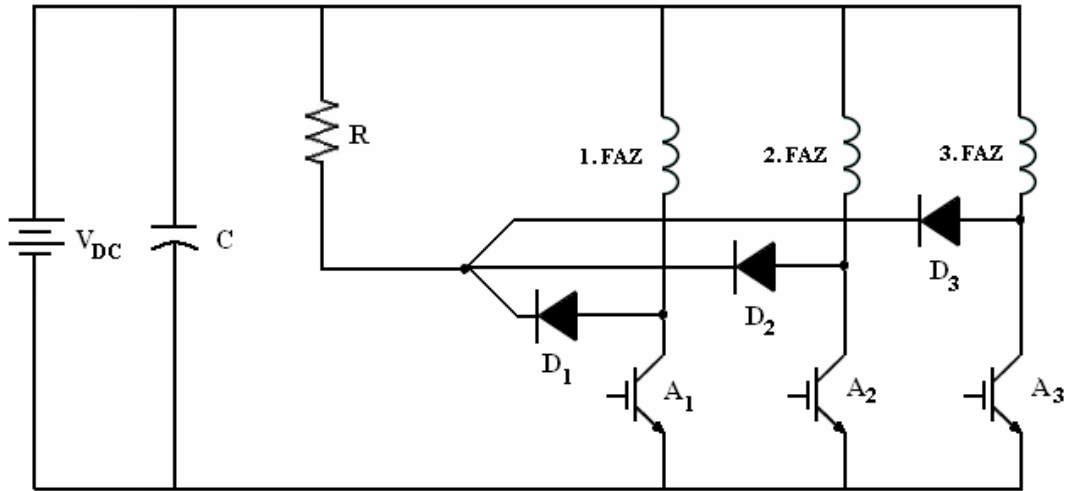
Şekil 4.5'deki çift tel sargılı AR motor sürücü devreleri, yine faz başına tek bir anahtarlama elemanı kullanmakta olup sadece tek yönlü çalışmayı gerçekleştirebilmektedir. Sargılar arasındaki manyetik bağlantı nedeni ile oluşan gerilim yükselmeleri, kaynak geriliminin 2 katına veya daha da yüksek olabilmeye değerlere çıkabilmektedir. Bifilar sargı, sargıdaki bağlantı sayısını iki kata çıkarmakta ve kullanılan sargıdan dolayı bakır kayıpları çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Ayrıca, sargılar arasında eşit olmayan etkileşimden kaynaklanan gerilim sıçramaları sebebiyle problemler ortaya çıkabilmektedir (Polat 2010).



Şekil 4. 5: Çift tel (Bifilar) sargılı AR motor sürücü devresi

#### 4.1.6 Söndürme Dirençli AR Motor Sürücü Devresi

AR motor sürücü devreleri içerisinde en ekonomik olan devre, söndürme dirençli sürücü devresidir. Bu devre düşük performans ve maliyet istenilen uygulamalar için iyi bir seçenek olup kontrol edilmesi en kolay olan sürücü devresi olarak nitelendirilebilir. Bu sürücüde her bir faz için bir diyot ve bir anahtarlama elemanı yeterli olmaktadır. Faz sargılarında depolanan enerji serbest çevrim esnasında söndürme direnci üzerinde harcanmaktadır. Bu durum devrenin veriminin düşük olduğunun bir göstergesidir. Şekil 4.6'da söndürme dirençli sürücü devresi gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen söndürme dirençli sürücü devresinde direncinin değeri büyük bir öneme sahiptir. Direncin küçük bir değerde seçilmesi durumunda, hız yüksek iken bozucu tork üretimine neden olur ve dolayısıyla motorun ortalama torku ve verimi düşer. Direncin büyük değerlikli seçilmesi durumunda ise komütasyondaki faza bağlı yarı iletken anahtarlama elemanları için tehlikeli olan büyük değerlikli gerilim sıçramaları oluşur (Mutlu 2006). Bu devre ile yapılan sürüşlerde en uygun değer verimi elde edebilmek için kutupların yüzyüze konumuna yakın bölgede anahtarlama yapılmalı ve akımı hemen sıfıra götürecek direnç seçilmelidir.



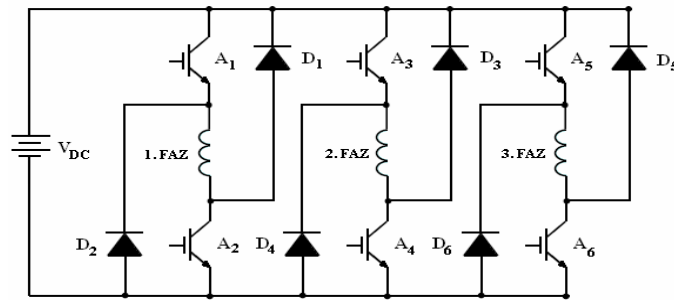
Şekil 4. 6: Söndürme dirençli AR motor sürücü devresi

## 5. AR MOTOR İÇİN SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI VE GERÇEKLEMESİ

Bu başlık altına bir AR motor için gerekli olan sürücü devre tasarımından ve bir AR motor sürücü tasarlanması için uyulması gereken kriterler üzerinde durulacaktır. Elektrik motorları genel anlamda, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren makineler olarak tanımlanabilirler. Bu tanım herhangi bir sürücü devre gerektirmeden doğrudan şebekeye(AC gerilime) yahut bir DC gerilim kaynağına bağlanarak çalışabilen motorlar için tam anlamıyla doğru bir tanımdır. Asenkron, motorların aksine, fırçasız doğru akım motorları, senkron relüktans motorlar, servo motorlar, anahtarlamalı relüktans motorlar, step motorları gibi bazı özel motorlar doğrudan bir DA kaynağına veya şebekeye bağlandıklarında çalışmaları sağlanamaz. Bu tip özel motorlar için sürücü devrelere ve bu sürücü devrelere ek yardımcı devrelere ihtiyaç duyulmaktadır.

### 5.1 AR Motor Çevirici Devre Tasarımı

4. bölümde bahsedilen çeviriciler ve çeviricilerin avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurulduktan sonra 6. bölümde detayları üzerinde durulacak olan tez kapsamında tasarımı yapılan anahtarlamalı relüktans motor için 2n tipi klasik köprü çevirici devresi tasarlanmıştır. 2n tipi klasik köprü çevirici tipinin tercih edilmesinin en büyük sebebi tasarımı kolay ve arıza riski en düşük olan çevirici tipidir. Şekil 5.1’de uygulaması yapılan 2n tipi klasik köprü çevirici gösterilmiştir. Takip eden başlıklarda uygulamada seçimi yapılan önemli elemanlardan ve özelliklerinden detaylı olarak bahsedilecektir.



Şekil 5. 1:2n tipi AR motor sürücü devresi

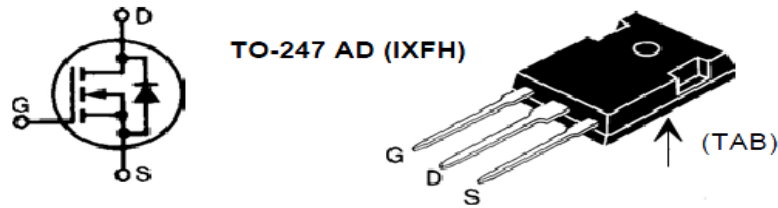
### 5.1.1 Sürücü Devresinde Kullanılan Elemanlar ve Seçimi

Sürücü devrelerinin tasarım aşamasında ilk adım denetimi yapılacak olan motorun güç gereksinimleri olmalıdır. Motorun çalışacağı devir sayısının aralığı da çevirici devre tipinin seçiminde etkili olmaktadır. Kullanılacak olan yarı iletkenlerin ve diğer devre elemanların seçiminde ise çalışma voltajının, akım ihtiyacının bilinmesi hayati önem taşımaktadır.

#### 5.1.1.1 Mosfetler

ARM sürücü devrenin çalışma verimi ve maliyetini önemli oranda etkileyen güç aktarma anahtarlarının seçimi büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde sürücü devrelerinde anahtarlama elemanları olarak kullanılan yarıiletkenler; tristörler, kapıdan tıkamalı tristörler (GTO), bipolar transistörler (BJT), Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (MOSFET) ve yalıtılmış kapılı bipolar transistörlerdir (IGBT). Bir sürücü devre tasarlarken anahtarlama elemanı seçiminde motorun çalışma akım ve gerilimi, anahtarlama elemanının maliyeti, kontrolünün kolaylığı, söndürme devresi(snubber) ihtiyacı, anahtarlama hızı ve anahtarlama elemanı üzerindeki iletim kayıpları dikkate alınmalıdır.

Denetimi yapılacak olan anahtarlama relüktans motor 1,5kW gücündedir, çalışma voltajı 220V olacak şekilde tasarımı yapılmıştır bu durumda yüklü durumda 7.48A ortalama akıma ihtiyaç duymaktadır. Bu voltaj ve akım değerleri doğrultusunda sistemin vereceği zıt emk'nın etkisinin de göz önünde bulundurularak Şekil 5.2'de elektriksel gösterimi ve dış kılıfı gösterilen 1000V 15A değerlerinde IXYS marka MOSFET'ler tercih edilmiştir. Bu çalışmada IXFH 15N100Q MOSFET'ler seçilmiştir. MOSFET hakkındaki detaylı bilgi EK-A'da verilmiştir.



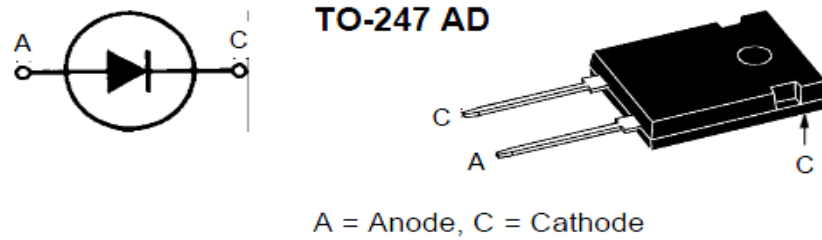
Şekil 5. 2: Kullanılan MOSFET' in bacak bağlantıları ve dış kılıfı



### 5.1.1.2 Hızlı Geri Dönüşüm Diyotları

Anahtarlamalı relüktans motor çevirici devrinde mosfet seçiminden sonra dikkat edilmesi gereken en önemli durum; bir fazın enerjisi kesilip iletim sırası gelen bir diğer faza enerji verildiği zaman, enerjisi kesilen fazda depolanmış olan enerjinin mümkün olan en kısa zaman dilimi içerisinde deşarj edilerek motor ortalama torkunu bozucu yönde etki yapmasını engellemektir. Enerjisi kesilen fazda depolanmış olan enerjinin deşarjı bu hususta çok önemlidir. Fazlardaki iletim sonrası periyotta deşarj işlemi için kullanılan geri dönüşüm diyotlarının hızlarının, akım ve gerilim değerlerinin yeterli olmasına dikkat edilmelidir.

Tasarımı yapılan çevirici devrede sargılarda depolanan enerjinin faz kesime geçtiği anda hızlı bir şekilde kaynağa aktarma ihtiyacını gidermek için ise yine her faz için alt ve üst kola birer adet olmak üzere Şekil 5.3'te elektriksel gösterimi ve dış kılıfı gösterilen 2 adet 1200V 52A değerinde IXYS marka hızlı geri dönüşüm diyotları tercih edilmiştir. EK-B'de bu diyotların teknik özelliklerini içermektedir.

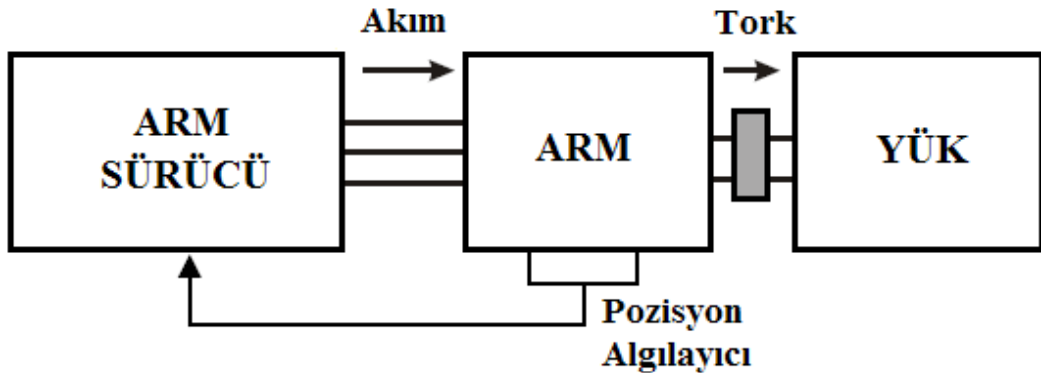


Şekil 5. 3: Kullanılan hızlı diyotun bacak bağlantıları ve dış kılıfı

## 5.2 Kontrol Kartı Tasarımı

Kontrol devresinin AR motor sürücü devresindeki asıl görevi çevirici devrenin denetimini yaparak motorda istenilen kontrol sisteminin uygulanmasını sağlamaktır. Kontrol devresinin temelini mikrodenetleyiciler oluşturmaktadır. Piyasada farklı kontrol elemanlarını da bulmak mümkündür; bilgisayarlar ve mikrobilgisayarlar bu kontrol elemanlarına örnek gösterilebilir. Kontrol elemanlarının kabiliyetleri, hızları, sağladıkları imkânlar, donanımları, kullanım alanları, fiyatları farklılık gösterebilmektedir (Altınbaşak 2001). Piyasada bulunabilen en ucuz, en basit yapıda ve kullanımı en kolay kontrol elemanı mikroişlemcilerdir.

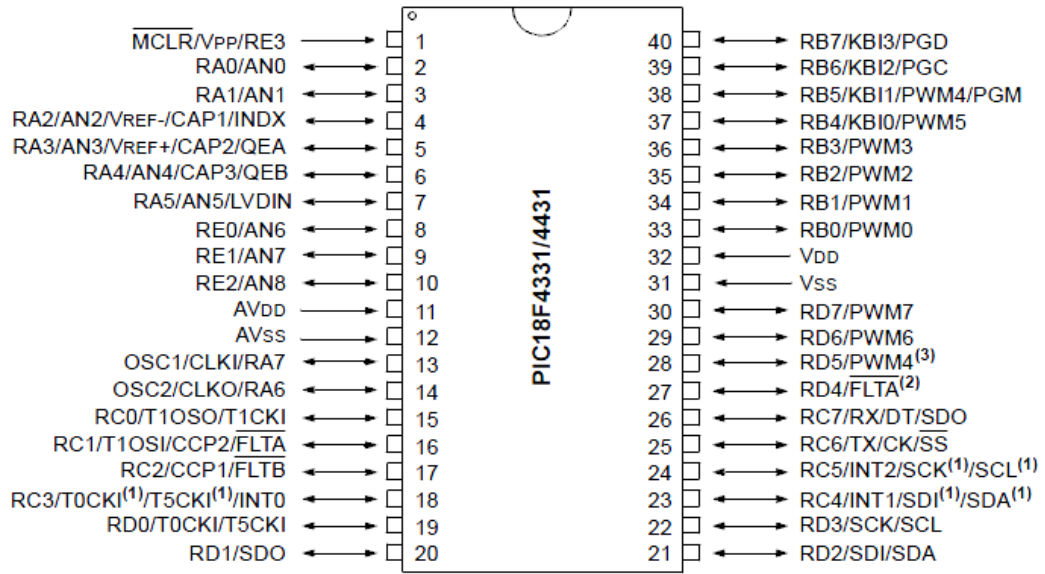
Kontrol kartının çalışmasını yalın bir dille özetleyecek olursak; kontrol kartının ana elemanı olan mikrodnetleyici motor üzerinde bulunan rotor pozisyon takibini yapan pozisyon sensörlerinden gelen dijital bilgileri değerlendirerek motor fazlarını sırası ile enerjilendirmektedir. Mikrodnetleyiciden çıkış olarak alınan MOSFET'lerin kontrolünü sağlayan sinyaller manyetik izolasyonlu mosfet sürücü elemanları üzerinden MOSFET'lere aktarılmakta ve gelen uygun sinyaller doğrultusunda ilgili MOSFET'ler ilettime geçerek motor faz sargılarını enerjilendirmektedir. Kontrol şeması aşağıdaki Şekil 5.4'te olduğu gibi gösterilmektedir.



Şekil 5. 4: Kullanılan kontrol sisteminin şeması

### 5.2.1 Kontrol Katında Kullanılan Mikrodnetleyici

Mikrodnetleyiciler tek başına bir bilgisayarda bulunması gereken giriş-çıkış birimleri, merkezi işlemci birimi (CPU), RAM gibi yapıların hepsini bünyesinde barındıran tümleşik devrelerdir. Mikrodnetleyiciler elektronik saatlerde, beyaz eşyalarda, robotlarda, biyomedikal cihazlarda, endüstriyel otomasyonda ve daha birçok elektronik uygulamada kullanılmaktadır. Tercih edilmesinin nedenlerinin başında düşük maliyetli olması, işlev bakımından gelişmiş olması ve az yer kaplaması gelmektedir. Tasarlanan cihazlarda istenen işlemlere cevap verecek nitelikte özellikleri bulduran mikrodnetleyici seçimi yapılır. Şekil 5.5'te motor sürücü devresinde kullanılan PIC4431'in bacak numaraları ve fonksiyonel özellikleri verilmiştir.

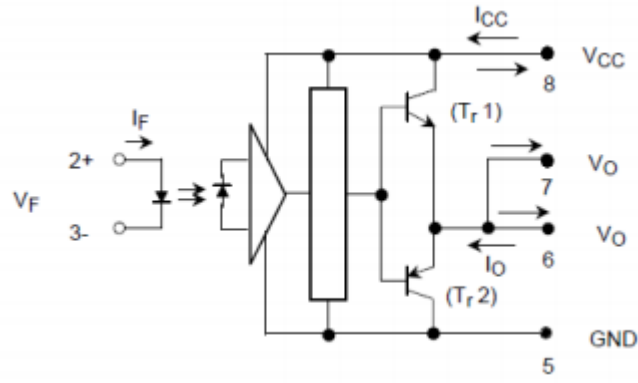


Şekil 5. 5: Kullanılan PIC'in bacak bağlantıları ve dış kılıfı

Tez kapsamında yapılan AR motor sürücü devresinin kontrol katında PIC18F4431 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. PIC18F4431'nin tercih edilmesinin temel sebepleri; 40Mhz'e kadar kristal kullanabilme seçeneği, 8 kanala kadar PWM çıkışı verebilmesi, hızlı ADC'ye sahip olması gibi özellikleri bu mikrodenetleyicinin öne çıkan özellikleridir. EK-C'de PIC18F4431'in özellikleri detaylı olarak verilmiştir.

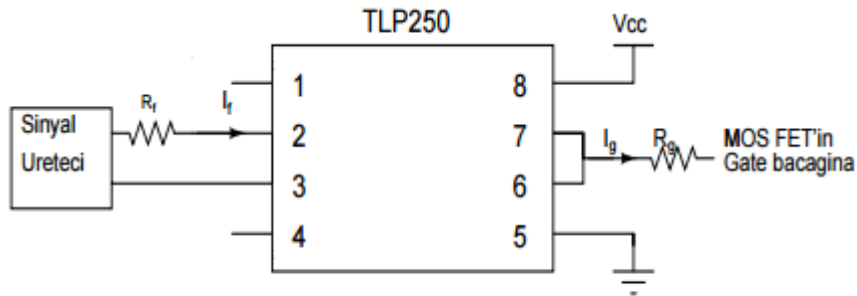
### 5.2.2 MOSFET Sürücü Entegresi

TLP250, optokuplör görevi yapan standart 8 bacaklı (8-Dip kılıflı) bir tümleşik devredir. İki farklı elektriksel devrenin arasında yalıtım sağlamak ve üretilen bir sinyali kuvvetlendirmek için kullanılmaktadır. İçyapısında bir adet LED ve ışık algılayıcısı olması sayesinde, iki farklı elektriksel katı ışık yoluyla birbirine bağlar, tümleşik devreye bu nedenle optokuplör denmektedir. Çıkış katının yüksek akım kapasitesine sahip olmasının yardımı ile izolasyonlu IGBT ve MOSFET sürücü devrelerinde kullanıma uygundur. Örneğin TLP250 tümleşik devresi, yalıtılmış anahtar sürülmesi gerektiren mosfet sürme devrelerinde DC çeviricilerde kapı işaretlerinin ana devreden yalıtılması amacıyla kullanılabilir. Aşağıda Şekil 5.6'da TLP250'nin iç devresi görülmektedir.



Şekil 5. 6:TLP250'nin içyapısı

TLP250'nin içyapısında bulunan LED'in akımı  $I_f$  olarak isimlendirilir ve değeri en fazla 20 mA olmalıdır. Daha yüksek akım değerleri LED'in yanmasına ve tümleşik devrenin çalışmamasına neden olacaktır. Ters yönde 5V ve üzerindeki gerilim değerleri de LED'in delinmesine sebep olacaktır. Ayrıca 5 mA'den düşük akım değerlerinde LED eşik değerine ulaşamayıp ışık veremediğinden tümleşik devre istenen işlemi gerçekleştiremeyecektir. EK-D'de TLP250'nin teknik bilgileri verilmiştir. Şekil 5.7'de ise TLP250'nin bacak bağlantıları görülmektedir.

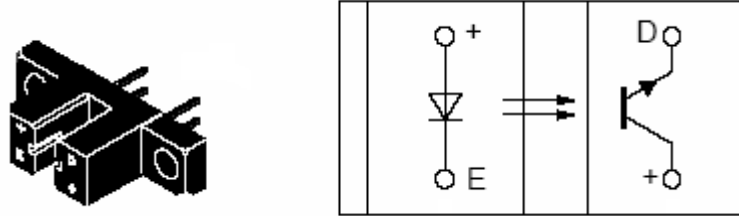


Şekil 5. 7: TLP250'nin bağlantı şekli

### 5.2.3 Konum Algılayıcı Sensör

Anahtarlamalı relüktans motorun denetimini yapabilmek için rotor konum bilgisinin sürekli olarak bilinmesi gerekmektedir. Motorda faz sargılarının enerjilendirilmesi işlemi rotor konum bilgisine göre yapılmaktadır. Rotor takip işlemi farklı işlemlerle yapmak mümkündür.

Bu tez kapsamında rotor konum algılama işlemi H21A1 optik sensörü ile yapılmıştır. Pozisyon sensörü olarak, hall etkili veya diğer algılayıcı sensörler kullanılmaktadır. Sistemde kullanılmış olan pozisyon sensörü H21A1 optik sensörünün bacak bağlantıları ve dış kılıfı Şekil 5.8’de verilmiştir. Sensörün teknik bilgileri EK-E’de verilmiştir.



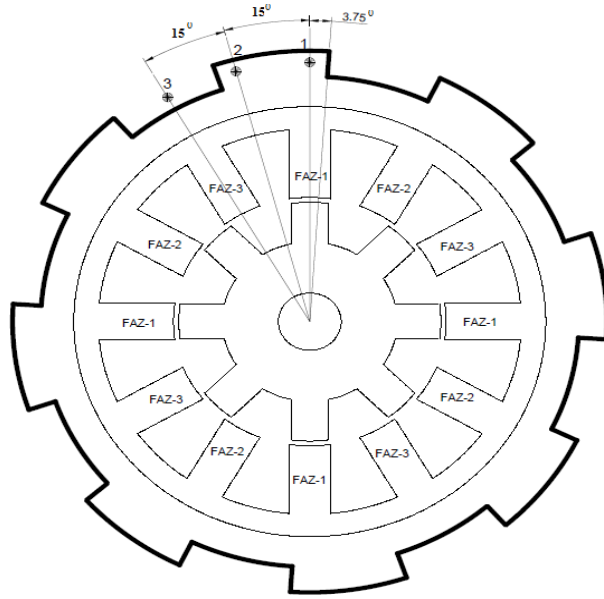
Şekil 5.8:H21A1 konum algılama sensörü

4 tane bağlantı ucu bulunan H21A1 optik sensörünün bir tarafında kızılötesi LED ve diğer tarafında ise kızılötesi foto transistorü bulunmaktadır. Bu iki bölüm arasında 3mm kadar boşluk bulunmaktadır, bu boşluğa herhangi bir cisim girdiğinde sensör elektriksel kesime girmektedir, diğer durumlarda sensörün elektriksel iletimi devam edecektir.

Yukarıdaki Şekil 5.8’deki sensörün beslemesi E+ ucuna bağlanan 330Ω’luk direnç ile +5V bağlantısı yapılarak ve E ucu toprağa çekilerek sağlanır. Transistörün D terminali toprağa çekilerek D+ ucuna 10kΩ’luk bir direnç bağlanarak direncin diğer ucu +5V ta bağlanmıştır. Bu bağlantı sonucu sensörün arasındaki boşluğa herhangi bir fiziksel engel girdiği zaman bağlantısı yapılmış olan 10 kΩ’luk direnç üzerinden lojik 1 (+5V) değeri, sensörün ara boşluğunda herhangi bir fiziksel engel olmadığı durumda lojik 0 (0V) değeri okunmaktadır.

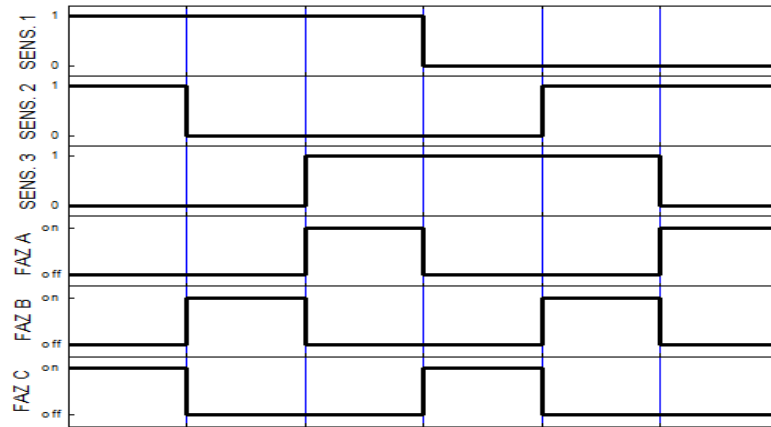
Sensörlerin motor üzerine konum algılamak için doğru şekilde montajının yapılması çok önemlidir. Tez kapsamında tasarımı yapılan 12/8 3 faz AR motorun adım açısı 15°’dir bundan dolayı motor üzerine yerleştirdiğimiz 3 adet konum algılama sensörünün her biri arasındaki açı mesafesi 15° olarak ayarlanmıştır. Montaj esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli husus referans seçtiğimiz faz ile referans olarak konumlandığımız ilk sensör, merkezden çekildiği düşünülen aynı doğru üzerinde konumlandırılmalıdır. Konumlandırma işleminde sonra Şekil 5.9’da görüldüğü gibi diğer sensörler yerleştirilmiştir. Rotor ve referans olarak seçilen stator kutupları tam

çakışık olduğu konumda rotor mili üzerine montajı yapılacak olan diskin Şekil 5.9'de koyu çizgilerle belirtilmiştir. Her girinti ve çıkıntı  $22,5^{\circ}$  olacak şekilde 12/8 3 faz ARM için özel olarak tasarlanmıştır.  $22,5^{\circ}$  olan çıkıntılardan biri Şekil 5.9'da gösterildiği 1. ve 2. sensörü  $3,75^{\circ}$  yanlara taşacak biçimde rotor mili üzerine sabitlenmiştir. Bu taşması sağlanan  $3,75^{\circ}$  sayesinde stator ve rotor çıkık kutupları tam çakışmış hale gelmeden  $3,75^{\circ}$  öncesinden faz iletiminin kesilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede sıradaki faz uyarılarak pozitif tork üretiminin devamı sağlanmaktadır.



Şekil 5. 9:12/8 3 faz AR motora konum algılama aparatlarının montajı

Optik sensörler aracılığıyla rotor konum geri besleme bilgisi elde edilmektedir. Sensörlerden alınan bu dijital veriler mikrodenetleyicide işlenerek fazların enerjilendirilme sırası belirlenebilmektedir. Şekil 5.10'da sensörlerden gelen dijital bilgiler ve bu bilgiler kullanılarak enerjilendirilen fazların diyagramı verilmiştir.



Şekil 5. 10:Alınan sensör verilerine göre fazların ON/OFF durumu

## 6. MAXWELL İLE ARM SİMÜLASYONU VE SONUÇLARI

Elektrik makineleri tasarımında motor, trafo, jeneratör gibi elektrik makinelerinde yapılan işin temelinde manyetik akı dağılımı ve bu akının yönlendirilerek iş yaptırılması yatmaktadır. Manyetik alan dağılımının ve manyetik alana ilişkin büyüklüklerin belirlenmesi için birbirinden farklı iki yöntem olan analog veya sayısal yöntemler kullanılabilir. Analog yöntemlerin zorlukları ve yetersizlikleri sayısal yöntemlerle aşılabılır. Günümüzde, manyetik alan problemlerinin çözümünde çoğunlukla sayısal yöntemlerden yararlanılmaktadır. Kullanılan bu yöntemlere; Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Monte Carlo Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi, Yük Benzetim Yöntemi gibi yöntemler örnek olarak gösterilebilir. Bu yöntemler içerisinde en çok kullanılan sayısal yöntem Sonlu Elemanlar Yöntemidir (Garip 2002).

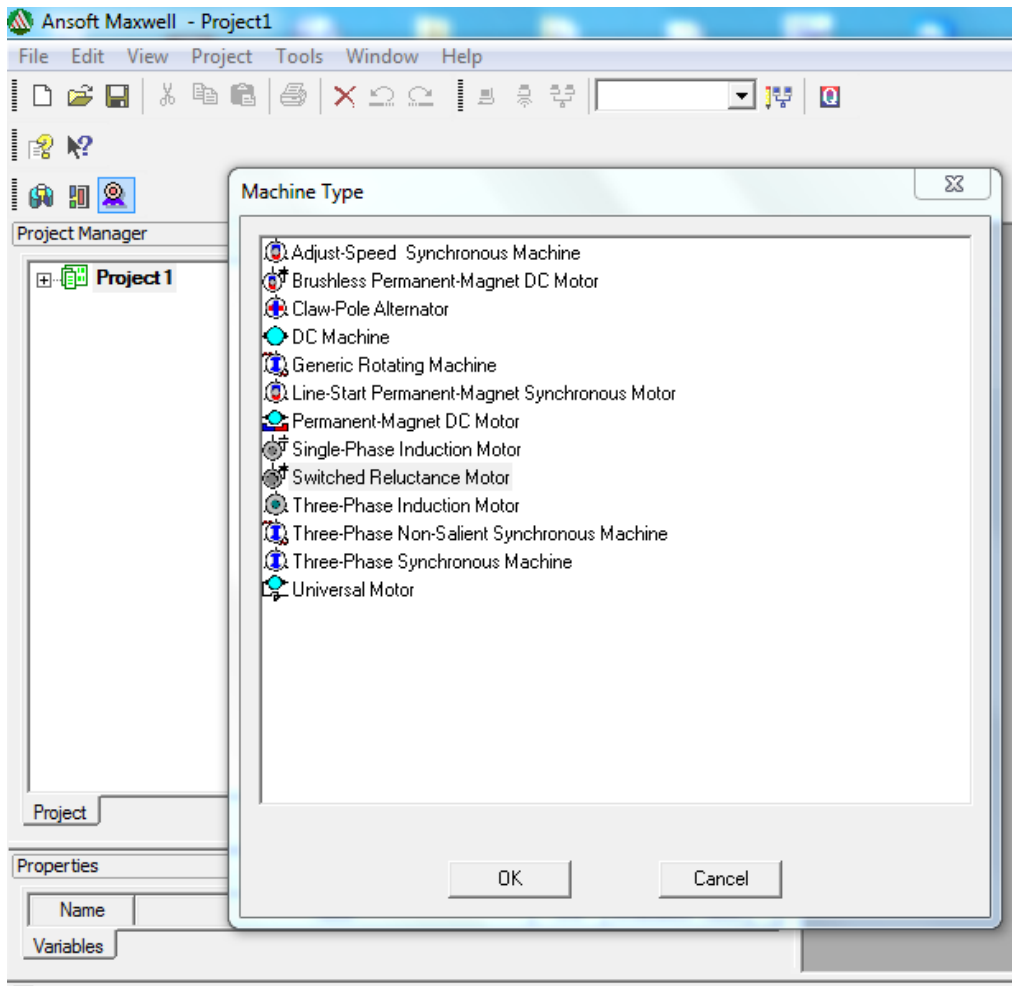
Günümüzde hayatın her alanında elektrik makineleri olmazsa olmaz hale gelmiştir. Elektrik makinelerinin tasarım ve bunu takip eden üretim aşamasında optimum çalışma aralığının sağlanabilmesi için deneysel çalışmaların fazla olması, prototiplerin üretim maliyeti ve zaman kaybı açısından vermiş olduğu zararlar önemli bir sorun halinde karşımıza çıkmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile tasarımı yapılacak olan makinenin(trafo, motor, jeneratör vb.) gerçek parametreleri kullanılarak oluşturulan modeller üzerinde analizlerin yapılması sonucunda, makinenin davranışı ve eğrileri elde edilebilmektedir. Makinenin belirli performans eğrilerini optimize etme yolunda Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan modelde belirli parametreler değiştirilerek sonuca ulaşılabilir. Böylelikle, prototip oluşturma olayı büyük ölçüde azaltılmış olmaktadır. Bilgisayar ortamında aşılın bu tasarım problemleri üretim safhasına da olumlu yansiyarak maliyetin düşmesi sağlanmaktadır.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen yapılan 3 fazlı 1.5kW 12/8 anahtarlamalı relüktans motoru tasarımında Maxwell programı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılarak, motorun akı yollarının dağılımı ve çalışma eğrileri elde edilmiştir. Takip eden başlıklarda bunlara değinilmiştir.

## 6.1 Maxwell'de 12/8 3 Faz ARM'nin Geometrik Yapısının Oluşturulması

Maxwell elektrik makinelerinin tasarımında büyük avantajlar sağlayarak tasarımcının işini kolaylaştırmakta ve çok kısa sürede ulaşılmak istenen verilerin elde edilmesini sağlamaktadır.

Şekil 6.1'de gösterilen Maxwell programı ara yüz penceresinde Maxwell programında tasarımı yapılan motorun analizlerine ilk olarak Rmxprt Design ikonunu kullanarak tasarımı yapılan motorun tipinin seçilmesi ile başlanır.



Şekil 6. 1:ARM'nin ilk fazı uyarıldığında oluşan akı yolu.

Açılan bu pencerede Maxwell'de tasarımı yapılacak olan motor tiplerinin isimleri belirtilmiştir. Tasarımcı bu pencereden tasarımını yapmak istediği motoru seçerek tasarım işlemine takip edilmesi gereken adımlarla devam edebilir. Bu tez



kapsamı doğrultusunda Şekil 6.1’de gösterilmekte olan pencereden “Switched Reluctance Motor” seçeneği seçilmiştir.

Tasarımı yapılan motorun elektriksel ve geometrik değerleri Tablo 6.1’de verilmektedir.

Tablo 6. 1: Tasarlanan ARM’nin elektriksel ve geometrik değerleri

Stator kutup sayısı( $N_s$ )	12
Rotor kutup sayısı( $N_r$ )	8
Faz sayısı (q)	3
Motor gücü(P)	1,5kW
Nominal voltaj(V)	220V
Stator dış çapı	135mm
Rotor dış çapı	77mm
Hava aralığı	0,46mm
Stator kutup genişliği	10,16mm
Rotor kutup genişliği	10,72
Stator boyunduruk kalınlığı	7mm
Rotor boyunduruk kalınlığı	7,14mm
Motor paket uzunluğu	88mm
Rotor kutup açısı( $\beta_r$ )	$16^0$
Stator kutup açısı( $\beta_s$ )	$15^0$
Sarım sayısı	76

Rmxprt’de çizim işlemi tamamlanan motor tasarımının elektriksel değerleri de girilip setup oluşturulduktan sonra iki boyutta sonlu elemanlar yöntemi ile akı yollarını ve çalışma eğrilerini çıkarabilmek için “Maxwell2DDesign” oluşturulur.

## 6.2 Maxwell 2D Design Sonuçları

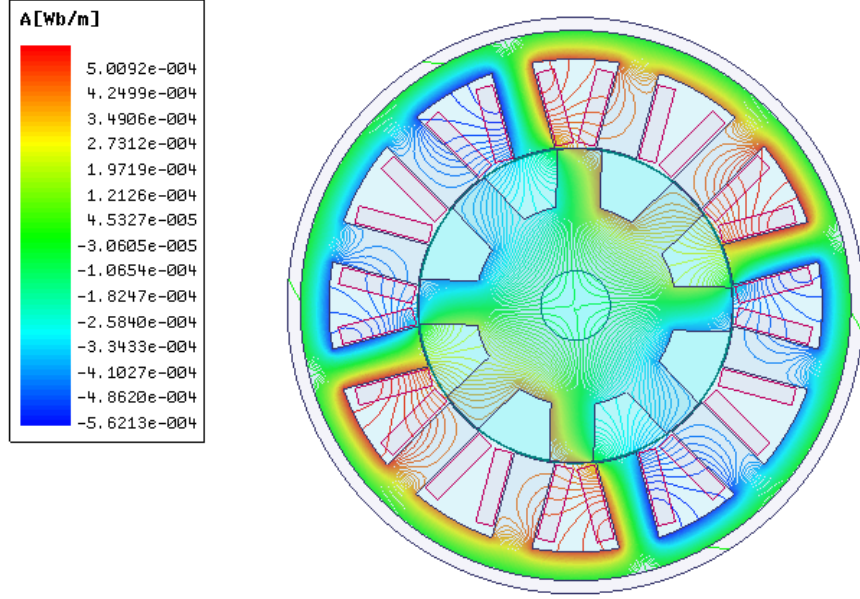
Bu başlık altında sonlu elemanlar yöntemi ile tez kapsamında tasarımı yapılan üç fazlı ARM'nin çalışma eğrileri ve motor üzerindeki akı yollarının dağılımları çıkartılmaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemini ARM'ye uygulamak amacıyla Maxwell 2D sonlu elemanlar analiz programı kullanılmaktadır. Bu manyetik analiz programı iki boyutlu manyeto statik analiz yapmakta ve doğrudan sargının oluşturduğu akıyı hesaplayarak tasarımcıya motorun çalışması hakkında ön bilgi sağlamaktadır.

Maxwell 2D design analizi yapılarak 12/8 3 faz ARM'ye ait her bir fazın akı, akım, voltaj eğrileri ve motora ait tork eğrisi ve akı motor üzerinde faz sargıları ile oluşturulmuş olan manyetik akının dağılımı elde edilmiştir.

### 6.2.1 Maxwell 2D Design'da Akı Yolları Gösterimi

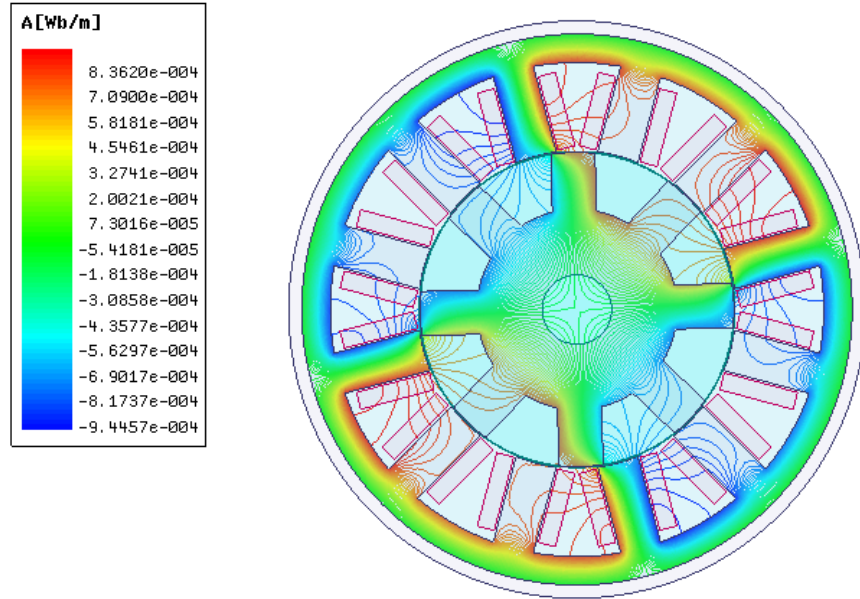
ARM'nin farklı rotor konumlarına göre farklı akı dağılımları incelenmiştir. Stator fazları sırasıyla sabit akım değeri ile uyarıldığında motor üzerinde elde edilen akı yoğunlukları Maxwell sonlu elemanlar yöntemi ile açıkça görülebilmektedir.

Şekil 6.2'de tez kapsamında tasarımı tamamlanan 12/8 üç faz AR motorun fazı uyarıldığı anda oluşan manyetik akı çizgileri görülmektedir. Statorda bulunan sargılardan akım geçmesi ile oluşan manyetik akı hava aralığı ve motorun rotoru üzerinden geçerek manyetik devreyi tamamlamaktadır ve bu esnada relüktansı en az seviyeye getirecek şekilde çıkık kutuplu yapıya sahip olan rotoru hareket ettirerek tork oluşturacaktır. 12/8 ARM'nin Şekil 6.2'de başlangıç anında oluşan akı dağılımı görülmektedir. Bu akı yolu durumunda enerjilendirilmiş olan stator faz sargısının çıkık kutupları kendisine en yakın konumda bulunan rotor kutbunu üretilmiş olan akının daha yakın yol(en az relüktans değerinde) seçme isteğinden dolayı kendine doğru çekecektir ve stator rotor kutbu arasında bulunan hava aralığı temas alanını en aza indirme yönünde rotora hareket kazandıracaktır.



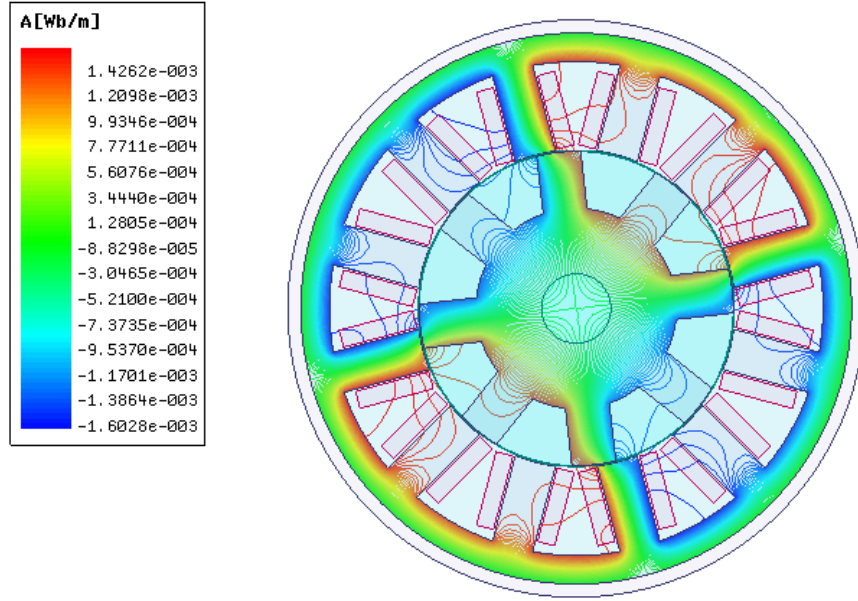
Şekil 6. 2:ARM'nin ilk fazı uyarıldığında oluşan akı yolu.

Enerjilendirilen stator fazının kutupları ile rotor kutuplarının çakışmaya başladığı an Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Bu çakışma anı ile motor pozitif tork bölgesine girmiştir. Stator ve rotor kutuplarının çakışmaya başladığı bu andan tam çakışma anına gelinceye dek bu faz için pozitif tork bölgesi devam edecektir. Tam çakışma anına yaklaşıldığında bu fazın enerjisi kesilerek motorun dönüş yönüne göre sıradaki faz enerjilendirilerek pozitif tork üretim periyodunun sürekliliğinin sağlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 6. 3:ARM'nin uyarılan fazı ile rotor kutuplarının çakışmaya başlama anı

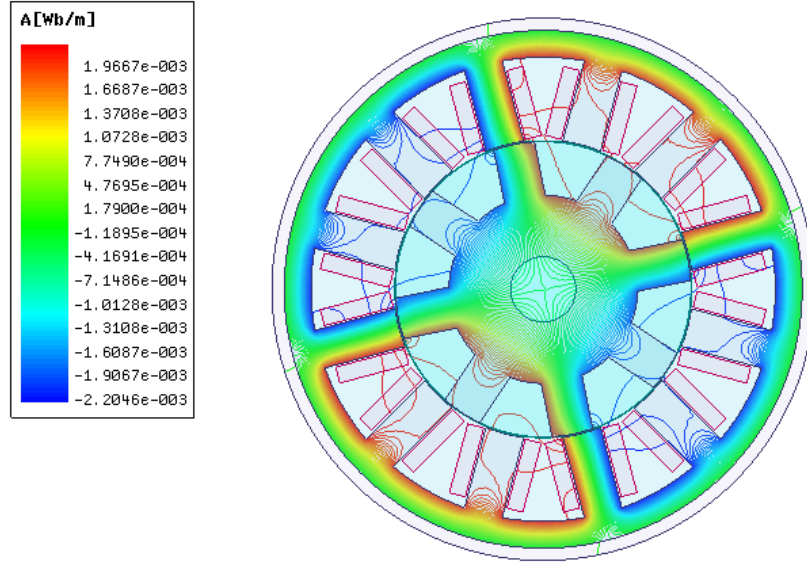
Bu bölgede pozitif tork üretilmesinin temelinde 2. bölümde de bahsedildiği gibi endüktans eğrisindeki pozitif artıştan kaynaklanan eğim vardır. Şekil 6.4’de 6. dereceye kadar hareket etmiş olan 12/8 üç faz AR motor pozitif tork bölgesinde çalışmaya devam etmektedir. İndüktans eğrisinin sabit olduğu bölgede üretilen tork sıfır, azalan bölgesinde ise üretilen tork negatiftir. ARM’de motor çalışması yapılmak isteniyorsa buna dikkat edilmelidir.



Şekil 6. 4: ARM'nin 6. dereedeki akı dağılımı

Motor pozitif tork bölgesinde hareketine devam ederken aynı anda indüktans maksimum değerine doğru yaklaşırken relüktans ise minimum seviyesine doğru hareket etmektedir. Stator ve rotor kutupları arasında çıkık kutup yapısından kaynaklanan değişken hava aralığının pozitif tork bölgesinde azalan yönde hareket etmesi yukarıda bahsedilen indüktansın maksimum relüktansın ise minimum seviyeye hareket etmesinin ana kaynağıdır. Motor yapısından en büyük relüktans değerinde ana etken hava aralığıdır. Motorun manyetik devresi üzerindeki en kısa yolu hava aralığı oluşturmuş olsa da relüktans değeri üzerindeki en büyük etki hava aralığı tarafından oluşmaktadır. Elektrik motorlarında dönel hareket için hava aralığı olmazsa olmaz olmakla birlikte minimum seviyede tutulmaktadır bunun en büyük sebebi manyetik akıdan en iyi şekilde yararlanarak motorun verimini ve performansını en üst seviyede tutmak istenilmesidir. Anahtarlamalı relüktans motorun çalışmaya ilkelerini göz önüne alacak olursak değişken hava aralığı motoru var eden en büyük etmendir.

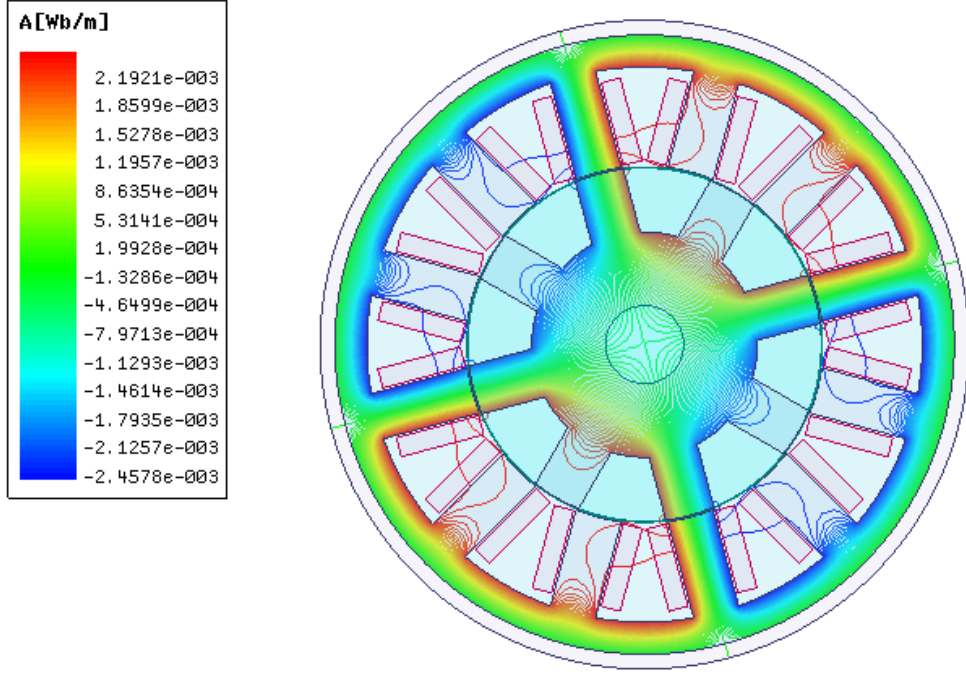
Şekil 6.5’de 11. dereceye gelen AR motorun akı çizgileri görünmektedir. Bu açı değerinden sonra 12/8 3 faz AR motorda 15. dereceye gelmeden ilgili fazın enerjisi kesilip bir sonraki fazın enerjisi verilmelidir.



Şekil 6. 5:ARM'nin 11. derecedeki akı dağılımı

Rotor, enerjilenmiş durumda olan stator kutupları ile çakışık konuma geldiğinde pozitif tork bölgesi sona erer. Pozitif tork bölgesinin son açıl değerine tam olarak gelmeden enerjilendirilmiş fazın enerjisi kesilerek rotorun dönüş yönüne göre pozitif tork üretiminin devamını sağlayacak olan faz enerjilendirilir.

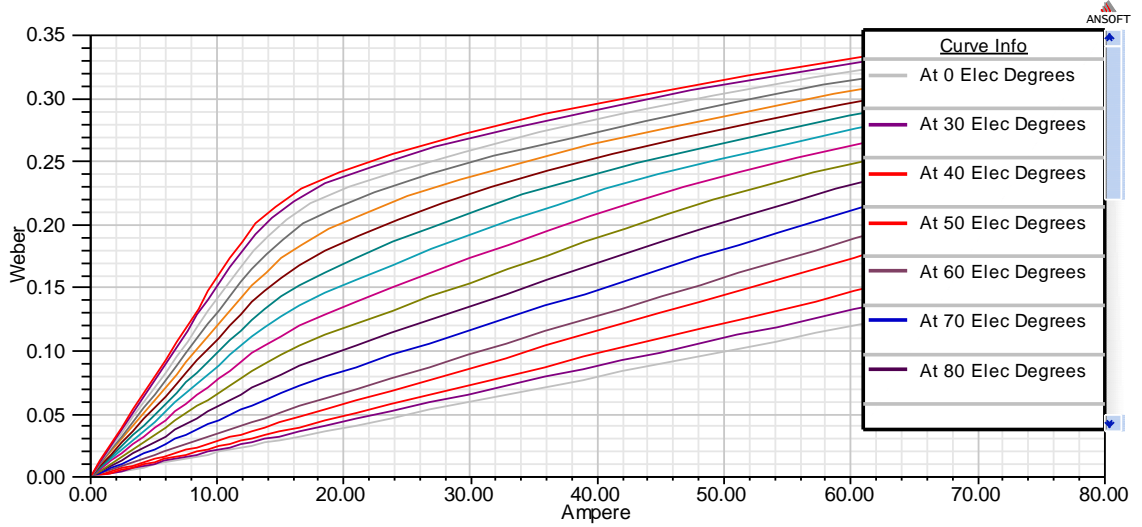
Stator ve rotor kutuplarının tam çakışma anındaki akı yolu Şekil 6.6’da gösterilmiştir. İndüktans eğrisi hatırlanacak olursa rotor ve stator kutuplarının hizalı konuma geldiği aralıkta indüktans değişimi olmadığı için tork üretimi sağlanamaz. Bu konumda faz iletimde olmamalıdır. Aksi takdirde tork üretimi sağlanamaz. Eğer iletimdeki fazın enerjisi kesilip hareketin olması istenilen yöne doğru sürekliliğini sağlayacak sıradaki fazın enerjilendirilmesi yapılmaz ise motor torkunda çökme meydana gelebilir. Anahtarlamalı relüktans motorların geometrik yapı olarak farklı kombinasyonları mevcuttur ( $N_s/N_r$ ). Her farklı yapının kendisine özgü rotor adım açısı vardır yani her bir uyartım periyodunda rotorun hareket edeceği bir açıl değer vardır. motorun denetiminde bu adım açısına dikkat edilmeli bir fazın bobinleri mekanik açıl hız kontrol edilerek adım açısından daha fazla bir açı değerinde iletimde tutulmamalıdır. 12/8 3 faz anahtarlamalı relüktans motor için bu açıl değer 15 derecedir.



Şekil 6. 6:15. derecede rotor ve stator kutuplarının tam çakışma anı

Sonlu elemanlar yöntemi tabanında manyetik analiz programları, her düğümde manyetik vektör potansiyelini çözümlenmektedir. Elde edilen çözümlerin bir ara birim yardımı ile değerlendirilmesi neticesinde istenilen sonuçlara varılır. Manyetik alan çözümlerinden genel olarak, kuvvet, moment, kayıplar, endüktans, direnç, akı vb. büyüklüklerin hesaplanması yapılabilir. Bunlara ek olarak akı yoğunlukları, akı yolu çizgileri, manyetik alan şiddeti, vb. gibi veriler de tasarımı yapılan model üzerinde rahatlıkla görülebilmektedir (Ünlü 2006). Yukarıdaki şekillerde, tez kapsamında tasarlanan 12/8 3 faz ARM'nin manyetik devresinden geçen akı çizgileri ve akı yoğunlukları rotorun farklı konumları için gösterilmektedir.

Tasarımı yapılan ARM'nin halkalanma akısı-akım grafiği Şekil 6.7.'de gösterilmiştir. Bu grafikteki akı eğrileri ve akım dikkatle incelendiğinde motorda kullanılan çelik malzemenin 12A akım değeri civarında doymanın başladığı görülmektedir. Akı değişimi bu akım değeri altındaki değerlerde doğrusal bölgeye, üzerindeki değerlerde ise doğrusal olmayan bölgeye aittir. Motor üzerinde oluşan akı stator ve rotorun karşılıklı konumunda en büyük değerine ulaşmaktadır.



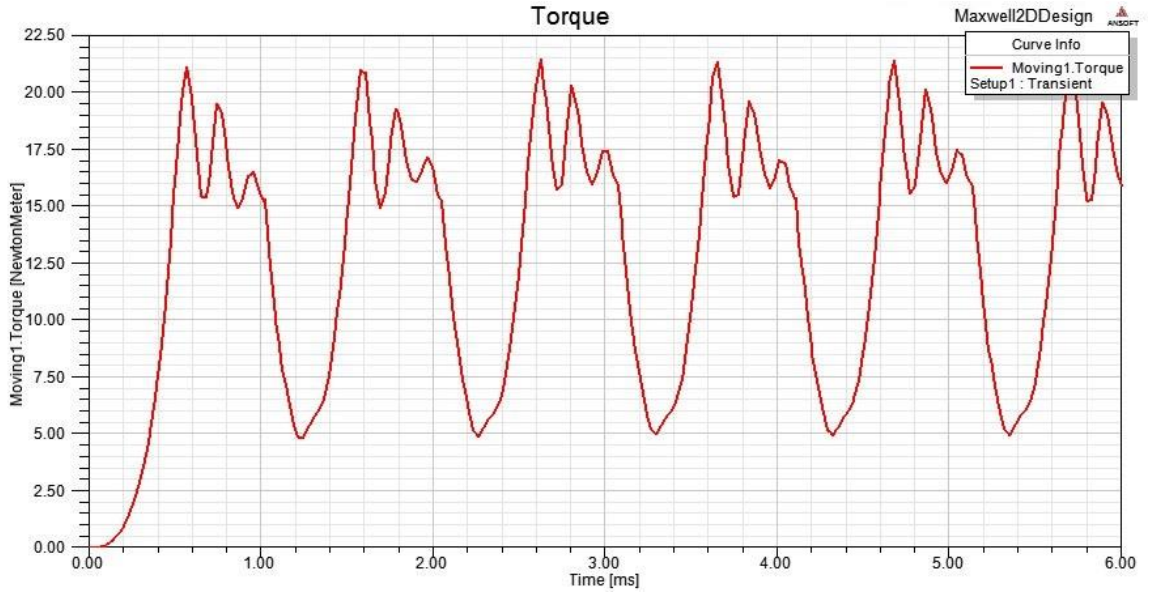
Şekil 6. 7: ARM'nin halkalanma akısı-akım eğrisi.

## 6.2.2 Maxwell 2D Design'da Elde Edilen Grafikler

Maxwell kullanarak tasarımı yapılacak olan elektrik makinesinin karakteristik grafiklerini tasarım parametrelerini girerek oluşturmak mümkündür. Bu tez kapsamında tasarımı yapılan motorun sonlu elemanlar yöntemi ile analiz işlemleri "Maxwell 2D" kullanılarak yapılmıştır.

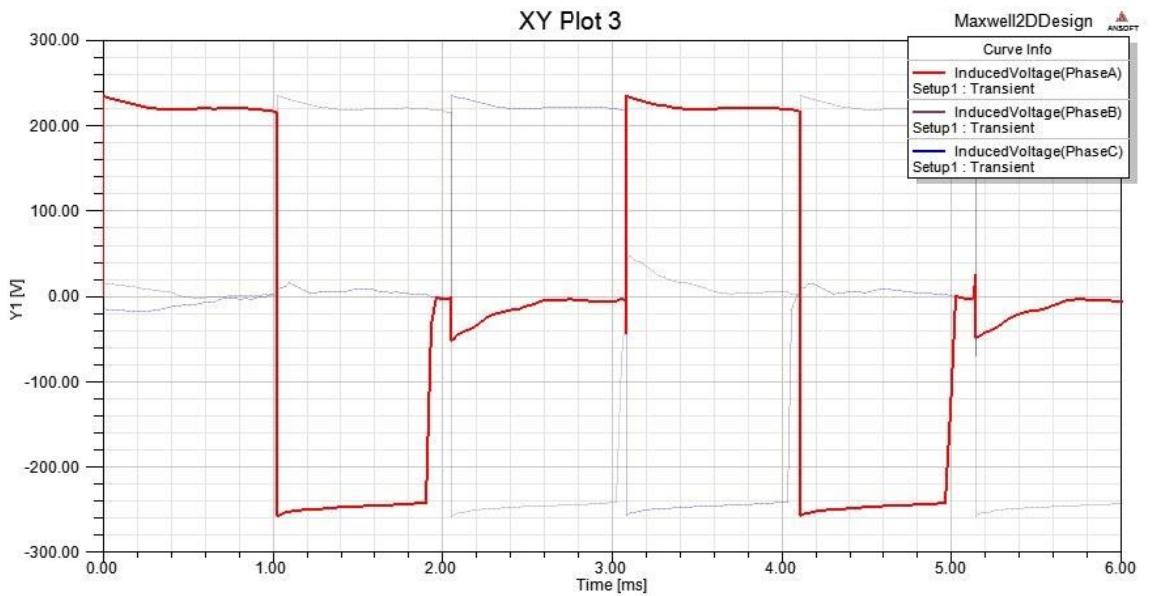
Programda yapılan analizler sonucu motora ait moment eğrisi, faz sargılarının her biri için akı, akım, gerilim eğrileri ayrı ayrı elde edilmiştir. Çalışma karakteristiklerinin en önemlilerinden birisi moment eğrisidir. Moment ifadesi, daha önce de belirtildiği üzere doğrusal durum için öz indüktansın rotor konumuna göre değişim oranı ve akımın karesi bileşenlerinden oluşmaktadır. Moment sadece öz indüktansın rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmekte ve karşıt indüktanslar ihmal edilebilecek seviyededir.

Şekil 6.8'de de görüldüğü gibi ARM'nin anlık tork üretiminde dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu durum ARM'nin dezavantajlarından biridir fakat farklı anahtarlama metotları ile bu istenmeyen durumun önüne geçilebilmektedir. ARM'de yapısal değişikliklerle de bu durumun önüne geçilebilir. Rotor ve stator kutup sayılarının birbirine yakın seçilmesi tork dalgalanmasının önüne geçilmesi ve düzenli bir anlık tork grafiğinin elde edilebilmesi için etkin bir tasarım olabileceği rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 6. 8: ARM'nin sabit akımda tork-zaman eğrisi

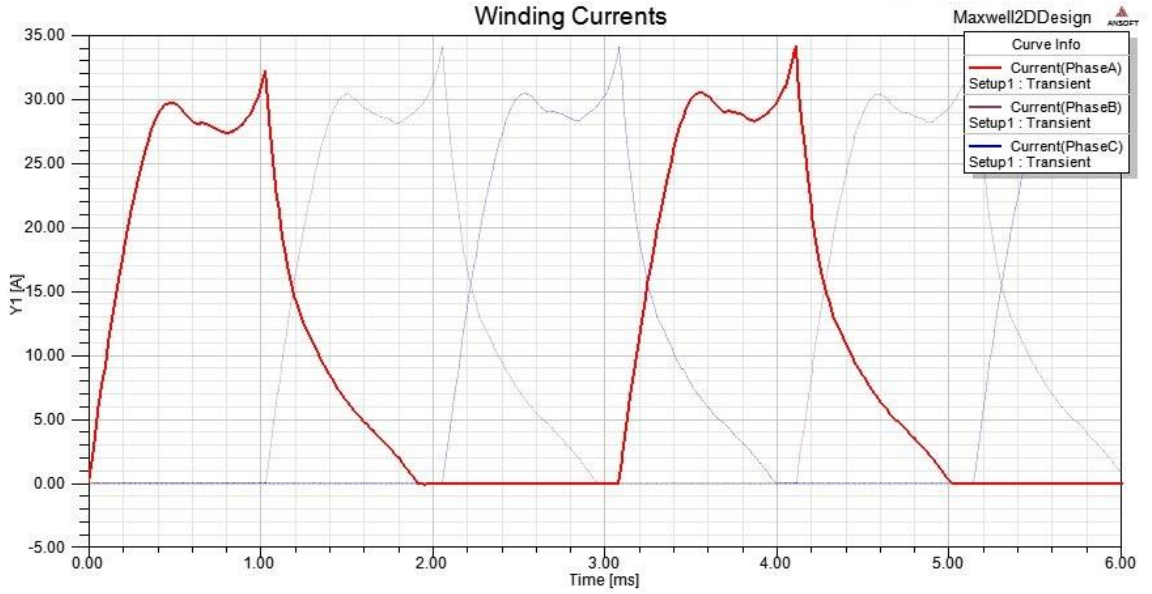
Aşağıdaki grafiklerde simülasyon sonucunda elde edilmiş olan her bir faza ait, gerilim, akım ve akı grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde har fazın sırası ile devreye girip çıktıkları ve aynı anda sadece bir fazın iletimde kaldığı görülecektir. Şekil 6.9'da A fazı gerilim-zaman grafiği verilmektedir.



Şekil 6. 9: ARM'de A fazı gerilim-zaman grafiği.

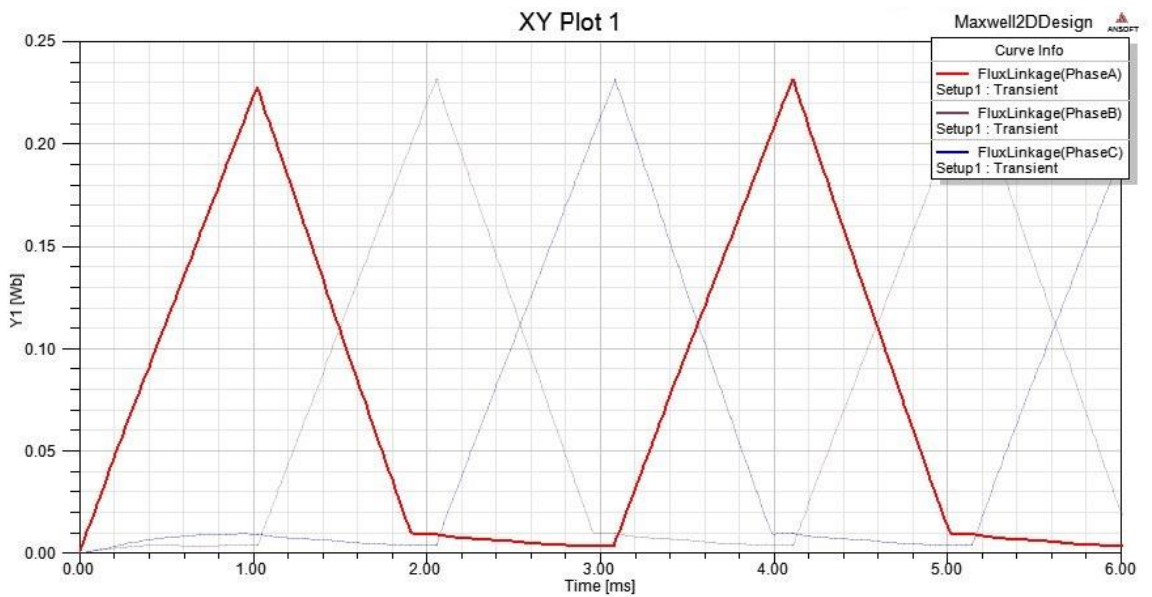


Şekil 6.10'da A fazına uygulanan gerilim sonucu oluşan akım eğrisi görülmektedir. 1.02 ms sonra motor çakışık konuma yaklaşmakta ve akım değeri ani bir yükseliş göstermektedir. Bu anda A fazının enerjisi kesilerek B fazı enerjilendirilmektedir.



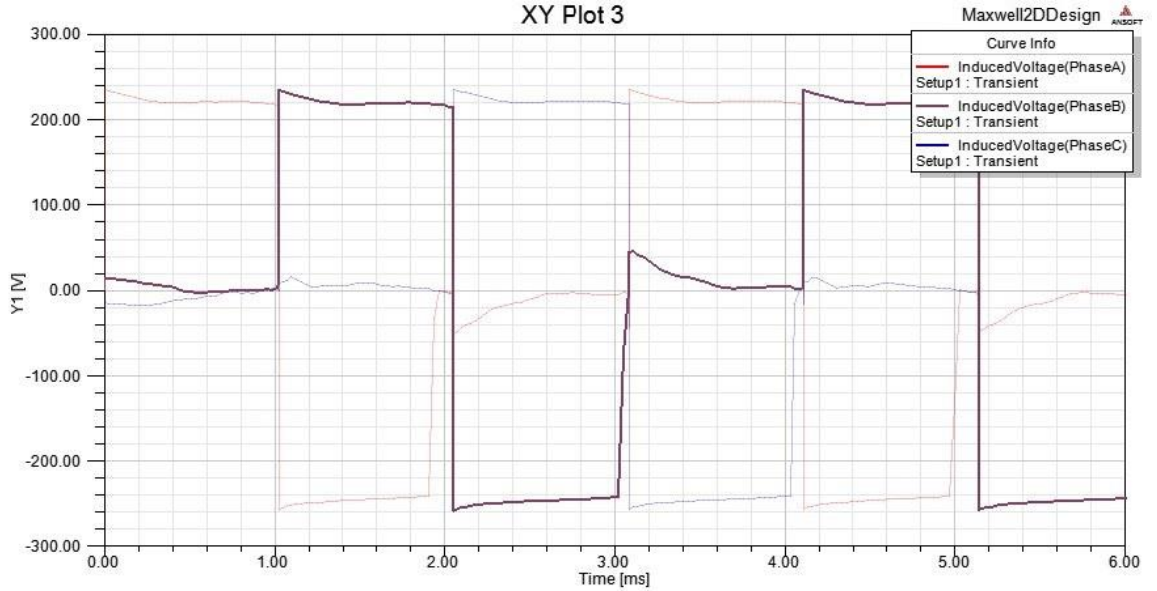
Şekil 6. 10: ARM'de A fazı akım-zaman grafiği.

A fazında oluşan akı-zaman eğrisi Şekil 6.11'de görülmektedir. A fazına ait stator kutupları ile rotorun çıkık kutupları tam çakışık konuma yaklaştığında akı maksimum seviyededir. Tam çakışık konuma gelinmeden A fazı 1.02 ms iletime kaldıktan sonra sıradaki faz iletime geçmektedir.



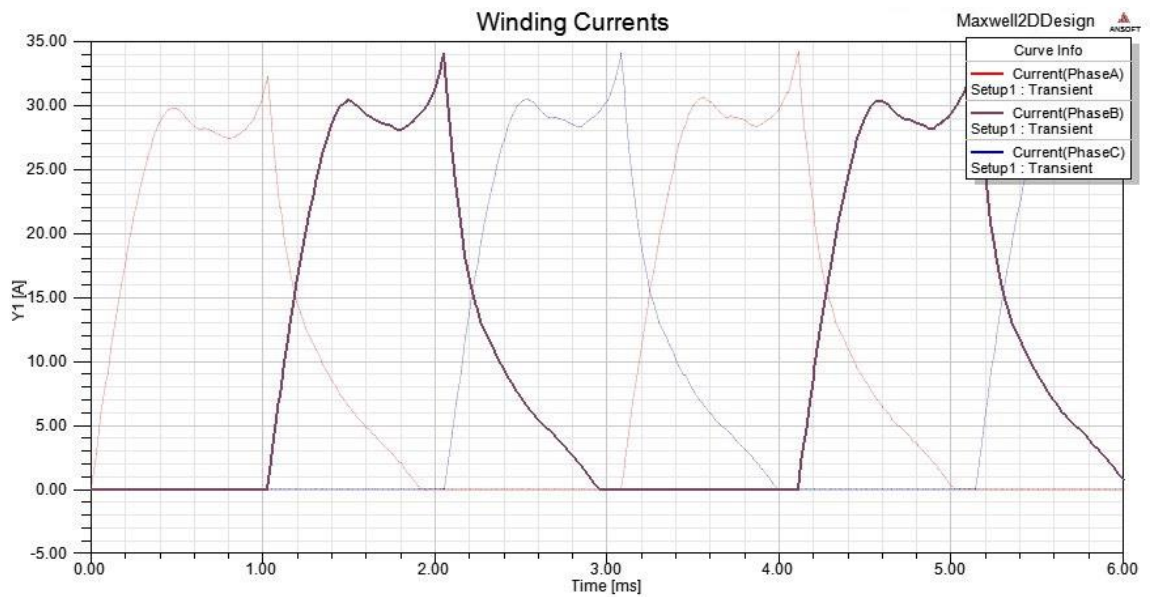
Şekil 6. 11: ARM'de A fazı akı-zaman grafiği.

A fazından sonra B fazına 220V DC gerilim verilmektedir. Şekil 6.12’de B fazının gerilim-zaman eğrisi görülmektedir. Her fazda olduğu gibi B fazında da iletim sonrasında negatif gerilim görülmektedir bunun sebebi üzerinden akım geçen bobinin iletimi kesildiğinde bobinde oluşan ters kutuplanmadır. Bu esnada bobinde depolanan enerji hızlı geri dönüşüm diyotları ile kaynağa verilmektedir.



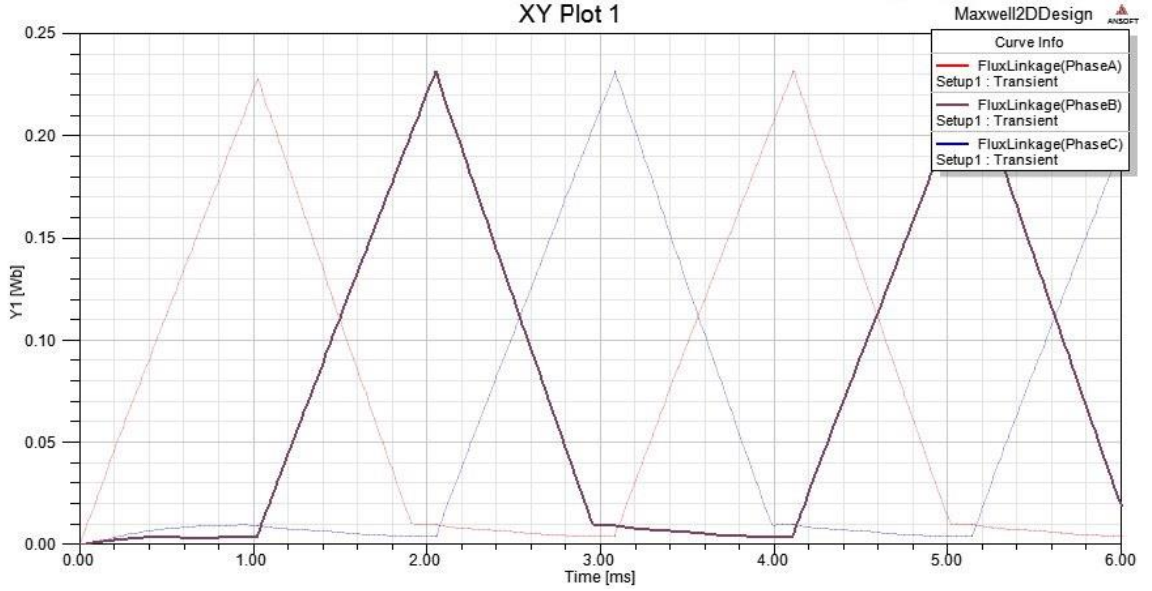
Şekil 6. 12: ARM’de B fazı gerilim-zaman grafiği.

B fazına uygulanan gerilim ile oluşan akım-zaman eğrisi Şekil 6.13’de görülmektedir. İletime giren fazın akımı 1.02 ms’de maksimum değerine ulaşmaktadır.



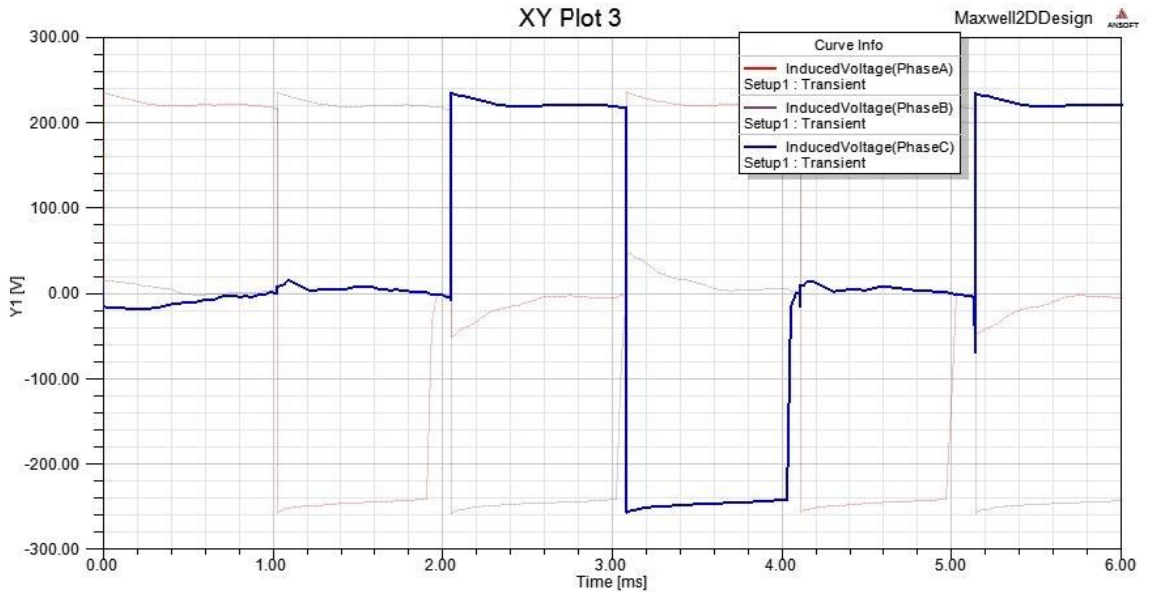
Şekil 6. 13: ARM’de B fazı akım-zaman grafiği.

Aşağıda verilen Şekil 6.14'de B fazının oluşturduğu akı-zaman eğrisi görülmektedir. Motorun diğer fazlarında da olduğu gibi her faz için 1.02 ms'lik iletim periyodunda akı değeri 0.26 Wb olan en üst seviyeye çıkmaktadır.



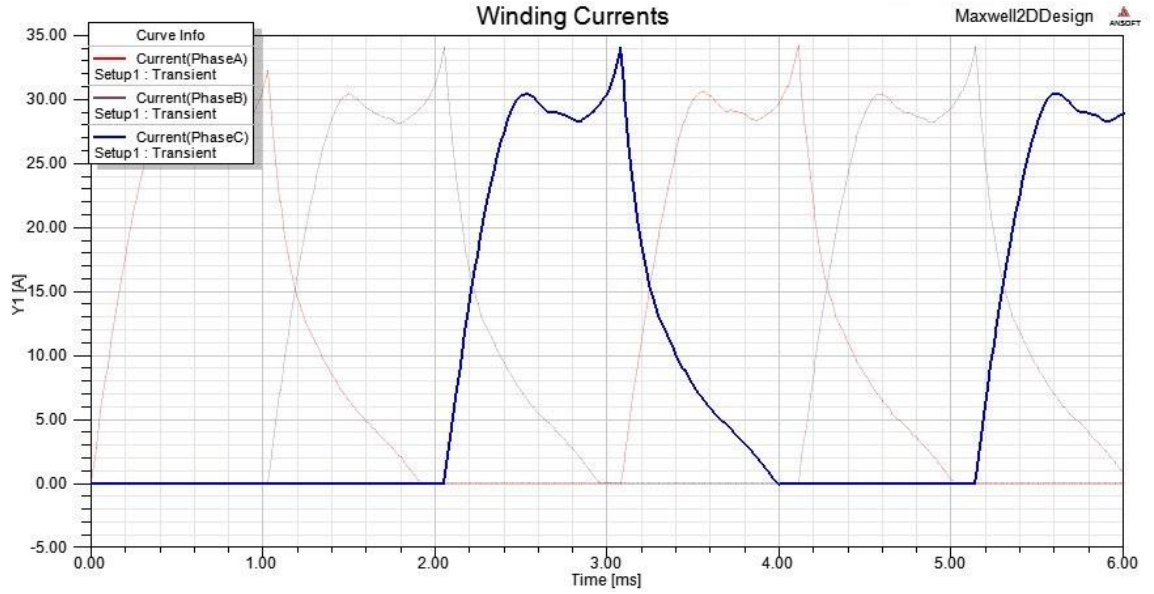
Şekil 6. 14: ARM'de B fazı akı-zaman grafiği.

Tez aşamasında yapılan motorun bir iletim periyodunda en son devreye giren C fazının Şekil 6.15'de gerilim-zaman eğrisi görülmektedir. C fazından sonra tekrar A fazı iletime girerek A-B-C şeklinde iletim devam edecektir. Motor hareketinde yön değiştirmek istenirse faz iletim sıralarını değiştirmek yeterli olacaktır.



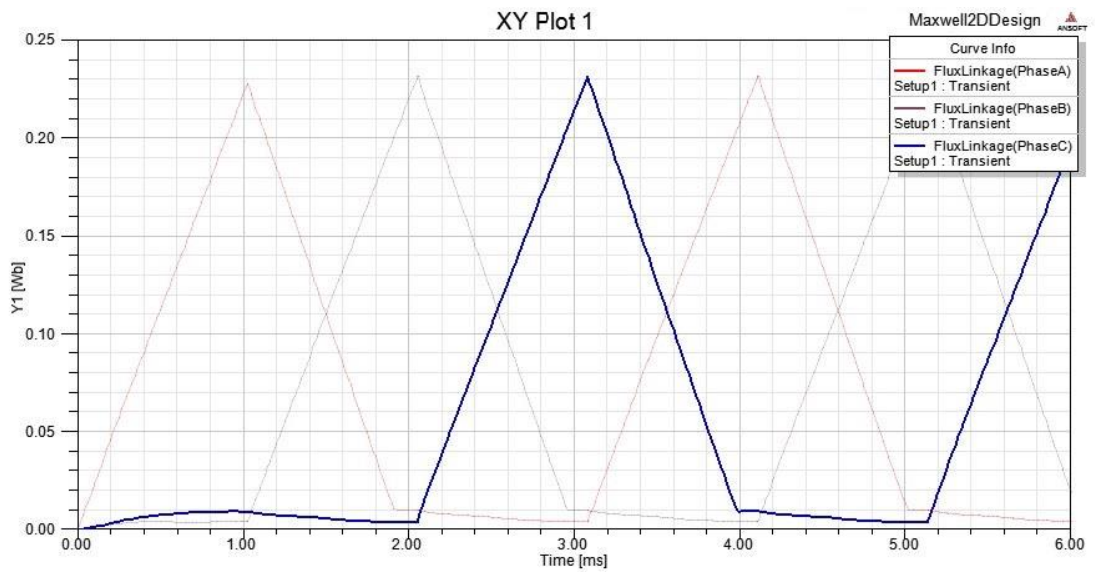
Şekil 6. 15: ARM'de C fazı gerilim-zaman grafiği.

C fazında oluşan akım-zaman eğrisi Şekil 6.16'da görülmektedir. C fazından sonra A fazı iletme girerek tork üretimi devam etmektedir. Saat yönünde dönen üç fazlı bir anahtarlamalı relüktans motorun faz iletim sırası A-B-C ise saat yönün tersinde motoru döndürebilmek için iletim sırasını C-A-B yapmak gerekecektir.



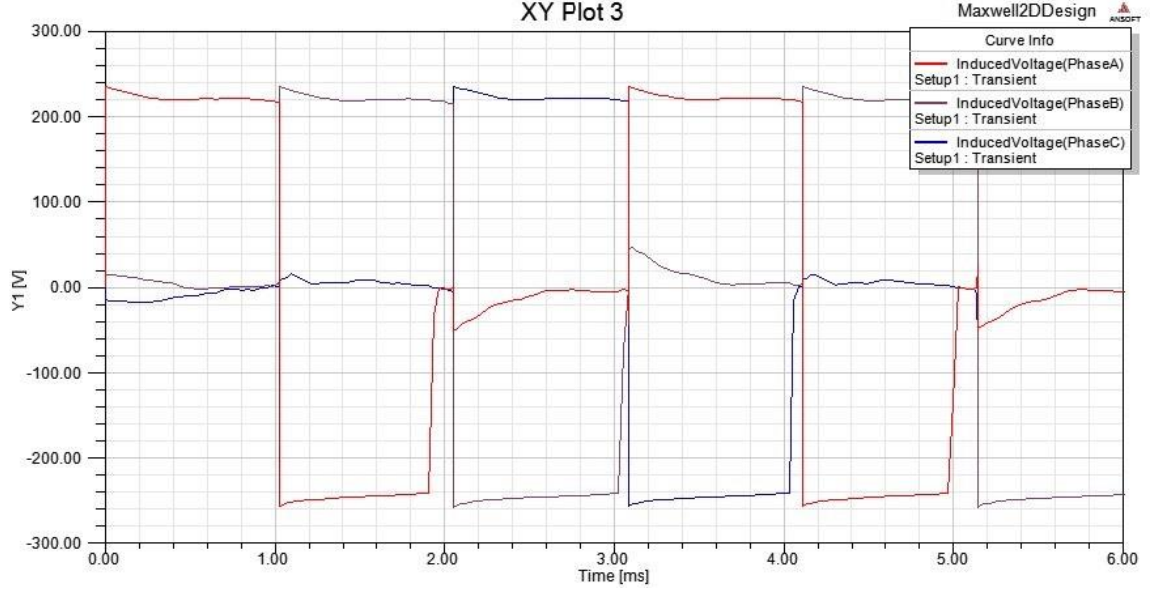
Şekil 6. 16: ARM'de C fazı akım-zaman grafiği.

C fazından akan akım sonucu oluşan akı Şekil 6.17'de akı-zaman eğrisi olarak görülmektedir. C fazı Sırasıyla A ve B fazlarından sonra iletme girerek tork üretimine devam etmiştir. Diğer fazlarda da olduğu gibi iletim kesildiği anda maksimum akı değeri 0.26 Wb'dir.



Şekil 6. 17: ARM'de C fazı akı-zaman grafiği

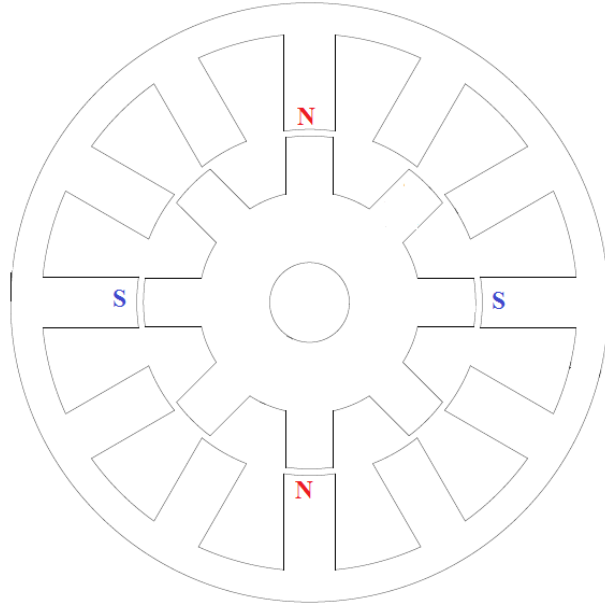
Aşağıdaki Şekil 6.18’de tez kapsamında yapılan 12/8 3 fazlı anahtarlamalı relüktans motorun fazlarındaki gerilimi göstermektedir. A fazı ile harekete başlayan motorda A fazından sonra B fazı, B fazından sonra ise C fazından sonra enerjilendirilmiştir. Şekil 6.18’de de görüldüğü gibi bir anda sadece bir fazın bobinlerine kaynaktan gerilim verilmektedir.



Şekil 6. 18: ARM’de fazların enerjilenme sırası.

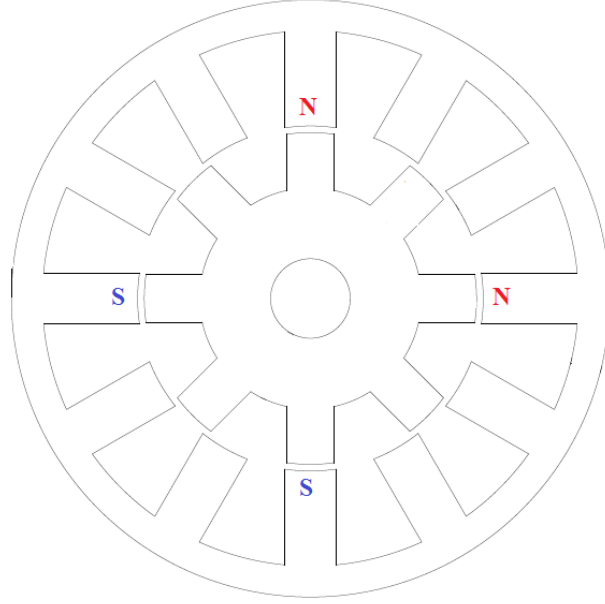
## 7. BULGULAR

Tez kapsamında tasarımı yapılan 12/8 3 faz anahtarlamalı relüktans motorun şekline karar vermeden önce Maxwell 2D’de iki farklı sarım şekli denenmiştir. 12/8 üç faz ARM’de bir faz, dört stator çıkık kutbundan oluşmaktadır. Bir fazı oluşturan bu dört stator çıkık kutbunda karşılıklı olan iki kutba yerleştirilen bobinler rotora doğru aynı manyetik alan ve diğer iki karşılıklı olan stator çıkık kutuplarına yerleştirilen bobinler ise diğer kutup çiftindeki bobinlerin oluşturduğu manyetik alanın ters kutbunu oluşturacak şekilde yerleştirildiğinde motorun statoru 4 kutup oluşturmaktadır. Şekil 7.1’de bu kutuplar gösterilmiştir.



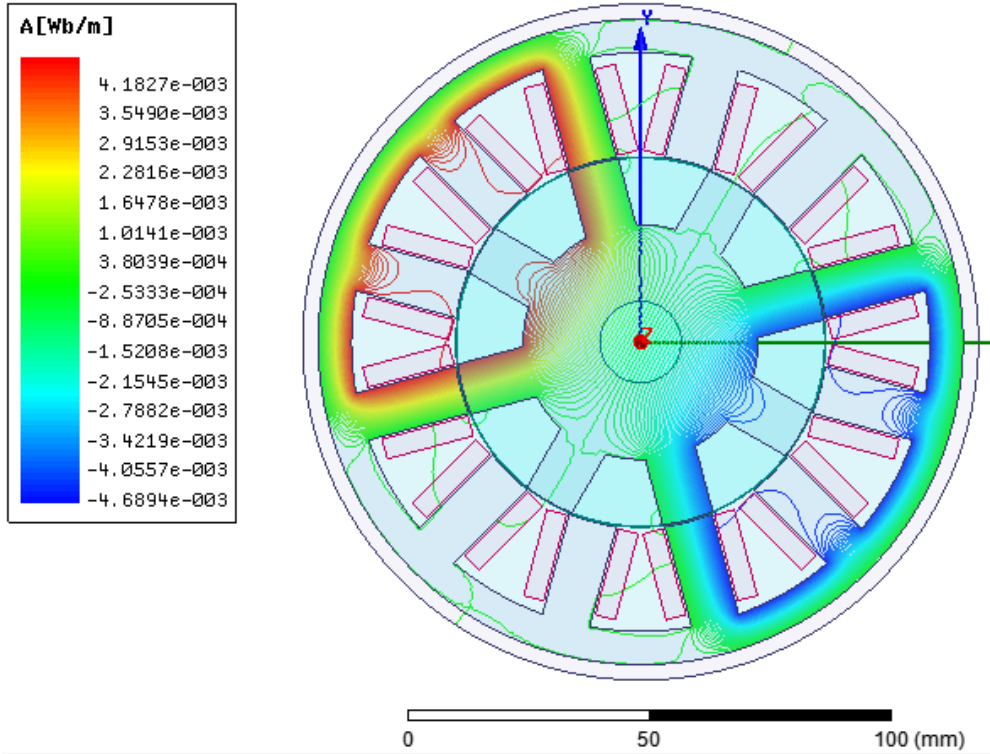
Şekil 7. 1: ARM’de oluşturulan 4 kutup yapısı.

ARM üzerinde yapılan diğer sarım tekniği ile ARM stator kutuplarında bir fazın sahip olduğu kutup uçlarında iki manyetik kutup oluşması sağlanmıştır. 2 kutup oluşturmak için bir fazı oluşturan dört stator çıkık kutbuna yerleştirilen bobinler her iki karşılıklı stator kutup çiftinde zıt manyetik kutuplar oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 7.2’de bu sarım tekniği ile oluşturulan kutuplar görülmektedir.



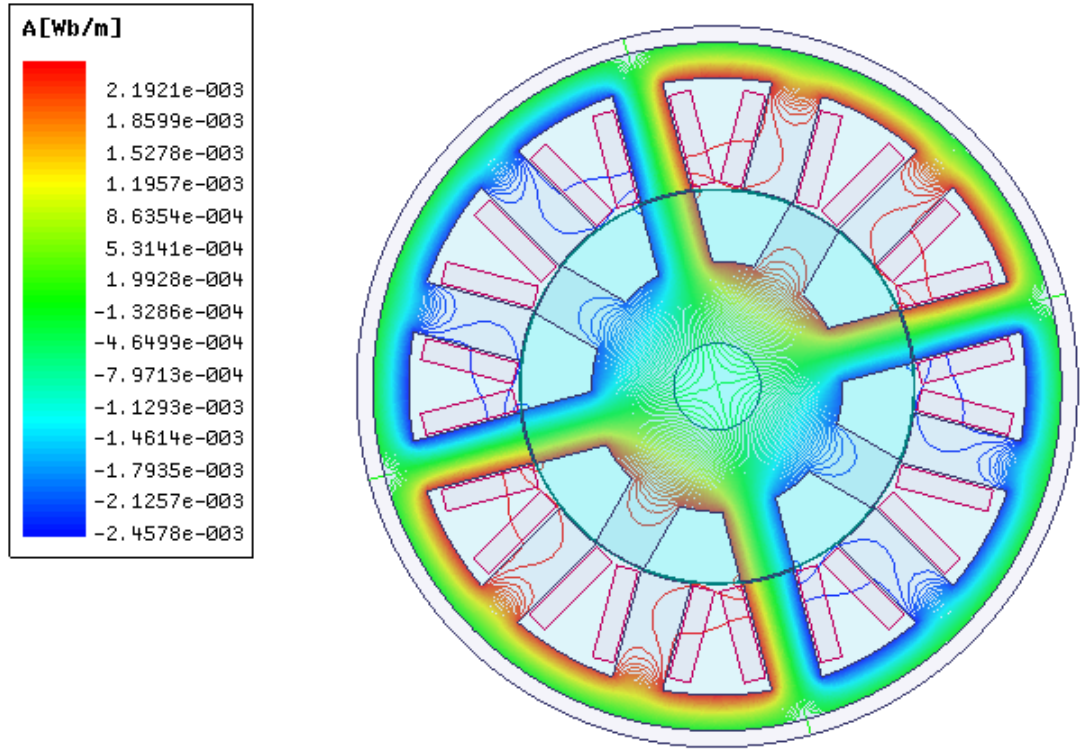
Şekil 7. 2: ARM'de oluşturulan çift kutup yapısı.

Bu iki farklı sarım tekniğinin Maxwell 2D analiz sonuçları incelendiğinde Şekil 7.1'deki kutup yapısının oluşturulmasının motorun çalışma verimliliği açısından daha mantıklı olduğu görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 7.3'te 2 kutuplu sarım tekniği ile oluşturulan motor üzerindeki akı yolları dağılımı verilmektedir.



Şekil 7. 3: ARM'de oluşturulan 2 kutup yapısı sonucu oluşan akı yolları.

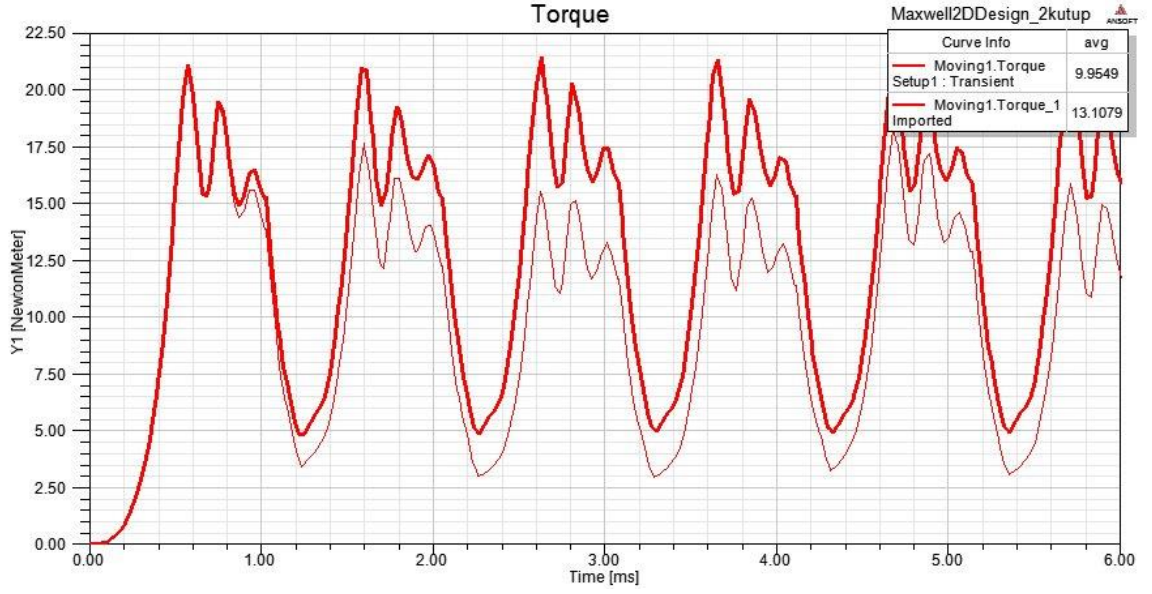
Şekil 7.4’de 12/8 3 fazlı AR motorda Şekil 7.2’de gösterilen 4 kutup yapısı sonucu Maxwell 2D’de elde edilen akı yolları dağılımı verilmiştir.



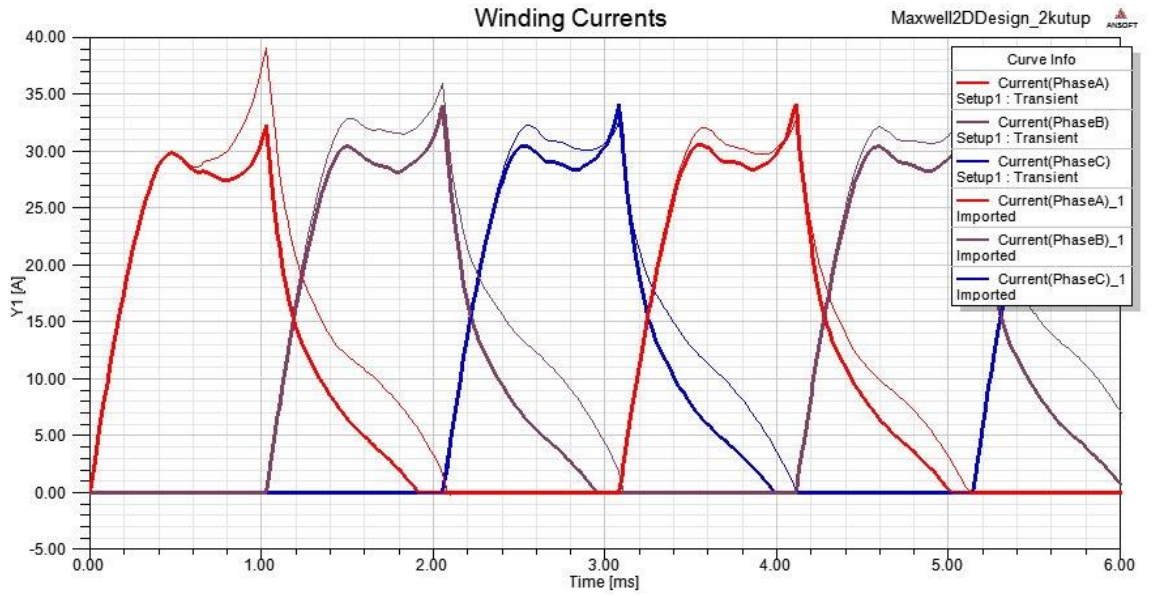
Şekil 7. 4: ARM’de oluşturulan dört kutup yapısı sonucu oluşan akı yolları.

Bu iki farklı sarım tekniği sonucu oluşan akım ve özellikle tork farklılık göstermektedir. 2 kutup oluşturan sarım tekniğinde motorun daha yüksek akım çekerken daha küçük değerde tork ürettiği görülmüştür. Şekil 7.5’de analiz sonucu elde edilen tork grafiği verilmiştir. Kalın çizgilerle belirtilmiş olan eğride 4 kutuplu yapının tork eğrisi belirtilmiştir, ince çizgi ile gösterilen eğri ise 2 kutuplu yapıya aittir. Analiz sonucu akım değerlerinde elde edilen fark ise Şekil 7.6’te gösterilmiştir. Yine kalın çizgiler 4 kutuplu yapıyı, ince çizgiler 2 kutuplu yapıyı göstermektedir. Tork eğrisinde oluşan bu farkın temel sebebi 4 kutuplu sarım şeklinde oluşan akıların motor üzerindeki manyetik devreye daha homojen olarak dağılması ve rotora çeken radyal kuvvetin daha yüksek olmasının sağlanmasıdır. Rotorun çekilmesini sağlayan manyetik akı ile oluşturulan bu radyal kuvvet doğrudan torkla alakalıdır. 2 kutuplu yapıda üretilen akı 4 kutuplu yapıda üretilen akıya eşit olsa rotora temas eden radyal kuvvet farkı iki yapı arasındaki torku değiştirmektedir.





Şekil 7. 5: ARM'de oluşturulan çift kutup ve dört kutup yapısı(koyu çizgi) sonucu tork eğrilerinin kıyaslanması.

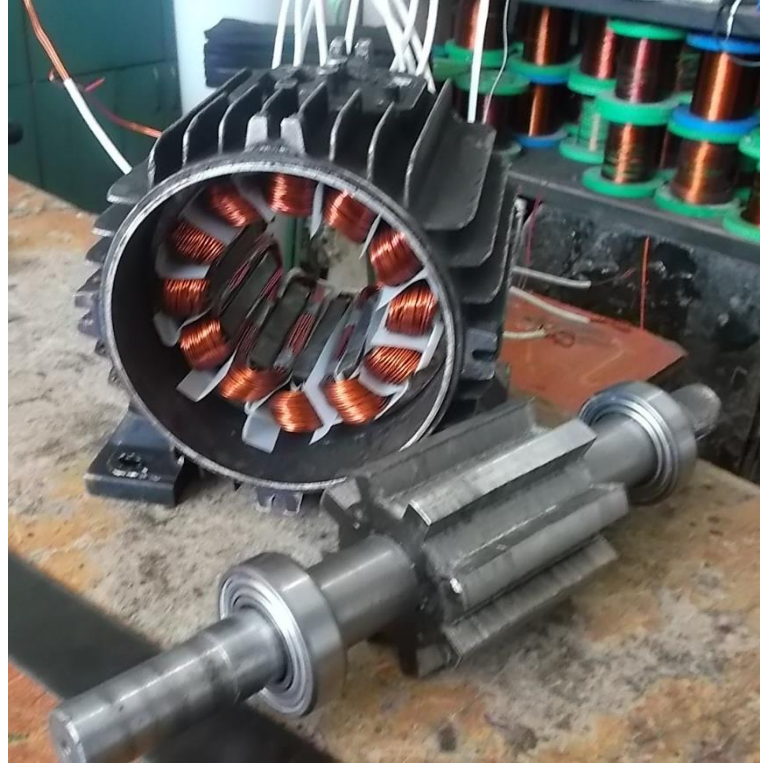


Şekil 7. 6: ARM'de oluşturulan çift kutup ve dört(koyu çizgi) kutup yapısı sonucu oluşan akımların kıyaslanması.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde tez kapsamında tasarımı yapılan motorda, stator fazlarında 4 kutup oluşturacak şekilde sarım yapılmıştır.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında anahtarlamalı relüktans motoru ve sürücü devresi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ARM'nin indüksiyon motorlarına alternatif olarak rahatlıkla gösterilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Anahtarlamalı relüktans motorunun yapısında mıknatıs ve fırça gibi parçaların olmamasından dolayı bakım ihtiyacı az ve kullanım alanı bakımından indüksiyon motorlarının kullanıldığı her yerde kullanılma imkânına sahiptir. Yapısının basit olması imalat zorluğunu ortadan kaldırmaktadır. Stator ve rotoru silisli sac paketlerden oluşmaktadır. Şekil 8.1'de, tez kapsamında yapılan 12/8 yapıda 3 fazlı anahtarlamalı relüktans motor görülmektedir.



Şekil 8. 1 : Sarım işlemi tamamlanmış halde 12/8 ARM

Anahtarlamalı relüktans motoru sürücü devresi H köprülü sürücü devrelerine göre hem denetimi oldukça kolay ve hata toleransı oldukça fazladır. H köprülü sürücü devrelerinin en büyük dezavantajları alt ve üst anahtar grubunun kısa devre olma ihtimali vardır, ARM sürücülerinde ise böyle bir ihtimal yoktur, bir koldaki alt ve üst anahtar grupları arasında motor bobinleri bulunduğu için bu sakıncalı durum

tamamıyla ortadan kalkmaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmada 2n klasik köprü tipi çevirici yapılarak tasarlanan 12/8 ARM bu çevirici sürülmüştür.

Tasarımı yapılan ARM yüksüz olarak sabit görev süresi(duty) seviyesinde, farklı gerilim seviyelerinde test edilmiş ve elde edilen akım ve hız bilgileri Tablo 8.1’de gösterilmiştir.

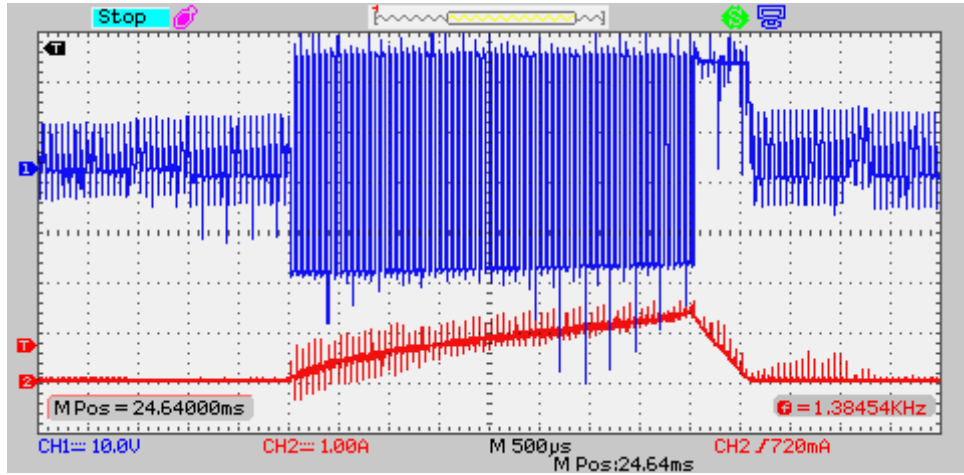
Tablo 8.1: Tasarlanan ARM’nin farklı gerilim seviyesindeki çalışmasında akım ve hız değerleri

Voltaj(V)	Akım(A)	Hız(d/dk)
50	0,7	322
60	0,75	430
70	0,9	500
80	0,95	565
90	1	620
100	1,15	662
110	1,2	711
120	1,25	746
130	1,35	780
140	1,4	793
150	1,45	823
160	1,45	851
170	1,5	870
180	1,6	904
190	1,65	927
200	1,7	948
210	1,75	965
220	1,75	990

Tez kapsamında yapılmış olan ARM PWM tekniği ile sürülmüştür. Çevirici devredeki mosfetlere üst kola PWM işareti uygulanıp alt kola ilgili fazın iletim süresince lojik 1 işareti uygulandığında lojik 1 işareti uygulanan alt kol mosfetlerinin fazla ısındığı görülmüştür. Bunun sebebinin faz sargıları üzerinde depolanan enerjinin,

üst kola uygulanan PWM periyodu esnasında duty içerisindeki lojik sıfır konumlarında hızlı geri dönüşüm diyotlarının yanı sıra mosfetler üzerinden de akım geçmesi olduğu sonucu elde edilmiştir. Alt kol mosfetlerinin daha az ısınması amaçlanarak alt ve üst kola aynı PWM işareti uygulanarak alt kol mosfet grubunun fazla ısınma problemi çözülmüştür.

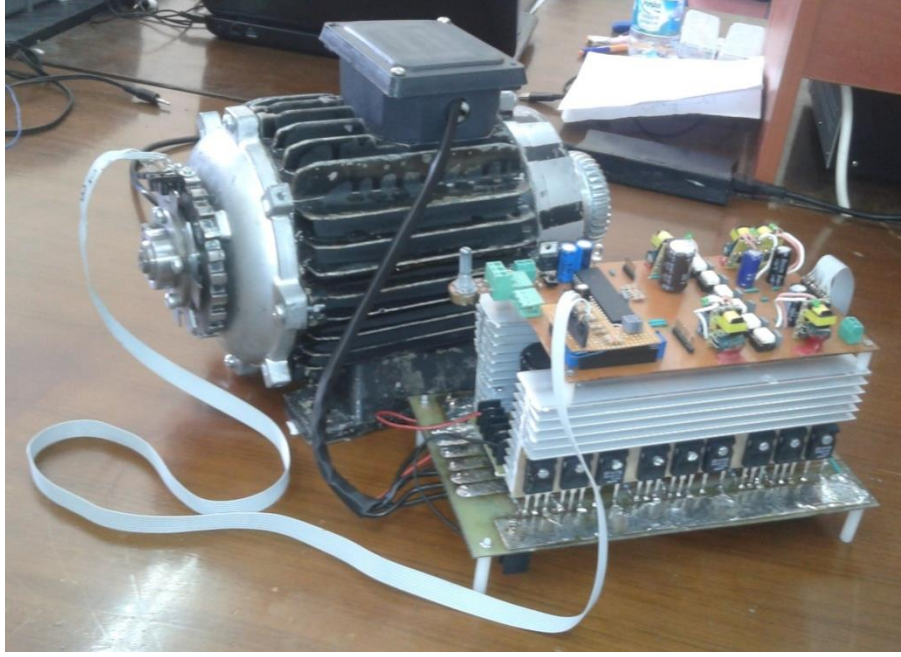
Faz enerjilerinin verildiği çevirici devresindeki her faza ait alt ve üst kol mosfet gruplarına aynı PWM işareti verildiğinde motorun %40 görev süresi seviyesinden sonra dönme hareketine başladığı görülmüştür. Alt kola faz iletimi sırasında lojik 1 üst kola PWM işareti verildiğinde ise motorun %10 görev süresi seviyesinde dönme hareketine başladığı görülmüştür. Aşağıdaki Şekil 8.2’de motorun bir fazında iletim esnasında uygulanan gerilim ve akım eğrilerinin zamanla değişimi gösterilmektedir



Şekil 8. 2: Bir fazdaki gerilim ve akım(gerilim probu \*10 kademesindedir.)

Kontrol katında bulunan analog giriş ile PWM görev süresi seviyesi ayarlanmıştır. Bilindiği üzere temel hız seviyesine kadar ARM’lerde PWM tekniği ile motor kontrolü yapılabilmektedir. %85 PWM görev süresi oranına kadar çıkılarak motor yüksüz durumda 1200d/dk hızda kadar çıkarılabilmektedir.

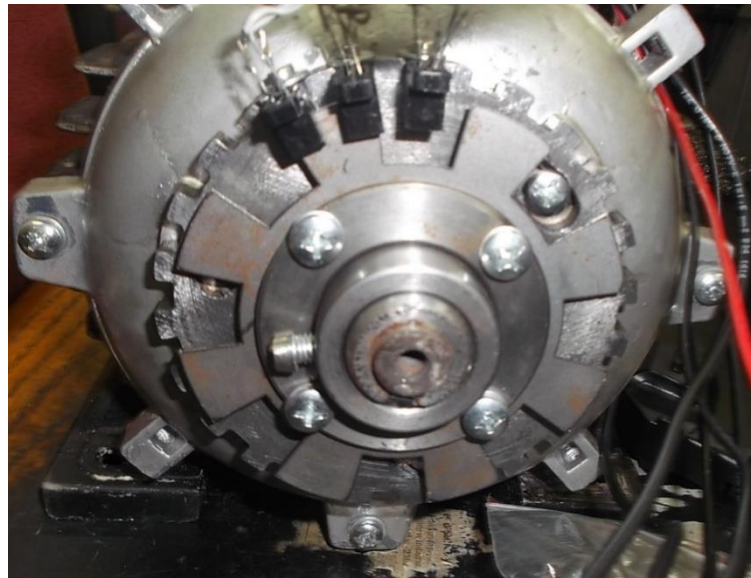
Aşağıdaki Şekil 8.3’te tez kapsamında yapılan anahtarlamalı relüktans ve sürücü devresinin deneye hazır hali görülmektedir. Sürücü detaylarına aşağıda değinilmiştir. Sürücü devresi kontrol katı ve güç katı olarak iki kombine devreden oluşturulmuştur.



Şekil 8. 3 : Tez kapsamında yapılan 12/8 1.5kW 3 faz ARM ve sürücüsü

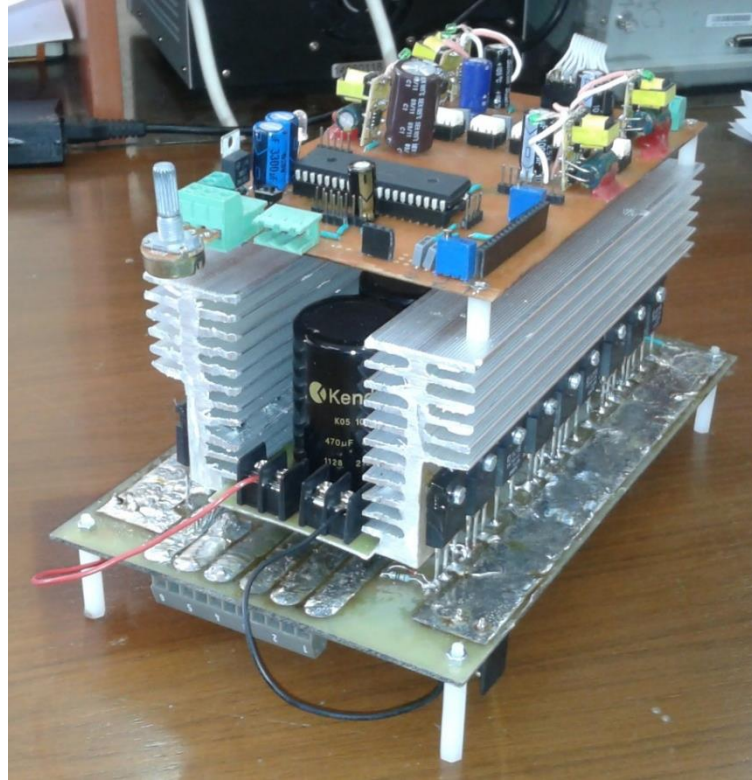
Motor kontrolü için kilit elemanların başında H21A1 optik sensörleri gelmektedir. Sensörlerin motor üzerine doğru şekilde ve doğru açıda yerleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. 12/8 anahtarlamalı relüktans motorun adım açısı 15 derece olduğu için sensörler 15 derece aralıklarla motora monte edilmiştir.

Şekil 8.4'de motor gövdesine yerleştirilen sensörler ve rotor üzerine yerleştirilen rotor konumunun algılanmasına yardımcı olan disk görülmektedir.



Şekil 8. 4 :Optik sensörler ve diskin motora montajı

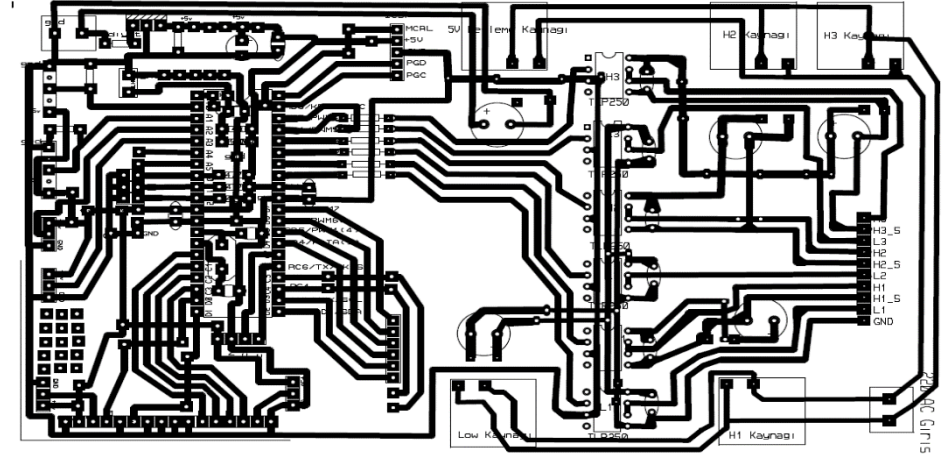
Kontrol katında mikrodenetleyiciden alınan PWM sinyalleri TLP250 üzerinden geçerek mosfetlere aktarılmaktadır. Kontrol katının elektriksel beslemesi LED sürmede kullanılan 220V AC girişli 16V DC çıkışlı flyback dönüştürücüler kullanarak yapılmıştır. Mikrodenetleyici 5V DC’de çalıştığı için dönüştürücü çıkışında LM7805 regülatör entegresi kullanılmıştır. Mosfetlerin beslemesi yine bu dönüştürücüler kullanılarak yapılmıştır. Üst mosfet kolları için her faz için birer tane ve alt mosfet kollarının tamamı için 1 tane 220V AC girişli 16V DC çıkışlı flyback dönüştürücü kullanılmıştır. Mikrodenetleyicide motor denetimi için kullanılan yazılım kodları Ek F’de verilmiştir. Aşağıdaki Şekil 8.5’de sürücü devresi görülmektedir.



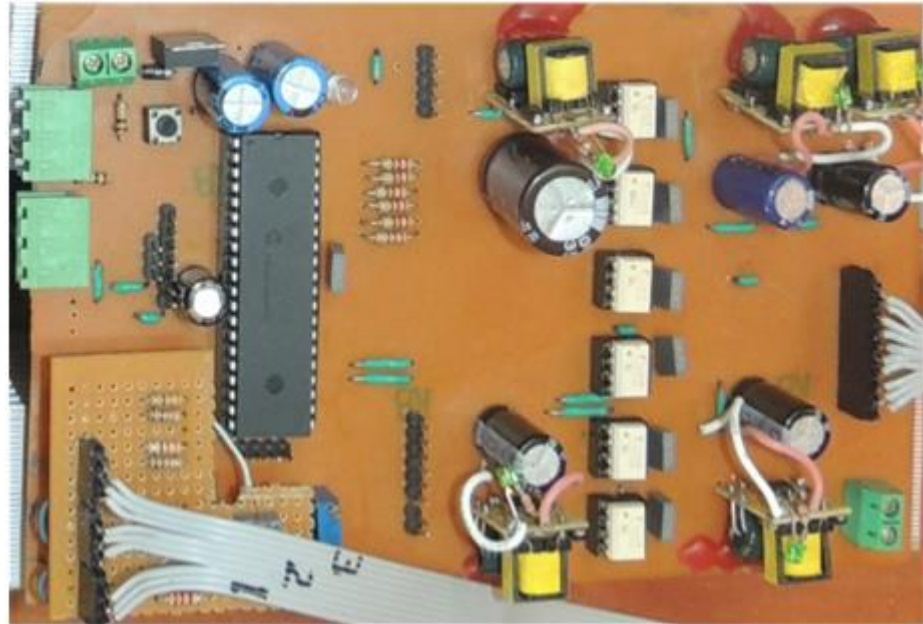
Şekil 8. 5 : Tez kapsamında yapılan sürücü

Her fazı iletme geçirmek üzere alt ve üst kol olmak üzere 2 ayrı mosfet grubu vardır. Aynı faza ait alt ve üst kol mosfet grupları arasında o faza ait bobin bağlantı uçları bulunmaktadır. Motor fazlarının enerjilendirilme işlemi, kontrol katından gelen işaretler doğrultusunda güç katı ile sağlanır. Güç katında mosfetler, hızlı diyotlar, motor bağlantı klemensleri ve kondansatör grubu bulunmaktadır.

Şekil 8.6'da kontrol katının ares çizimi ve Şekil 8.7'de kontrol devresinin kurulmuş hali görülmektedir. Bu gibi kontrol devresi tasarımlarında kullanılan mikrodenetleyici mümkün olduğu kadar güç kontrol katından ayrı tutulmaya çalışılmalıdır aksi takdirde oluşabilecek elektriksel gürültüler mikroişlemcinin çalışmasını etkileyebilecektir.



Şekil 8. 6 : Kontrol katının ARES programı ile çizimi

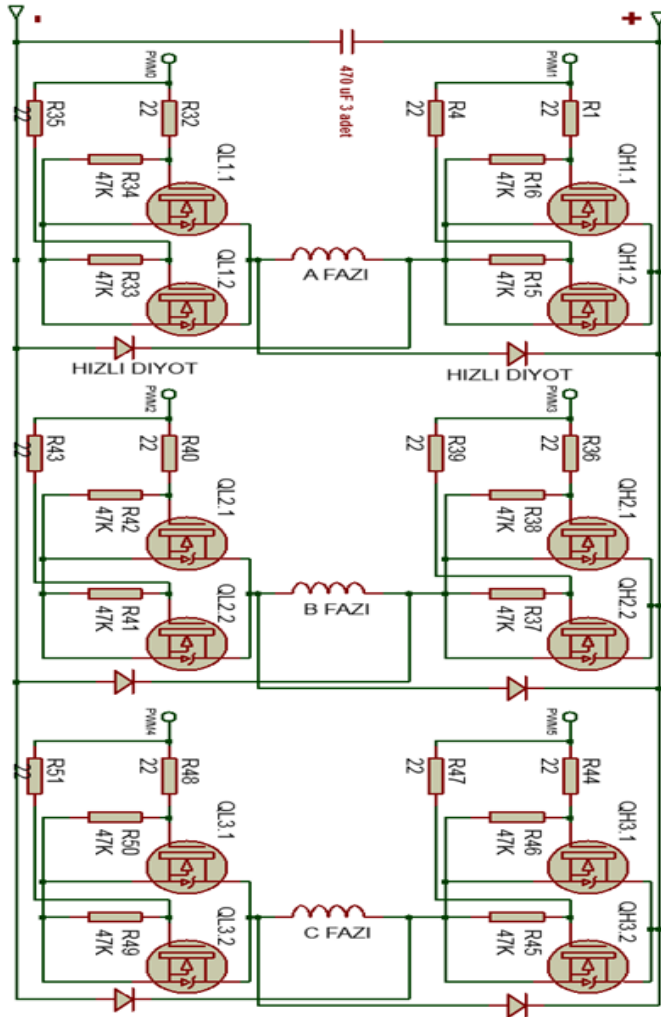


Şekil 8. 7 : Kontrol katı

Aşağıdaki Şekil 8.8'de güç katının ISIS çizimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi H köprüsünden farklı olarak alt ve üst kol mosfet grupları arasında faz

bobinleri yer almaktadır. Bu bağlantıda klasik H köprülerinde en tehlikeli durum olan alt ve üst kolun kısa devre olması ihtimalini yok etmekte ve anahtarlama kullanılan ölü zaman karmaşıklığını ortadan kaldırmaktadır.

Tez kapsamında 12/8 3 faz 1,5 kW anahtarlama relüktans tasarımı yapılarak bilgisayar ortamında Maxwell programı ile manyetik analizi yapılmıştır. Yapılan manyetik analiz sonucu elde edilen motorun karakteristik eğrileri tezde belirtilmiştir. Manyetik analiz sonucu tasarımı tamamlanan anahtarlama relüktans motoru için gerçekleştirme aşaması başlamıştır. Motorun yapımında 12000 Gauss'luk 0.5 mm kalınlığında silisli sac kullanılmıştır. Rotor ve stator gövdesi aynı sac kestirilerek yapılmıştır. Sac kesim işlemi lazer ile yapılmıştır.



Şekil 8.8 : Güç katı devresi çizimi

Sürücüde çevirici devre olarak 2n tipi klasik çevirici devre kullanılmıştır. Bunun sebebi denetimi kolay ve verimi yüksek olan çevirici devrelerinden biri



olmasıdır. Anahtarlama elemanı seçiminde düşük maliyet sağlanması için MOSFET tercih edilmiştir. Denetim PIC18F4431 Mikrodenetleyicisi ile yapılmıştır. Rotor konum algılanmasında ise H21A1 optik sensörler kullanılmıştır.

Daha sonraki çalışmalar için tork kontrolünü etkili bir şekilde sağlayabilmek için sensörsüz kontrol yöntemleri uygulanabilir. Sürücü hacminin küçültülmesi ve anahtarlama relüktans motorun sanayi sektörlerine daha hızlı adapte edilebilmesi için güç katında IGBT anahtarlama elemanları kullanılabilir.

## 9. KAYNAKLAR

- Akçayol, M.A., “Bir Anahtarlmalı Relüktans Motorun Sinirsel-Bulanık Denetimi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 5-15, (2001).
- Altınbaşak, O., *Mikrodenetleyiciler ve PIC Programlama*, İstanbul: Altaş Yayınları, (2001)
- Bacarre, R., Miller, T.J.E., “Commutation of SR Motors”, *IEEE on Trans. on Power Electronics*, Vol. 8, 250-265, (1993)
- Bose, B. K., Miller, T. J. E., Szczesny, P. M., Bicknell, W. H., “Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor”, *IEEE Transaction on Industry Applications*, (4), 708–715, (July/August,1986).
- Buja, G.S., Valla, M.I., “Control Characteristics of SRM Drives Part I: Operation in the Linear Region”, *IEEE Trans. On Ind. Electronics*, Vol.38 (1991)
- Duran, F., “Endüstriyel Çamaşır Makinelerinde Anahtarlmalı Relüktans Motor Kullanımı ve Sistemin Zeki Denetimi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-95, (2008).
- Ehsani, M., Fahimi, B., Suresh, G., Mahdavi, J., “A New Approach to Model Switched Reluctance Motor Drive; Application to Dynamic Performance Prediction Control and Design”, *Power Electronics Specialist Conference*, (1998)
- Garip, M., “Kutup Başları Şekillendirilmiş Anahtarlmalı Relüktans Motorunda Tam Kutup Adımlı Sargının Moment Dalgalılığının İyileştirilmesine Katkısı”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*,(2002).
- Gizlier, E., “Anahtarlmalı Relüktans Motorunun Manyetik Analizi ve Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 6-22, (2001).
- Gürdal, O., *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, Ankara, Atlas Yayın,(2001).
- Güvenç, U., “Anahtarlmalı Relüktans Motorun Denetimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 11-15, (2005).
- Karagöz, F., “Mikrodenetleyici Kontrollü Anahtarlmalı Relüktans Motorların Tasarımı ve Marş Motoru Olarak Kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-75, (2009).
- Kjaer, P.C., Gribble, J.J., Miller, T. J. E., “High- Grade Control of Switched Reluctance Machines”, *IEEE Transaction on Industry Applications*, (6), 1585–1593,(November/December, 1996).

Kjaer, P.C., Nielsen, P., Andersen, L., Blaabjerg, F., “A New Energy Optimizing Control Strategy for Switched Reluctance Motors”, *IEEE Transactionon Industry Applications*, (5), 1088–1095, (September/October, 1995).

Krishnan, R., *Switched Reluctance Motor Drives*, CRC Press, ( 2001).

Krishnan, R., Mang, X., Bharadwaj, A. S., *Design and Performance of Microcontroller Based Switched Reluctance Motor Drive System*, *Electric Machines and Power Systems*, 359– 373, CRC Press, (1990).

Lawrenson, P. J., Stephenson , J. M., Blenkinsop, P. T., Corda, J., Fulton, N. N., “Variable Speed Switched Reluctance Motors” , *IEE Proc.*, Vol. 127, Pt. B, No. 4, 253-265, July, (1980)

Liptak, M., “Principle of Design of Four-Phase Low-Power Switched Reluctance Machine Aimed to the Maximum Torque Production”, *Electrical Engineering Transactions*, Vol. 55, No. 5-6, 138-143,(2004).

Miller, T.J.E., McGilp, M., “Non-Linear Theory of the Switched Reluctance Motor for Rapid Computer Aided Design ”, *IEEE Proc. Part.B*, Vol.6, (1990)

Miller, T.J.E., *Switched Reluctance Motors and Their Control*, Magna Physics Publishingand Clarendon Press, Oxford, 1-50, (1993).

Miller, T.J.E., *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes Power Engineering Series, Oxford, 1-220 (2001).

Mutlu., Ü., “Anahtarlmalı Relüktans Motor Sürücü Devre Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 30-43 (2006)

Omaç, Z., Kürüm, H., Selçuk, A.H., “18/12 Kutuplu Anahtarlmalı Relüktans Motor Tasarımı, İncelenmesi ve Kontrolü”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 339-346, (2007).

Polat., K., “Anahtarlmalı Relüktans Motoru İçin Mikrodenetleyici ile Ekonomik Bir Sürücü Gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 30-40 (2010)

Stephenson, J.M., El-Khazender, M.A., “Sturation in Doubly Salient Reluctance Motors”, *IEEE Proc. Part.B*, Vol.1, (1989)

Sefa, İ., “Sliding Mode Yaklaşımı ile Anahtarlmalı Relüktans Motorun Hız Kontrolü”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 7-58, (1997).

Ünlü, M., “Anahtarlmalı Relüktans Makinasının Simülasyonu ve Dinamik Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 4-19, (2006).

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).

# **EKLER**

# 10. EKLER

## EK A

Kullanılan mosfetlerin teknik bilgileri;

### HiPerFET™ Power MOSFETs Q-Class

IXFH 15N100Q  
IXFK 15N100Q  
IXFT 15N100Q

$V_{DSS} = 1000\text{ V}$   
 $I_{D25} = 15\text{ A}$   
 $R_{DS(on)} = 0.7\ \Omega$

$t_{tr} \leq 250\text{ ns}$

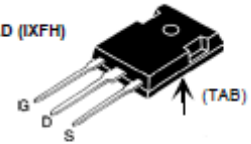
N-Channel Enhancement Mode  
Avalanche Rated, Low  $Q_g$ , High dv/dt



#### Preliminary data sheet

Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings	
$V_{DSS}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$	1000	V
$V_{DSR}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$ ; $R_{DS} = 1\text{ M}\Omega$	1000	V
$V_{GS}$	Continuous	$\pm 20$	V
$V_{GSM}$	Transient	$\pm 30$	V
$I_{DSS}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	15	A
$I_{DM}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$ , pulse width limited by $T_{JM}$	80	A
$I_{AR}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	15	A
$E_{AR}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	45	mJ
$E_{AS}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	1.5	J
dv/dt	$I_g \leq I_{gm}$ , $di/dt \leq 100\text{ A}/\mu\text{s}$ , $V_{DS} \leq V_{DSS}$ , $T_j \leq 150^\circ\text{C}$ , $R_{\theta C} = 2\ \Omega$	5	V/ns
$P_D$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	360	W
$T_j$		-55 ... +150	$^\circ\text{C}$
$T_{JM}$		150	$^\circ\text{C}$
$T_{stg}$		-55 ... +150	$^\circ\text{C}$
$T_L$	1.6 mm (0.063 in) from case for 10 s	300	$^\circ\text{C}$
$M_s$	Mounting torque	TO-247 TO-264	1.13/10 0.9/6 Nm/lb.in.
Weight		TO-247 TO-268 TO-264	6 4 10 g

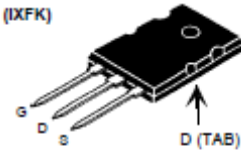
TO-247 AD (IXFH)



TO-268 (D3) (IXFT)



TO-264 AA (IXFK)



G = Gate  
S = Source

TAB = Drain

#### Features

- IXYS advanced low  $Q_g$  process
- International standard packages
- Epoxy meet UL 94 V-0, flammability classification
- Low  $R_{DS(on)}$ , low  $Q_g$
- Avalanche energy and current rated
- Fast intrinsic rectifier

#### Advantages

- Easy to mount
- Space savings
- High power density

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values ( $T_j = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
$V_{DSS}$	$V_{GS} = 0\text{ V}$ , $I_D = 250\ \mu\text{A}$	1000		V
$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}$ , $I_D = 4\text{ mA}$	3.0		V
$I_{GSS}$	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}_{DC}$ , $V_{DS} = 0$			$\pm 200\text{ nA}$
$I_{DSS}$	$V_{GS} = V_{DSS}$ , $V_{DS} = 0\text{ V}$			50 $\mu\text{A}$ 2 mA
$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}$ , $I_D = 0.5 \cdot I_{DSS}$ Pulse test, $t \leq 300\ \mu\text{s}$ , duty cycle $d \leq 2\%$			0.7 $\Omega$

## EK B

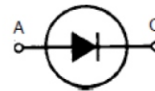
Kullanılan hızlı geri dönüşüm diyotlarının teknik bilgileri;

### Fast Recovery Epitaxial Diode (FRED)

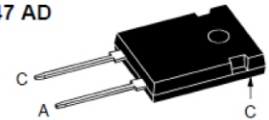
**DSEI 60**

**$I_{FAVM} = 52 \text{ A}$**   
 **$V_{RRM} = 1200 \text{ V}$**   
 **$t_{TR} = 40 \text{ ns}$**

$V_{RSM}$	$V_{RRM}$	Type
V	V	
1200	1200	DSEI 60-12A



TO-247 AD



A = Anode, C = Cathode

Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings	
$I_{FRMS}$	$T_{VJ} = T_{VJM}$	100	A
$I_{FAVM}$ ①	$T_C = 60^\circ\text{C}$ ; rectangular, $d = 0.5$	52	A
$I_{FRM}$	$t_p < 10 \mu\text{s}$ ; rep. rating, pulse width limited by $T_{VJM}$	800	A
$I_{FSM}$	$T_{VJ} = 45^\circ\text{C}$ ; $t = 10 \text{ ms}$ (50 Hz), sine	500	A
	$t = 8.3 \text{ ms}$ (60 Hz), sine	540	A
	$T_{VJ} = 150^\circ\text{C}$ ; $t = 10 \text{ ms}$ (50 Hz), sine	450	A
	$t = 8.3 \text{ ms}$ (60 Hz), sine	480	A
$I^2t$	$T_{VJ} = 45^\circ\text{C}$ ; $t = 10 \text{ ms}$ (50 Hz), sine	1250	$\text{A}^2\text{s}$
	$t = 8.3 \text{ ms}$ (60 Hz), sine	1200	$\text{A}^2\text{s}$
	$T_{VJ} = 150^\circ\text{C}$ ; $t = 10 \text{ ms}$ (50 Hz), sine	1000	$\text{A}^2\text{s}$
	$t = 8.3 \text{ ms}$ (60 Hz), sine	950	$\text{A}^2\text{s}$
$T_{VJ}$		-40...+150	$^\circ\text{C}$
$T_{VJM}$		150	$^\circ\text{C}$
$T_{stg}$		-40...+150	$^\circ\text{C}$
$P_{tot}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	189	W
$M_d$	Mounting torque	0.8...1.2	Nm
Weight		6	g

#### Features

- International standard package JEDEC TO-247 AD
- 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

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values	
		typ.	max.
$I_R$	$T_{VJ} = 25^\circ\text{C}$	$V_R = V_{RRM}$	2.2 mA
	$T_{VJ} = 25^\circ\text{C}$	$V_R = 0.8 \cdot V_{RRM}$	0.5 mA
	$T_{VJ} = 125^\circ\text{C}$	$V_R = 0.8 \cdot V_{RRM}$	14 mA
$V_F$	$I_F = 60 \text{ A}$ ; $T_{VJ} = 150^\circ\text{C}$ $T_{VJ} = 25^\circ\text{C}$		2.0 V
			2.55 V
$V_{T0}$	For power-loss calculations only		1.65 V
$r_T$	$T_{VJ} = T_{VJM}$		8.3 $\text{m}\Omega$
$R_{thJC}$	0.25		0.66 K/W
$R_{thCK}$			K/W
$R_{thJA}$			35 K/W
$t_{tr}$	$I_F = 1 \text{ A}$ ; $-di/dt = 200 \text{ A}/\mu\text{s}$ ; $V_R = 30 \text{ V}$ ; $T_{VJ} = 25^\circ\text{C}$	40	60 ns
$I_{RM}$	$V_R = 540 \text{ V}$ ; $I_F = 60 \text{ A}$ ; $-di_p/dt = 480 \text{ A}/\mu\text{s}$ $L \leq 0.05 \mu\text{H}$ ; $T_{VJ} = 100^\circ\text{C}$	32	36 A

Kullanılan mikrodenetleyicinin teknik bilgileri;



## PIC18F2331/2431/4331/4431

### 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with nanoWatt Technology, High-Performance PWM and A/D

#### 14-Bit Power Control PWM Module:

- Up to 4 Channels with Complementary Outputs
- Edge or Center-Aligned Operation
- Flexible Dead-Band Generator
- Hardware Fault Protection Inputs
- Simultaneous Update of Duty Cycle and Period:
  - Flexible Special Event Trigger output

#### Motion Feedback Module:

- Three Independent Input Capture Channels:
  - Flexible operating modes for period and pulse-width measurement
  - Special Hall sensor interface module
  - Special Event Trigger output to other modules
- Quadrature Encoder Interface:
  - 2-phase inputs and one index input from encoder
  - High and low position tracking with direction status and change of direction interrupt
  - Velocity measurement

#### High-Speed, 200 ksp/s 10-Bit A/D Converter:

- Up to 9 Channels
- Simultaneous, Two-Channel Sampling
- Sequential Sampling: 1, 2 or 4 Selected Channels
- Auto-Conversion Capability
- 4-Word FIFO with Selectable Interrupt Frequency
- Selectable External Conversion Triggers
- Programmable Acquisition Time

#### Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes up to 40 MHz
- Two External Clock modes up to 40 MHz
- Internal Oscillator Block:
  - 8 user-selectable frequencies: 31 kHz to 8 MHz
  - OSCTUNE can compensate for frequency drift
- Secondary Oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor:
  - Allows for safe shutdown of device if clock fails

#### Power-Managed Modes:

- Run: CPU on, Peripherals on
- Idle: CPU off, Peripherals on
- Sleep: CPU off, Peripherals off
- Ultra Low, 50 nA Input Leakage
- Idle mode Currents Down to 5.8  $\mu$ A, Typical
- Sleep Current Down to 0.1  $\mu$ A, Typical
- Timer1 Oscillator, 1.8  $\mu$ A, Typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer (WDT), 2.1  $\mu$ A, typical
- Oscillator Two-Speed Start-up
  - Fast wake from Sleep and Idle, 1  $\mu$ s, typical

#### Peripheral Highlights:

- High-Current Sink/Source 25 mA/25 mA
- Three External Interrupts
- Two Capture/Compare/PWM (CCP) modules
- Enhanced USART module:
  - Supports RS-485, RS-232 and LIN/J2602
  - Auto-wake-up on Start bit
  - Auto-Baud Detect

#### Special Microcontroller Features:

- 100,000 Erase/Write Cycle Enhanced Flash Program Memory, Typical
- 1,000,000 Erase/Write Cycle Data EEPROM Memory, Typical
- Flash/Data EEPROM Retention: 100 Years
- Self-Programmable under Software Control
- Priority Levels for Interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
  - Programmable period from 41 ms to 131s
- Single-Supply In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via Two Pins
- In-Circuit Debug (ICD) via Two Pins:
  - Drives PWM outputs safely when debugging

Device	Program Memory		Data Memory		IO	10-Bit A/D (ch)	CCP	SSP		EUSART	Quadrature Encoder	14-Bit PWM (ch)	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)				SPI	Slave I <sup>2</sup> C™				
PIC18F2331	8192	4096	768	256	24	5	2	Y	Y	Y	Y	6	1/3
PIC18F2431	16384	8192	768	256	24	5	2	Y	Y	Y	Y	6	1/3
PIC18F4331	8192	4096	768	256	36	9	2	Y	Y	Y	Y	8	1/3
PIC18F4431	16384	8192	768	256	36	9	2	Y	Y	Y	Y	8	1/3



# EK D

Kullanılan optokuplörlerin teknik bilgileri;

**TOSHIBA**

TLP250

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

## TLP250

Transistor Inverter

Inverter For Air Conditionor

IGBT Gate Drive

Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.

This unit is 8-lead DIP package.

TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current:  $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current ( $I_{CC}$ ):  $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage ( $V_{CC}$ ):  $10\text{--}35\text{V}$
- Output current ( $I_O$ ):  $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time ( $t_{pLH}/t_{pHL}$ ):  $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage:  $2500V_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type

VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823

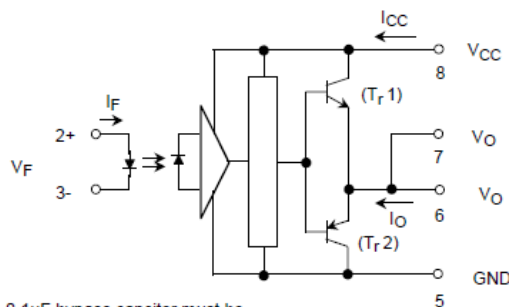
Maximum operating insulation voltage:  $630V_{\text{PK}}$

Highest permissible over voltage:  $4000V_{\text{PK}}$

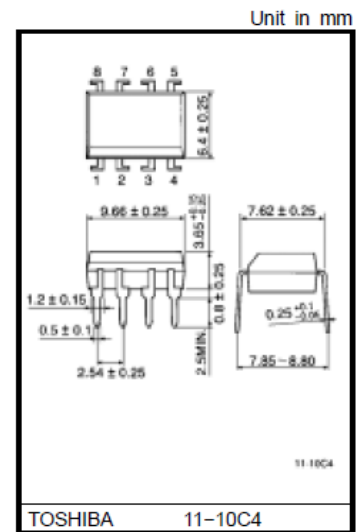
**(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"**

- Creepage distance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$
- Clearance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$

### Schmatic

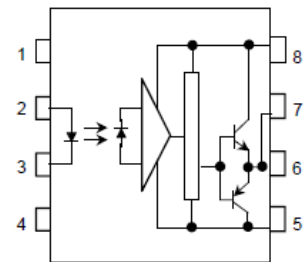


A  $0.1\mu\text{F}$  bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5. (See Note 5).



TOSHIBA 11-10C4  
Weight: 0.54 g

### Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 :  $V_O$  (Output)
- 7 :  $V_O$
- 8 :  $V_{CC}$

### Truth Table

	Tr1	Tr2
Input LED On	On	Off
Input LED Off	Off	On

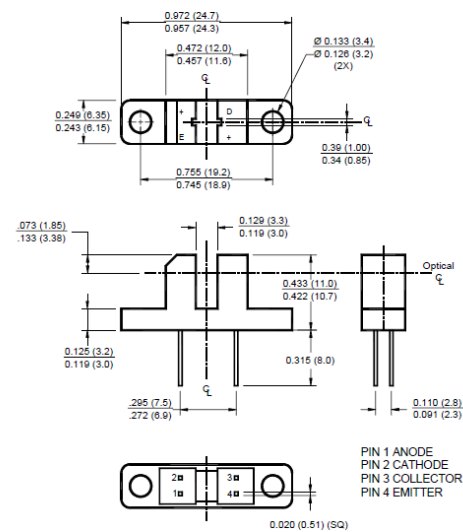
EK E

Kullanılan konum algılama sensörlerinin teknik bilgileri;



## H21A1 / H21A2 / H21A3 PHOTOTRANSISTOR OPTICAL INTERRUPTER SWITCH

### PACKAGE DIMENSIONS

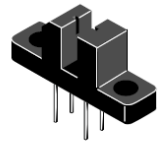


**NOTES:**

1. Dimensions for all drawings are in inches (mm).
2. Tolerance of  $\pm .010$  (.25) on all non-nominal dimensions unless otherwise specified.

### DESCRIPTION

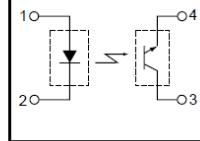
The H21A1, H21A2 and H21A3 consist of a gallium arsenide infrared emitting diode coupled with a silicon phototransistor in a plastic housing. The packaging system is designed to optimize the mechanical resolution, coupling efficiency, ambient light rejection, cost and reliability. The gap in the housing provides a means of interrupting the signal with an opaque material, switching the output from an "ON" to an "OFF" state.



### FEATURES

- Opaque housing
- Low cost
- .035" apertures
- High  $I_{C(ON)}$

### SCHEMATIC



1. Derate power dissipation linearly 1.33 mW/°C above 25°C.
2. RMA flux is recommended.
3. Methanol or isopropyl alcohols are recommended as cleaning agents.
4. Soldering iron tip 1/16" (1.6mm) minimum from housing.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)			
Parameter	Symbol	Rating	Unit
Operating Temperature	$T_{OPR}$	-55 to +100	°C
Storage Temperature	$T_{STG}$	-55 to +100	°C
Soldering Temperature (Iron) <sup>(2,3 and 4)</sup>	$T_{SOL-I}$	240 for 5 sec	°C
Soldering Temperature (Flow) <sup>(2 and 3)</sup>	$T_{SOL-F}$	260 for 10 sec	°C
<b>INPUT (EMITTER)</b>			
Continuous Forward Current	$I_F$	50	mA
Reverse Voltage	$V_R$	6	V
Power Dissipation <sup>(1)</sup>	$P_D$	100	mW
<b>OUTPUT (SENSOR)</b>			
Collector to Emitter Voltage	$V_{CEO}$	30	V
Emitter to Collector Voltage	$V_{ECO}$	4.5	V
Collector Current	$I_C$	20	mA
Power Dissipation ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ ) <sup>(1)</sup>	$P_D$	150	mW

## EKF

Denetimde kullanılan yazılım kodları;

```
/*PWM0==>FAZ A'YI KONTROL EDECEK
```

```
PWM1==>FAZ B'YI KONTROL EDECEK
```

```
PWM2==>FAZ C'YI KONTROL EDECEK*/
```

```
sbit sens1 at rc0_bit ; // sensör girişleri tanımlanıyor
```

```
sbit sens2 at rc1_bit ;
```

```
sbit sens3 at rc2_bit ;
```

```
unsignedadc_rd=0, dutyl=0, dutyh=0;
```

```
voidadc_oku() // ADC okuma fonksiyonu
```

```
{ ADCON0 = 0x21;//analog enable, continuousloopmodeenable
```

```
ADCON1 = 0x18; //FIFO empty, FIFO enable
```

```
ADCON2 = 0x88; //Right justified, delay time=2TAD
```

```
ADCHS = 0x00;//AN kanal seçim kaydedicisi
```

```
ANSEL0 = 0x01;//AN0 pini analog giriş olarak ayarlandı
```

```
ANSEL1 = 0x00;//analog pin aktif edildi
```

```
}
```

```
voidInitx() PWM üretme fonksiyonu
```

```
{ /*ANSEL0 = 0;
```

```
ANSEL1 = 1;*/
```

```
INTCON = 0; //tüm kesmeler kapalı
```

```
INTCON2= 0; //kenar tetikleme kesmeleri kapalı
```

```
ADCON3 = 0; //darbe üretme kaynakları kapalı
```

```
PTCON0 = 0; //PWM free-runningmodda, prescale1:1, postscale 1:1
```

```
PTCON1 = 0b10000000; //PWM time base on
```

```

PWMCON0= 0b01000111; //<PWM0;PWM5> PWM çıkışı için enable
PWMCON1.UDIS=0; //duty cycleregisterenable
PWMCON1.OSYNC=1; //OVDCON ile PWM senkronize
PTPERL = 0x38; //duty değeri ayarı
PTPERH = 0x01;
TRISB = 0; //port B çıkış
PORTB = 0; //port B sıfırlandı
TRISC = 1; //port C giriş
PORTC=0; //port C sıfırlandı
}
void duty_ayar()
{
adc_rd = adc_read(0); adc_rd = adc_rd*1.21875;
duty_l = adc_rd; duty_h=adc_rd>>8; //adc_rd>>2;
PDC0L = duty_l;
PDC1L = duty_l;
PDC2L = duty_l;
PDC0H = duty_h;
PDC1H = duty_h;
PDC2H = duty_h;
}
void main()
{ //oscon=0x70; // 8MHz dahili osilör frekansı ayarlandı
Initx();
adc_oku();

```

```

while(1)

{if((sens1) && (sens2)&& (!sens3) ) //üçüncü faz ON

{

duty_ayar();

        OVDCOND = 0b00110000; //PWM çıkış register ayarı
        OVDCONS = 0b00000000; //PWM çıkış durum bitleri

}

elseif((sens1)&&!sens2)&&!sens3) //ikinci faz ON

{

duty_ayar();

        OVDCOND = 0b00001100;
        OVDCONS = 0b00000000;

}

else if((sens1)&&!sens2)&&(sens3)) //birinci faz ON

{

duty_ayar();

        OVDCOND = 0b00000011;
        OVDCONS = 0b00000000;

}

else if(!sens1)&&!sens2)&&(sens3)) //üçüncü faz ON

{

duty_ayar();

        OVDCOND = 0b00110000;
        OVDCONS = 0b00000000;

}

```

```

else if(!sens1)&&(sens2)&&(sens3) //ikinci faz ON
{
duty_ayar();

        OVDCOND = 0b00001100;
        OVDCONS = 0b00000000;
}

else if(!sens1)&&(sens2)&&!sens3) //birinci faz ON
{
duty_ayar();

        OVDCOND = 0b00000011;
        OVDCONS = 0b00000000;
}

else
{duty_ayar();

        OVDCOND = 0b00000000;
        OVDCONS = 0b00000000;
}
}
}
}

```

## 11. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Cihangir YAVUZ

Doğum Yeri ve Tarihi :Dörtyol/HATAY

Lisans Üniversite :Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta :ccihangir.yavuz@hotmail.com

İletişim Adresi :Çaylı Mahallesi Ahu Sokak NO:32  
Dörtyol/HATAY