

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MIKNATISLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNESİNİN
KONTROLÜ VE PERFORMANS ANALİZİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Faruk DURAK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MIKNATISLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNESİNİN
KONTROLÜ VE PERFORMANS ANALİZİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Faruk DURAK
(504121012)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fuat KÜÇÜK

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504121012 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Faruk DURAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MIKNATISLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNESİNİN KONTROLÜ VE PERFORMANS ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd.Doç. Dr. Fuat KÜÇÜK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr.Feriha Erfan KUYUMCU**
Kocaeli Üniversitesi

Yrd.Doç. Dr. Deniz YILDIRIM
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Kasım 2016
Savunma Tarihi : 19 Aralık 2016





Aileme,



ÖNSÖZ

Sanayideki uygulamalarda herhangi bir ürün kullanılırken her zaman fiyat-performans ilişkisi, sağlamlık, verim, güvenilirlik gibi veriler göz önünde bulundurulur. Araştırmalar her zaman bu verileri iyileştirmek için, daha iyilerini tasarlamak ve üretmek için yapılmaktadır. 1970 yılına kadar DC motor ve sürücüler endüstrinin bu ihtiyaçlarına cevap vermiştir. Bu yıllarda yarı iletken fiziğindeki ilerlemelere paralel olarak asenkron motorun evirici ile sürüş tekniği de daha da uygulanabilir olmuş ve DC motor ve sürücülere en büyük rakip olarak gelişimini hızlı bir şekilde sürdürmüştür. İlerleyen yıllarda yarı iletken anahtarlar ve mikro işlemci teknolojisindeki gelişmeler dâhilinde değişken hızlı uygulamalar için asenkron motorlar sanayide vazgeçilmez olmuştur.

Elektrik motorlarının tarihçesine baktığımızda aslında çok uzun yıllardır yeni motorların geliştirilemediğini görürüz. Şu anda sanayide çalışan sistemlerdeki elektrik motorlarının büyük bir kısmının asenkron motor olduğunu görürüz. Teorik olarak incelendiğinde Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) sanayinin güvenilirlik, sağlamlık, ucuz maliyet vb. konularda isteklerini karşılayacak özellikte olduğunu görürüz. Elbette ki yeni bir motoru sanayinin kullanımına sunmak ve insanlara kendini ispatlamış asenkron motoru değil de anahtarlamalı relüktans motoru kullanmalarını önermek için çok iyi nedenlerinizin olması gerekir. İşte bu tezde ilham kaynağı tamamen bu olmuştur. Çünkü anahtarlamalı relüktans motorlar üstün özellikleri sayesinde yakın gelecekte değişken hızlı uygulamalar için vazgeçilmez olacaktır. Uzay sanayisi, otomotiv sanayi, havalandırma sistemleri, konveyörler, asansör tahrik sistemlerinden hız kontrolünün yapıldığı her türlü uygulamada ARM'ler her zaman öncelikli olacaktır.

Endüstrinin özel ihtiyaçlarına cevap verebilecek nitelikteki anahtarlamalı relüktans motorlar hakkındaki bu çalışmanın diğer çalışmalara yol gösterici olması en büyük dileğimdir.

Başta değerli tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Fuat KÜÇÜK'e, değerli katkılarından dolayı arkadaşım Nazire BİLGİLİ'ye, sonsuz emekleri olan değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2016

Faruk DURAK
(Elektrik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	5
1.2 Literatür Araştırması	6
2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR	9
2.1 ARM Yapısı.....	9
2.2 ARM Temel Çalışma Prensibi	9
2.3 Motor Olarak Çalışma	14
2.4 Jeneratör Olarak Çalışma.....	14
2.5 Kuvvet Oluşumu Prensibi.....	15
2.6 Eşdeğer Devre	18
2.7 Anahtarlama Relüktans Makinesindeki Kayıplar	20
3. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNESİNİN FEMM ANALİZİ	21
3.1 Anahtarlama Relüktans Motor FEMM Tasarımı	21
3.2 FEMM Verilerinin Elde Edilmesi	24
3.3 FEMM Analiz Sonuçları.....	25
4. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNESİNİN MATLAB MODELİ 39	
4.1 ARM Elektriksel Model	39
4.2 Mekanik Model	41
4.3 Kontrol Sinyallerinin Oluşturulması	42
4.3.1 Rotor pozisyonunun $0^\circ - 90^\circ$ arasına sınırlandırılması.....	42
4.3.2 Referans iletime ve kesime girme zamanı sinyallerinin oluşturulması.....	42
4.4 Anahtarlama Relüktans Motor Kontrolü	43
4.5 Anahtarlama Relüktans Motor Akım Kontrolü	44
4.6 Anahtarlama Relüktans Motor Hız Kontrolü	44
4.7 Konverter Modeli	46
5. ANALİZ SONUÇLARI	53
5.1 Sürekli Hal Analizi.....	53
5.2 ARM Ve SMARM Dinamik Davranışı.....	56
5.3 ARM ve SMARM Arıza Analizi	59
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
EKLER	67
ÖZGEÇMİŞ	81



KISALTMALAR

AC	: Alternative Current
AHB	: Asymmetric Half Bridge
ARM	: Anahtarlamalı Relüktans Motor
ARG	: Anahtarlamalı Relüktans Jeneratör
BDC	: Bottom Dead Center
DC	: Direct Current
DS	: Doubly Salient
FEMM	: Finite Element Method Magnetics
PM	: Permanent Magnet
PWM	: Pulse Width Modulation
SMARM	: Sürekli Miknatıslı Anahtarlamalı Relüktans Motor
SMARG	: Sürekli Miknatıslı Anahtarlamalı Relüktans Jeneratör
TDC	: Top Dead Center



SEMBOLLER

B	: Sürtünme Katsayısı
e	: İndüklenen Gerilim
F	: Kuvvet
L	: İndüktans
V	: Gerilim
ω	: Açısal Hız
T_e	: Elektromanyetik moment
T_m	: Mekanik moment
W_e	: Elektrik Enerjisi
W_f	: Elektrik Alanda Depolanan Enerji
N	: Sarım Sayısı
i	: Akım
ϕ	: Akı
θ	: Konum
d/dt	: Zamana Göre Türev
δW_e	: Kısmi Türev
λ	: Halkalama Akısı
R_s	: Stator Sargı Direnci
t	: Zaman
P_a	: Hava Aralığındaki Güç
s	: Laplace Transformasyonu
J	: Atalet Momenti
i_{ref}	: Akım Referansı
n_{ref}	: Hız Referansı
Δi_{hata}	: Akım Hatası
$i_{a,b,c}$: A, B, C Faz Akımları
T_{on}	: İletime Girme Zamanı
T_{off}	: Kesime Girme Zamanı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Hizalı ve hizasız konum için karşılaştırma	14
Çizelge 3.1 : Motora ait yapısal veriler	21
Çizelge 3.2 : Belirli uyartım akımında A, B, C fazları akı değerleri.	24
Çizelge 3.3 : Belirli uyartım akımında A, B, C fazları moment değerleri.....	25
Çizelge A.1 : SMARM Hizalı durum için 3 faz motor değerleri.....	68
Çizelge A.2 : SMARM 9 derece için 3 faz motor değerleri	68
Çizelge A.3 : SMARM 15 derece için 3 faz motor değerleri	69
Çizelge A.4 : SMARM 30 derece için 3 faz motor değerleri	69
Çizelge A.5 : SMARM 45 derece için 3 faz motor değerleri	70
Çizelge A.6 : SMARM Akı-Rotor konumuna karşılık moment tablosu.....	72
Çizelge A.7 : SMARM Akı-Rotor konumuna karşılık akım tablosu.....	74
Çizelge A.8 : ARM Akı-Rotor konumuna karşılık moment tablosu.....	76
Çizelge A.9 : ARM Akı-Rotor konumuna karşılık akı tablosu.....	78



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Anahtarlamalı Relüktans Motor.	2
Şekil 2.1: 6/4 Yapıdaki ARM 3 boyutlu gösterimi.	9
Şekil 2.2: ARM kesiti.	10
Şekil 2.3: TDC noktasında ARM kesiti.	11
Şekil 2.4: TDC noktası sonrası ARM kesiti.	11
Şekil 2.5: BDC noktasında ARM kesiti.	12
Şekil 2.6: Rotor konumuna göre indüktans ve moment grafikleri.	13
Şekil 2.7: Selenoid sistemde kuvvet oluşumu prensibi.	15
Şekil 2.8: ARM tek faz için basit eşdeğer devre.	18
Şekil 3.1 : ARM AutoCad çizimi.	22
Şekil 3.2 : FEMM programında analiz edilen motorlar: (a) ARM. (b) SMARM.	22
Şekil 3.3 : Uyarım olmadan SMARM’da oluşan akı: (a) Akı yönü. (b) Akı yoğunluğu.	23
Şekil 3.4 : ARM’da A fazının 6 A ile uyarımı sonucu oluşan akı yönleri: (a) hizalı. (b) Hizasız.	26
Şekil 3.5 : ARM’da B fazının 6 A ile uyarımı sonucu oluşan akı yönleri: (a) Hizalı. (b) Hizasız.	26
Şekil 3.6 : ARM’da C fazının 6 A ile uyarımı sonucu oluşan akı yönleri: (a) Hizalı. (b) Hizasız.	27
Şekil 3.7 : B-H mıknatıs Eğrileri.	27
Şekil 3.8 : SMARM’da A fazının 6 A ile uyarılması durumunda oluşan akı yönleri: (a) Hizalı. (b) Hizasız.	28
Şekil 3.9 : SMARM’da B fazının 6 A ile uyarılması durumunda oluşan akı yönleri: (a) Hizalı. (b) Hizasız.	28
Şekil 3.10 : SMARM’da C fazının 6 A ile uyarılması durumunda oluşan akı yönleri: (a) Hizalı. (b) Hizasız.	29
Şekil 3.11 : ARM’un A Fazı hizalı iken 6 A ile uyarımda akı yoğunluğu.	29
Şekil 3.12 : ARM $\theta = 25^\circ$ ve A fazı 6 A ile uyarımla akı yoğunluğu.	30
Şekil 3.13 : ARM A fazı hizasız konum ve 6 A ile uyarımla akı yoğunluğu.	30
Şekil 3.14 : SMARM A fazı hizalı konum ve 6 A ile uyarımla akı yoğunluğu.	31
Şekil 3.15 : SMARM A fazı $\theta = 25^\circ$ ve 6 A ile uyarımlı iken akı yoğunluğu.	32
Şekil 3.16 : SMARM hizasız konum ve 6 A ile uyarımla akı yoğunluğu.	32
Şekil 3.17 : 0,09 Wb akı oluşturmak için ARM ve SMARM akım-rotor konumu.	33
Şekil 3.18 : ARM ve SMARM moment grafikleri.	33
Şekil 3.19 : ARM ve SMARM sargı indüktansı-rotor konumu grafiği.	34
Şekil 3.20 : ARM akım Look-up grafiği.	35
Şekil 3.21 : SMARM akım look-up grafiği.	35
Şekil 3.22 : ARM moment look-up grafiği.	36
Şekil 3.23 : SMARM moment look-up grafiği.	36
Şekil 3.24 : ARM akım karakteristiği.	37
Şekil 3.25 : ARM moment karakteristiği.	37
Şekil 3.26 : SMARM akım karakteristiği.	38

Şekil 3.27 : SMARM moment karakteristiği.....	38
Şekil 4.1: ARM tek faz modeli.....	40
Şekil 4.2: ARM 3 faz modeli ve toplam elektriksel moment.....	40
Şekil 4.3: ARM mekanik model.	41
Şekil 4.4: Rotor pozisyonunu $0^{\circ} - 90^{\circ}$ arasına sınırlandırılması.	42
Şekil 4.5: Rotor konumuna göre A fazının referans sinyalinin belirlenmesi.	43
Şekil 4.6: A Fazı rotor konumu ve referans sinyali grafiği.	43
Şekil 4.7: Akım kontrol blok şeması.....	44
Şekil 4.8: ARM Hız kontrol bloğu.....	45
Şekil 4.9: A fazı akım histeresiz çıkışı.....	45
Şekil 4.10: Hız PWM çıkışı.....	46
Şekil 4.11: AHB konverterin tez faz için uygulandığı.	47
Şekil 4.12: AHB konverter dalga şekilleri.	48
Şekil 4.13: A Fazı rotor konumu ve fazlara uygulanan gerilim.	49
Şekil 4.14: AHB konverter Simulink modeli.	49
Şekil 4.15: 3 Fazlı AHB konverter simulink modeli.	50
Şekil 4.16: Anahtarlamalı relüktans motor simulink modeli.	51
Şekil 5.1: ARM Sürekli halde A fazı akımı.	53
Şekil 5.2: 3,5 N.m yük altında ARM ve SMARM Moment grafiği.	54
Şekil 5.3: 3,5 N.m yük altında SMARM ve ARM hız grafikleri.	54
Şekil 5.4: 3 N.m yük altında ARM ve SMARM Güç grafiği.....	55
Şekil 5.5: ARM ve SMARM kalkış anındaki güç grafikleri.	56
Şekil 5.6: Dinamik yük momenti karakteristiği.....	57
Şekil 5.7: ARM değişken yük altında çekilen akımlar.	58
Şekil 5.8: Değişken yük altında ARM ve SMARM hız grafiği.....	58
Şekil 5.9: Değişken yük altında ARM ve SMARM güç grafiği.....	59
Şekil 5.10: A fazı besleme gerilimi dalga şekli (1-3,5 sn arası arıza durumu).....	60
Şekil 5.11: A fazı arızası durumunda ARM ve SMARM hız grafiği.	60
Şekil 5.12: A fazı arızası durumunda fazlara ait akım grafiği.....	61
Şekil 5.13: A Fazı arızası durumunda ARM moment grafiği.	61
Şekil 5.14: A fazı arızası durumunda SMARM güç grafiği.....	62
Şekil 5.15: ARM ve SMARM A fazı arızası durumu detay grafiği.	62

MIKNATISLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNESİNİN KONTROLÜ VE PERFORMANS ANALİZİ

ÖZET

Anahtarlamalı Relüktans Makinesi (ARM) asenkron ve senkron makinelere kıyasla daha basit yapılı, daha sağlam ve üretimi daha ucuz bir makinedir. ARM'ler değişken hızlı uygulamalarda yüksek performans sağlar. Rotorunda sargı olmaması nedeniyle ARM'nin verimi aynı güçteki asenkron ve senkron makinelerden daha yüksek olabilmektedir. Sargısız rotorun bir diğer avantajı ise atalet momentinin oldukça düşük olması ve yüksek hız seviyelerine kolayca çıkabilmesidir.

ARM'nin yukarıda bahsedilen avantajlarına rağmen analitik modelleme yapılması oldukça zordur. Günümüzde tasarım ve analizi bilgisayar üzerinde koşturulan sonlu elemanlar tabanlı yazılımlar ile yapılmaktadır. Klasik ARM'ler üzerine yapılmış pek çok çalışma mevcut olmakla beraber bunların çoğunluğu ticarileşme fırsatı bulamamıştır. ARM'nin maliyetinin asenkron ve senkron makinelere göre çok düşük olmasına rağmen ihtiyaç duyduğu güç elektroniği sürücü devresinin piyasada seri üretiminin bulunmamasının getirdiği maliyet artışı mevcuttur. ARM'ler üzerine yapılan çalışmalar arttıkça yakın gelecekte sözkonusu maliyet artışının önleyecek yöntemler geliştirilebileceği ve böylece ARM'lerin özellikle değişken hız uygulamalarında tercih edilebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın motivasyon kaynağını ARM'lerde ciddi bir maliyet artışına neden olmadan güç üretiminin arttırılabileceği düşüncesi oluşturmuştur. Güç ve moment artışı klasik ARM'deki stator üzerine yerleştirilen maliyeti ucuz mıknatıslar sayesinde sağlanmıştır. Bu mıknatısların sağladığı diğer avantajlar ise klasik ARM'nin hız cevabını, moment dalgalılığını iyileştirmesi ve faz arızası esnasında devamlı dönüşü sağlayacak yeterli moment üretimine olanak sağlamasıdır. Yapılan çalışma neticesinde ARM'nin yapısında ucuz mıknatıslar yerleştirilerek performansının arttırılabileceği ve aynı zamanda güvenilirliğinin daha da iyileştirilebileceği görülmüştür.

Bu çalışmada, 1. bölümde tezin literatürdeki yeri ve çalışmanın amacı verilmiş daha sonra 2.Bölümde ARM'ler hakkında teorik bilgi verilmiştir. 3. Bölümde; 6/4 yapıdaki bir ARM ile yine aynı motorda statora Alnico-5 mıknatıs yerleştirilerek elde edilmiş SMARM'nin AutoCAD programı ile yapılmış çizimleri verilmiştir. Tasarlanan bu iki motorun FEMM programı aracılığıyla manyetik analizi yapılmıştır. FEMM programında ilk önce belirli bir akı ve rotor konumunda iken motorda oluşan akım ve moment daha sonra bu değerler ile iki boyutlu akı ve moment tabloları oluşturulmuştur.4. bölümde motor ve asimetric yarım köprü doğrultucunun matematiksel olarak modelleri Simulink de oluşturulmuş ve FEMM den alınan akı ve moment tabloları kullanılarak oluşturulan model yardımıyla motorların çalışması incelenmiştir. Oluşturulan modelde akım ve hız kontrolleri uygulanmıştır. Daha sonra 5. Bölümde sürekli halde, değişken yük koşullarında ve son olarak arıza durumunda analiz yapılmıştır. Sonuç kısmında ise standart ARM'de mıknatıs kullanılması durumunda motorda olan iyileştirmeler belirtilmiş ve öneri olarak SMARM'nin geleceği üzerinde yorumlarda bulunulmuştur.



CONTROL AND PERFORMANCE ANALYSIS OF PERMANENT MAGNET SWITCHED RELUCTANCE MACHINE

SUMMARY

Switched Reluctance Machines (SRMs) comes to the fore with its simplicity and robustness. Their manufacturing cost are relatively lower than their counterparts, induction and synchronous machines. SRMs can show high performance within a wide speed range and thus very suitable for variable speed applications. Owing to absence of winding on rotor, their efficiencies can be higher than Induction and Synchronous Machines with same power range. The other advantage of winding-less rotor is that rotor inertia is low. Thus, the SRM responses to instant speed change very fast and can be run at maximum speed levels that its counterparts never reach.

Like synchronous machines, SRMs runs at synchronous speed. The continuous rotation can be achieved by synchronizing excitation current pulses with rotor position. Although their basic characteristics are quite similar to the separately excited DC machines, they do not possess a brush-commutator assembly.

SRMs are highly nonlinear machines due to salient structures of both stator and rotor. Therefore, obtaining their analytical model for all operation range is extremely hard. Today, their design and analysis are carried out by using finite element based computer aided tools. A large amount of researches have been done on the design and control strategies of SRMs. However, most of them could not find a chance to be commercialized. Although an SRM itself has lower cost than its counterparts, a power electronic drive circuit usually required to be run. The problem is that possible drive circuit topologies are not serially produced as package. Therefore, the user should individually construct the required drive circuit, which inevitably increases the drive circuit cost. As the researches on SRMs increase, some possible methods may be developed for reducing the overall machine cost so that the SRMs can be more preferable, especially for variable speed applications.

Recently, most of the researches on SRMs focus on improving the performance of the SRM in the control stage rather than improvement in the machine design stage. Therefore, investigations on SRM design are still limited and there is a need for filling this gap.

The motivation of this thesis relies on the idea that may allow to increase power capability of SRMs without serious increase in manufacturing cost. The increase in power as well as in torque can be obtained by inserting permanent magnets on stator of a classical SRM. Placing permanent magnets on stator does not affect rotor inertia. Thus, constructed permanent magnet machine still shows the feature of low inertia. The other advantages of using permanent magnets are to improve speed response and reduce torque ripples. Additionally, these magnets can significantly improve the developed torque in the machine during a possible failure in a phase and let the machine continuously rotate and thus increase reliability of the SRM.

Although various type permanent magnets are available in the market, NdFeB magnets, which are rare-earth type magnets, are predominantly used in the design of permanent magnet machines. This is because NdFeB magnets have high residual flux as well as high resistance to demagnetization. However, NdFeB magnets are very expensive and thus inevitable increase the design cost of permanent magnet machines. Therefore, alternative magnets should be investigated for SRM application.

Analysis in this research demonstrates that a permanent magnet switched reluctance machine (PMSRM) can possess the mentioned advantages by using cheap permanent magnets rather than using expensive magnets such NdFeB magnets. Among the alternative magnets, Alnico magnets, which are non-rare earth type magnets, have potential to be used for performance increase since their residual flux is as high as those of NdFeB magnets and their price are much lower than NdFeB magnets. The main drawback of Alnico magnets is that they can be easily demagnetized with a reverse magnetic field. Reverse magnetic field in an electric machine often occurs when there are bidirectional current flows through windings. However, SRMs are often controlled in a way that phase windings carry unidirectional current. An Asymmetric Half Bridge (AHB) converter, which is accepted to be classical converter SRMs, is suitable for PMSRM as well. It provides natural protection for Alnico magnets while allowing an independent phase control.

In order to investigate static characteristics of PMSRM, a 6/4 version has been designed and analyzed in FEMM. Current and rotor position has been taken as reference parameters to obtain flux and torque tables. These data are then employed to form a model to be used for further analysis of designed PMSRM in Matlab/Simulink. A control unit, drive circuit as well as machine model has been constructed for 6/4 PMSRM in order to investigate its dynamic behavior at various operation conditions. The PMSRM has been controlled through a AHB converter whose gate signals are generated by considering current and speed control. A current control loop is built on the basis of hysteresis current control algorithm. On the other hand, a PWM algorithm has been used to achieve speed control. Both classical SRM and PMSRM are simulated with the same conditions to verify the effectiveness of using permanent magnets. The simulation results demonstrate that PMSRM has superiorities on the classical SRM. Besides a power increase is observed, the torques ripples due to nature of the machine has been remarkably reduced. Another advantage of using permanent magnets has been observed at transient speed response, which means PMSRM has better acceleration and deceleration behavior.

The works in this thesis has been organized as 6 sections:

In the first section, history of SRM has been firstly summarized and then previous researches on SRMs has been briefly mentioned and criticized. Some important industrial applications of SRMs has been given. The current researches and design trends on SRMs have been discussed. The need of designing a new type SRM machine is well described and motivation of this thesis has been highlighted.

The second section has been reserved for theoretical explanation of SRMs. The general structure as well as operating principle of SRMs have been introduced and related equivalent circuit and mathematical expressions have been given. The possible converter topologies that are required to operate SRMs have been also mention in this section.

Third section gives the design and analysis stages of a 6/4 SRM and PMSRM via finite element based software called FEMM. The technical and magnetic specifications of

both machines have been also given in this section. The conditions of static magnetic analysis have been well described and methods of obtaining flux and torque tables have been explained. Additionally, the magnetic behavior of both machines have been examined and comparatively given to make further discussion.

In the fourth section, overall Matlab/Simulink model of SRM/PMSRM simulation has been given. Particularly, constructing a dynamic model of PMSRM together with AHB converter and applied control algorithms have been introduced. Each part of modeling employed in Matlab/Simulink has been thoroughly illustrated and discussed. The way of obtaining proper gate signals for converter switches have been well described.

In the fifth section, simulation results for various conditions have been discussed in detail. The effects of using permanent magnets in the machine has been thoroughly investigated. The reasons of improved performance in the case of PMSRM have been well addressed. Additionally, the fault tolerant analysis results of both machines have been given and they have been comparatively discussed in detail.

The last section has been reserved for conclusion. Superiorities and design constraints of PMSRM have been discussed. Comments on possible improvements on the results and future work on this thesis has been clearly stated.

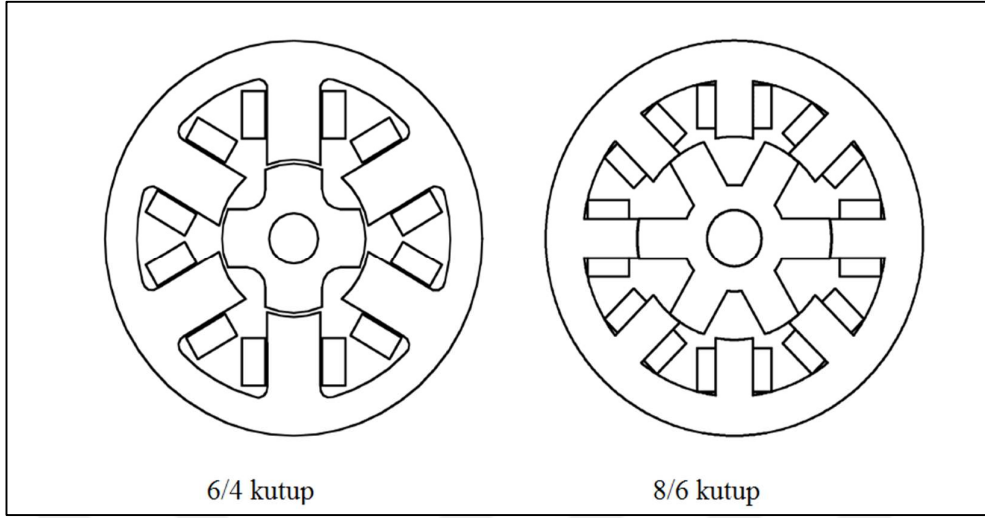


1. GİRİŞ

Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM) aslında Senkron makinenin bir türü olmasına rağmen Senkron makine ile arasında belirli bazı farklar bulunmaktadır. ARM’de stator çıkık kutuplarında sargılar bulunur ve rotorunda sargı, mıknatıs vs. bulunmaz. Bu makinede stator ve rotor çıkık kutupludur. Şekil 1.1’de tipik bir ARM örneği görülmektedir [1].

Relüktans motorlarda hava aralığındaki relüktans değişiminden dolayı moment üretimi olur. Rotor her zaman uyarılan sargının indüktansı maksimum olacak pozisyona gelme eğilimindedir. Burada hareket dönme ya da lineer olabilir ve rotor içte (Şekil 1.1) ya da dışta olabilir. Rotor ve stator çok laminasyonlu olarak üretilir ve rotorda sargı ya da mıknatıs yoktur. Yapısal basitliği bu motoru cazip yapan önemli bir etkidir [2]. Üretim maliyetleri diğer motorlara nazaran daha azdır ve aynı zamanda dayanıklılık, güvenilirlik bakımından da diğer motorlardan üstündür. Motorun rotoru sargısız olmasından dolayı, rotorda ısı kayıp yoktur ve bundan dolayı verim yüksektir. Rotorda ısı kayıp olmamasından dolayı bu motoru soğutmak oldukça kolaydır. Sıcak çalışma şartlarında, bu özellik sayesinde ARM birçok motora göre avantaj sağlar.

Senkron Relüktans motor, anahtarlamalı Relüktans motor ve relüktans step motor birbirine benzer yapıdadır ancak aralarında önemli farklar vardır. ARM ve relüktans step motor yapısal olarak birbirinin aynısıdır [3]. Bu iki motorda ilk bakışta iki önemli fark göze çarpar. Bunlardan birincisi anahtarlamalı relüktans motorda fazları ateşleme açısı rotor konumuna göre yapılır. Bunun için bu motorda enkoder ya da rotorun pozisyonunun bilgisini verebilecek herhangi bir sensör kullanmak gerekir. Sadece bu açıdan bakınca ARM aslında PM fırçasız DC motor gibidir. Step motorda faz sargıları rotor pozisyonu bilgisi olmadan kare dalga katarı ile enerjilendirilirler. ARM ile step motor arasındaki ikinci önemli fark ise ARM çok geniş hız aralığında moment üretebilir. ARM’nin bu özelliği PM fırçasız DC motor ile yarışabilir. Ancak step motorlar sınırlı bir hız aralığında moment üretebilir çünkü tasarımı buna elverişlidir. Ayrıca kontrol, yapısal ve tasarımsal olarak da farklar vardır.



Şekil 1.1: Anahtarlama Relüktans Motor.

Şekil 1.1’den de görüleceği gibi ARM çift çıkık kutuplu ve tek uyarımlı bir makinedir (Doubly salient-DS). Bu yapıdaki motor ticari olarak ilk defa 1983 yılında Outron Drives firması tarafından piyasaya sunulmuştur. Ayrıca aynı yıllarda Hewlett Packard/Warner Electric firması tarafından bilgisayar yazıcısı motoru olarak kullanılmıştır. Bunların haricinde ARM’ler ile birçok alanda çalışmalar yapılmıştır. Örnek olarak havacılık sistemleri, [4], [5]. Hibrit araçlar için alternatör-starter sistemleri, [6], [7] rüzgâr türbini uygulamaları [8], [9]. Burada havacılık ve otomobil uygulamaları yüksek hızlı uygulamalar iken rüzgâr türbini işleri düşük hız-yüksek moment karakterli yapıdadır.

Bir tekniğin herhangi bir uygulama için uygun olup olmadığını, o uygulamanın gereksinimleri belirler. Örnek olarak AC akımın DC akıma göre her şartta üstün olduğunu söyleyemeyiz. Yapılacak olan uygulamaya göre kullanılacak teknikte sistemde değişebilir. Mühendislikteki en önemli şeylerden biride bunların kararını verebilmektir. ARM motor içinde aynı şeyler geçerlidir. Aşağıda ARM için motor ve konverter bakımından avantajlar ve dezavantajlar listelenmiştir.

Motor çalışmada üstünlükler;

- Motorda sadece stator üzerinde sargı vardır. Rotor üzerinde sargı, mıknatıs vb. yoktur. Böylece rotor üzerinde ciddi bir tasarruf söz konusudur.
- Sargılar statorda dağıtılmış sargı yapısında değildir. Bundan dolayı AC ya da DC makineye nazaran üretimde çok fazla tasarruf sağlanır.

- Rotoru diğer makinelere göre çok küçüktür. Bu nedenle rotorun atalet momenti oldukça düşüktür. Düşük atalet momentine sahip rotor sayesinde hızlanma ve yavaşlama performansı oldukça yüksektir.
- AC makineler gibi ARM'de fırçasız bir makinedir. Bu nedenle DC makine ile kıyaslandığında bakım açısından üstün bir makinedir.
- Gerek rotorun düşük atalet momentine sahip olması gerekse de basit yapısından dolayı motor hızı çok yüksek hızlara çıkabilir.
- Diğer makinelere kıyasla ARM'nin soğutulması oldukça kolaydır. Çünkü rotorda sargı olmadığından açığa çıkan ısı enerjisi statorda yoğunlaşmıştır. Bu nedenle statordan ısı enerjisini çekmek daha kolaydır.
- Güç yoğunluğu bakımından asenkron motordan daha iyidir. Ancak kalıcı mıknatıslı DC motorların gerisindedir.
- Faz sargıları elektriksel olarak birbirinden ayrıdır ve ortak indüktans çok düşüktür. Bu nedenle fazlardan birinde meydana gelebilecek elektriksel bir arızada diğer fazlar bundan çok fazla etkilenmez.
- Moment faz akımının polaritesinden bağımsızdır. Yani burada kontrol için kullanılan yarı iletken güç anahtarlarının sayısı daha azdır.
- Yol verme momentleri oldukça yüksek olabilir.

Dezavantajlar;

- Moment dalgalılığı oldukça fazla, ancak yapılan çalışmalar gösteriyor ki bu durum ARM'nin kontrol algoritması iyileştirildikçe dalgalılık azalmaktadır.
- Akustik gürültüsü oldukça fazladır.
- ARM çift çıkık kutuplu olduğundan dolayı vantilasyon kayıpları fazladır.
- ARM doğrudan şebekeye bağlandığında kullanılamaz. Doğası gereği motor sürücüyü ihtiyaç duyar. Bu konuda asenkron motordan geri kalmaktadır.
- Motoru kontrol edebilmek için pozisyon sensörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar bu motoru sensörsüz de kullanılabileceğini göstermiştir.
- Makine, DC kaynak tarafında akım harmonikleri oluşturur. Bunu engellemek için DC tarafında filtre vazifesi görmesi için büyük kapasiteli kondansatör kullanmak gerekir.

Konverter bakımından avantajlar;

- ARM 4 bölgeli çalışabilmesi için tek yönlü bir akıma ihtiyaç duyar. Böylece kullanılan konverter topolojisinde her faz için 2'den daha az güç anahtarı kullanmak mümkündür.
- ARM'nin kontrolü için oldukça fazla konverter topolojisi vardır.
- Güç anahtarları ARM'nin sargılarına her zaman seri bağlıdır. Bu nedenle kaynağı kısa devre edebilecek arızalar bu makinede yaşanmaz. Bilindiği gibi H köprü inverterlerde anahtarlama hatalarından kaynaklanan kısa devre hataları oldukça fazla yaşanmaktadır.
- Konverterdeki güç anahtarlarının birinin arızalanması ARM'nin çalışmasını pek bozamaz. Bunu AC motorlar için söylemek zordur.
- Güç anahtarı sayısı azaldığından dolayı sürücü maliyetleri, açığa çıkan ısı ve sürücü hacmi oldukça azdır. Oldukça verimli sürücülerdir. Ayrıca hacmin küçüklüğünden dolayı yüksek adetli işlerde kargo masraflarında da tasarruf yapılır.

Piyasadaki örnek ARM uygulamaları;

- HP firması tarafından kullanılmış olan 0,1275 N.m, 4000 rpm, 53 W gücündeki ARM firmanın geliştirdiği yazıcılarda servo motor olarak kullanılmıştır.
- A.O. Smith adındaki bir geliştirici el kurutma makinesi için 0,5 hp gücünde bir ARM kullanmıştır.
- Bir Fransız firması tarafından paletli el forklifleri için bir ARM geliştirilmiştir. Bu ARM 1,8 kW gücünde nominal hızlı bir motordur. Motorun 3200 rpm'de verimi %82 olarak ölçülmüştür. Bu ARM'de sürücü olarak 4 bölgeli konverter topolojisi kullanılmıştır.
- Besam adındaki bir firma kapı tahrik sistemlerinde kullanmak üzere 12/8 kutuplu 5 N.m 300 rpm bir ARM geliştirmiştir.
- Piyasadaki bazı firmalarda çamaşır ve kurutma makinelerinde ARM tasarlanıp kullanılmıştır.
- Normalair Garrett firması tarafından 49 kW, 30000 rpm, 3 fazlı, 6/4 bir ARM geliştirmiştir. Bu ARM trenlerde klima motoru olarak görev yapmıştır.

- Britissh Jeffrey Diamond firması tarafından, 150 ve 300 kW güçlerinde 1500 rpm 12/8 kutuplu, 3 fazlı 4 bölgele konverter topolojisi ile kontrol edilen ARM tasarlamıştır. Bu ARM'ler maden ocaklarında kullanılmıştır.
- Beckman Instruments adındaki bir firma santrifüj işlemlerinde kullanılmak üzere 2,5 kW 30000 rpm ARM geliştirmiştir.
- ARM geniş hız skalasında kullanılabildiğinden ve güvenli olmasından dolayı uzay uygulamalarında da kullanılmıştır. Şu anda jet motorları ile beraber çalışan ve sistemin elektrik ihtiyacını karşılayan yani ARM jeneratör modunda çalışan araçlarda mevcut. Uzay uygulamalarında kullanıldığında genelde kutup sayısı çok fazla olacak şekilde tasarım yapılır. Bunun amacı; eğer fazlardan biri arızalanırsa diğer fazlar çok etkilenmeden sistemi sağlıklı bir şekilde çalışmaya devam ettirmektir.
- İngiliz Dyson Ltd. firması relüktans motorları elektrikli süpürgelerde ve elektrikli el kurutucularında kullanarak alanında birçok yeniliğe imza atmıştır. Ayrıca firma Mayıs 2012'de Newcastle Üniversitesi'ne bu alanda çalışma yapılması için ciddi yatırımlar yapmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Yarı iletken malzemelerin akım taşıma ve daha yüksek gerilime dayanma kapasitelerinin artması, anahtarlama frekanslarının mega-hertz değerlerine ulaşabilmesi, verimlerdeki artış ve mikro kontrolörlerin işlem kapasitelerinin artmasıyla beraber endüstride kullanılan motor ve eviricilerinde özellikle verim, maliyet, güvenilirlik açısından üretim yarışına girilmiştir. Endüstride var olabilmek için zorlu bir rekabet ortamı her zaman var olmuştur. Basit yapıları ve tartışılmaz avantajları sayesinde anahtarlama relüktans motorlar endüstrinin taleplerine cevap verebilecek kapasitededir. Ancak bu kadar üstün bir mimarinin günümüzde kullanımının yaygın olmamasının nedeni ise faz geçişlerindeki moment dalgalılığının fazla olması, yüksek akustik gürültü ve rotor konumunun kontrolünde yaşanan sıkıntılardır. Anahtarlama relüktans motoru bu dezavantajları manyetik devresinde ve evirici devresi kontrol algoritmasında yapılacak iyileştirmelerle aşmak mümkündür. Sunulan bu tezde anahtarlama relüktans motorda yapısal değişikliğe gidilerek sürekli mıknatıslı bir anahtarlama relüktans motor elde edilmiştir. Normal ARM ve SMARM'de moment dalgalılığı, güvenilirlik, güç artışı vb. konularda elde

edilebilecek iyileştirmeler ile sistemin bilgisayar ortamında modellenmesi yapıp test edilmesi amaçlanmıştır. Tezin sonunda 6/4 yapıdaki bir anahtarlamalı relüktans motorun ve sürekli mıknatıslı bir anahtarlamalı relüktans motorun manyetik analizi yapılmış ve tüm motora ait veriler alınmış, motor ve eviricisinin matematiksel olarak benzetimi yapılmış olacaktır. Motorlara ait elde edilen manyetik veriler ve matematiksel model ileriki çalışmalarda özellikle Sürekli Mıknatıslı Anahtarlamalı Relüktans Jeneratör (SMARG) çalışmaları için referans olacaktır. Model üzerinde yapılacak değişikliklerle beraber SMARG'nin çalışmasına dair bilgiler elde edilebilecektir.

1.2 Literatür Araştırması

Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM) adlandırmasının orijinin ilk olarak neresi olduğu tam olarak bilinmese de bu adlandırmayı ilk olarak kullananlardan birisi Nasar olmuştur [10]. ARM'ler ilk defa 1838'de İskoçya'da bir tren tahrikini oluşturmak için kullanılmıştır [11]. Bir sonraki önemli çalışma ise 1920 de C.L. Waller tarafından, günümüzde de yaygın olarak kullanılan step motorların en ilkel halini yapmıştır [12] ARM'ler ilk başlarda 'Değişken Relüktans Motor' olarak anılmaktaydı, ancak yarı iletken güç anahtarlarının özelliklerinin artması ile beraber çalışma ilkesine de uygun olarak 'Anahtarlamalı Relüktans Motor' olarak adlandırılmıştır [13]. Bu çalışmalara 1960'larda Nasar ve Lawrenson öncülük etmiş, ancak üretim teknikleri kısıtlamalarından dolayı çalışmalar sınırlı kalmıştır.

Yarı iletken güç anahtarlarının özellikleri arttıkça ve mikroişlemcilerin işlem yapma becerilerinin artmasına paralel olarak ARM'ler ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmıştır. 1969 yılında W.F. Ray, değişken hızlı uygulamalar için bu motoru kullanmıştır [1]. Daha sonra 1972'de Bedford'un aldığı bazı patentlerle ARM gelişimi önemli ölçüde hız kazanmıştır [14].

Özellikle üretiminin basit oluşu, motorun periyodik bakım gerektirmemesi, kısa devre sorununun olmaması gibi artıları bu motoru popüler yapmaktadır. Genel olarak bakıldığında motor çift çıkık kutupludur ve böyle bir motor ilk olarak 1983'de Oultron Drives firması tarafından piyasaya sürülmüştür. Anahtarlamalı Relüktans motorun ilk olarak ticari üretimi ise *Switched Reluctance Drives Ltd.* lisansı ile yapılmıştır. Motorun basit yapısından dolayı özellikle İngiltere'de Nottingham Üniversitesi'nde ciddi çalışmalar yapılmış ve önemli patentler alınmıştır.

ARM'nin tanınmaya başlaması ile birlikte makinenin manyetik ve mekanik kontrolüne yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki ARM'nin yapısının basit olmasına rağmen manyetik devrenin lineer olmamasından dolayı analizi oldukça karmaşıktır. Bunu aşmak için bazı sayısal analiz yöntemleri önerilmiştir [15]. Bu tür çalışmaların yanında ARM'nin yapısal tasarımı için çalışmalarda yapılmıştır [16], [17]. Bu çalışmalarda görülmüştür ki motorun hava aralığı, kutup genişlikleri, kutup yüzeyi yapısı gibi parametrelerin makinenin performansına etkisi önemlidir.

Daha sonra 1985'de Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile motorun manyetik özellikleri incelenmiş ve motora ait akı dağılımı, indüktans değişimi grafikleri rotorun değişik konumlarına göre çıkarılmıştır [18], [19]. Bu çalışmalar ile rotorun farklı rotor konumları için halkalama akısı grafiği elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarla birlikte SEY'nin manyetik devre ve motorun yapısal olarak iyileştirilmesinde faydalı olduğu görülmüştür [20]. Daha sonra sonlu elemanlar analizi yöntemi gibi sayısal yöntemlerle birlikte makinenin dinamik karakteristiği içinde çeşitli benzetim yazılımları ile çalışmalar yapılmıştır [21]- [22].

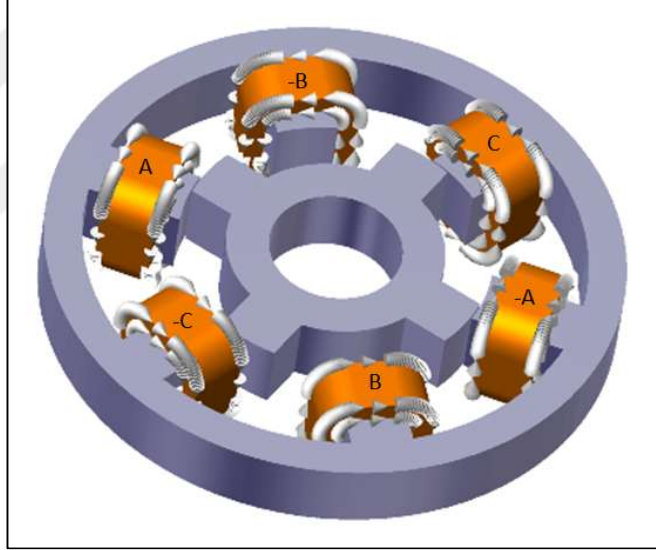
Anahtarlamalı relüktans makinelerde jeneratör olarak çalışmak için ilk başta uyarım gerekebilir. Bunun için bu makinalara sürekli mıknatıs ekleyerek çözümlere gidilmiştir. 1927 yılında yapılan bir çalışma [23] relüktans makineye sürekli mıknatıslar yerleştirilmiş ve jeneratör çalışma durumu için kendi kendime uyarım uygunluğu incelenmiştir. Sürekli mıknatıslar statora gömülmüş olup statordan izole edilmiştir. Daha sonra [24] çalışmada ARG ve SMARG fiyat/performans, güç yoğunluğu vb. yönlerden kıyaslanmıştır. [25] Çalışmada ise anahtarlı relüktans makine ile sürekli mıknatıslı relüktans jeneratörün herhangi bir arıza durumuna göre toleransı incelenmiş ve bu makinenin hata toleransının çok iyi olduğu gözlenmiştir. [26] Çalışmada kalıcı mıknatıslı bir relüktans jeneratörün ilk defa 3 fazlı tam köprü konverter modeli ve moment dalgalılığının azaltılması, maksimum güç aktarımı algoritması ile bir çalışma yapılmış ve 6/4 bir SMARG de test edilmiştir.



2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR

2.1 ARM Yapısı

Anahtarlamaalı relüktans makine senkron makine ailesinden olmasına rağmen çok belirgin özellikleri vardır. Makinenin statorunda alan sargıları bulunmaktadır. Makine rotorunda ise herhangi sargı ya da mıknatıs bulunmaz. Rotorda bir yapı olmaması rotoru hem basitleştirmekte hem de üretimini kolaylaştırmaktadır. Rotor ve stator çıkık kutupludur ve bundan dolayı çift çıkık kutuplu olarak adlandırılır. Böyle bir motorun 3 boyutlu gösterimi aşağıdaki şekilde görülmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: 6/4 Yapıdaki ARM 3 boyutlu gösterimi.

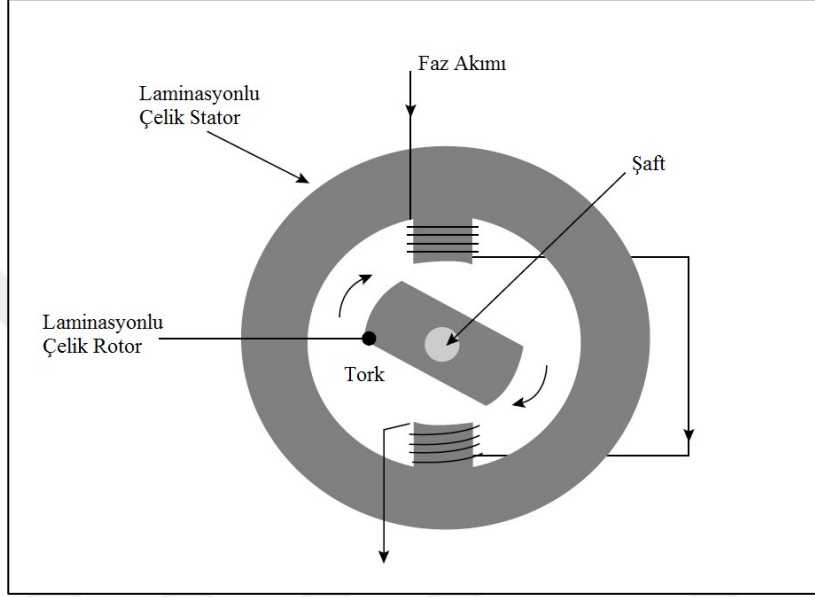
Bu makineler stator ve rotor kutup sayısına göre adlandırılır; örneğin 6/4, 8/6, 12/10 vb. Burada birinci sayı stator kutup sayısını ifade ederken, ikinci sayı rotor kutup sayısını ifade eder.

2.2 ARM Temel Çalışma Prensibi

Step motor gibi ARM’de stator kutupları ve çıkık rotor kutuplarının etkileşimi sonucunda ortaya çıkan çekim kuvveti sonucu moment üretir [27]. Step motor ve ARM

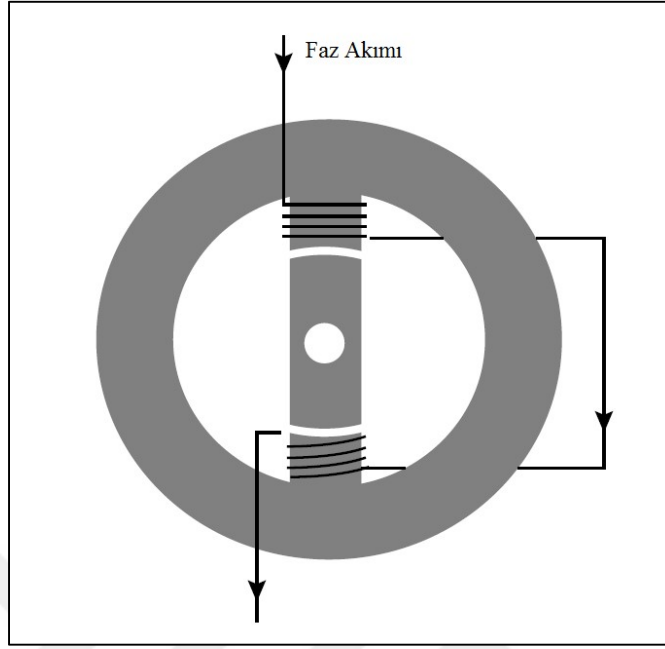
temelde aynı enerji dönüşüm prensibine göre çalışır ve bu iki motorda değişken relüktans motor ailesinden gelir.

Aşağıdaki şekilde 2 stator kutbu ve 2 rotor kutbu olan bir ARM görülmektedir (Şekil 2.2).



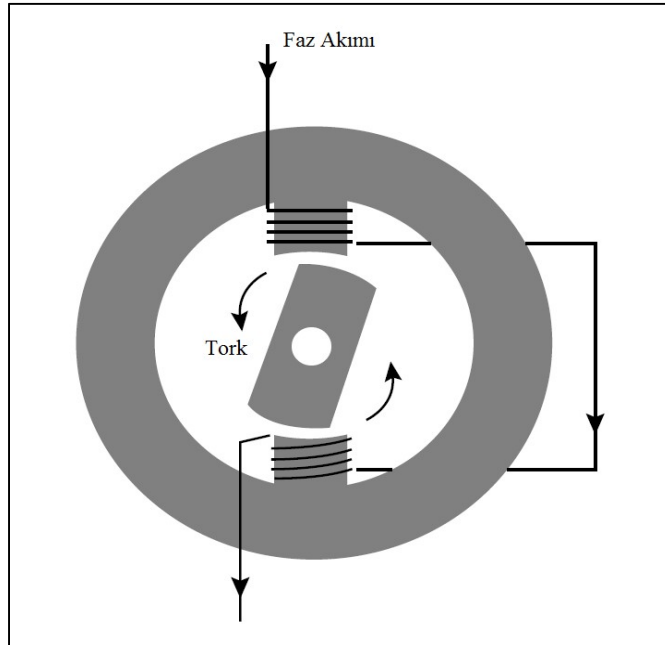
Şekil 2.2: ARM kesiti.

Şekilde açıkça görülmektedir ki eğer rotor gösterildiği gibi iken akım stator sargısından şekildeki gibi akarsa rotor saat ibresi yönünde dönecektir. Burada akımın yönünün bir önemi yoktur. Daha önce de ifade edildiği gibi bu özellik sayesinde ARM için çok fazla konverter kullanılabilir. Eğer rotorun dönmesine bir engel yok ise oluşan bu moment rotoru saat ibresi yönünde hızlandıracaktır. Bu hava aralığındaki relüktans değişiminden kaynaklanan moment üretimi rotor aşağıdaki şekilde de gösterildiği gibi tam hizalı konuma gelinceye kadar üretilir (Şekil 2.3). Bu noktaya TDC noktası denilir (TDC-Top Dead Center). TDC noktasında rotor tarafından tamamlanan manyetik devrede hava aralığının minimum olmasından dolayı relüktans değeri de minimumdur. Bundan dolayı TDC noktasında relüktans minimumdur. Yani belirli bir faz akımı için sargılar tarafından halkalanan akı maksimum dolayısıyla faz indüktansı maksimumdur. TDC noktasında rotor tarafından tamamlanan manyetik devrede hava aralığının minimum olmasından dolayı relüktans değeri de minimumdur. Bundan dolayı TDC noktasında relüktans minimumdur. Yani belirli bir faz akımı için sargılar tarafından halkalanan akı maksimum dolayısıyla faz indüktansı maksimumdur.



Şekil 2.3: TDC noktasında ARM kesiti.

ARM'nin ataletinin TDC noktasını geçmesine yardımcı olduğunu varsayarak akımın aynı yönde akmaya devam etmesi halinde ARM tarafından üretilen dönme momenti polaritesi ters dönecektir. Aşağıdaki şekil bu durumu göstermektedir (Şekil 2.4).

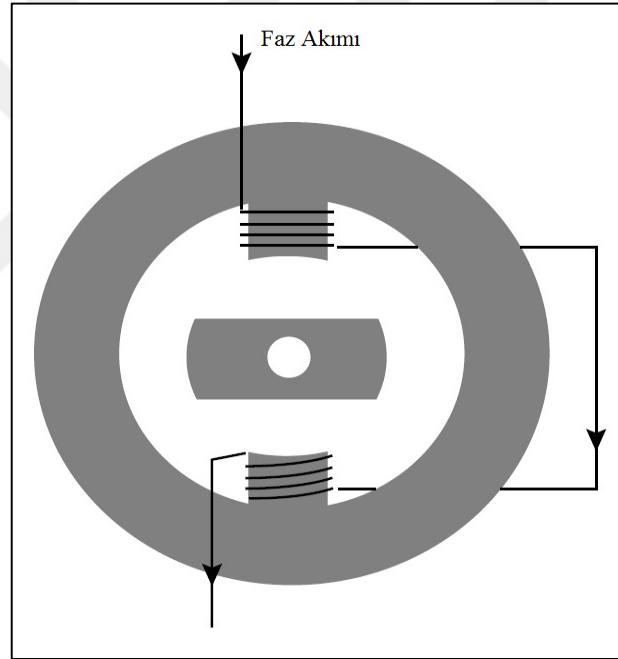


Şekil 2.4: TDC noktası sonrası ARM kesiti.

Rotor saat ibresi yönünde dönmesine rağmen şu anda motorda üretilen moment saat ibresinin tersi yönünde etki yapar. Bu etki ilk önce rotoru yavaşlatır ve daha sonra

belki rotoru diğerk yönde döndürecekler. Burada Şu önemli noktayı vurgulamak gerekir: Üretilen momentin polaritesi, faz akımının yönünü değiştirmeden değiştirilebilir. Yani frenleme için (jeneratör modu için) akımın yönünü değiştirmeye gerek yoktur. Jeneratör modu aslında faydalı frenleme modudur. Frenleme durumunda enerji, ısı vb. Şekilde faydalı bir Şekilde kullanılamayacak bir Şekilde harcanırken, jeneratör çalışmada (faydalı frenleme) enerji Şebekeye geri basılır ya da depolanır.

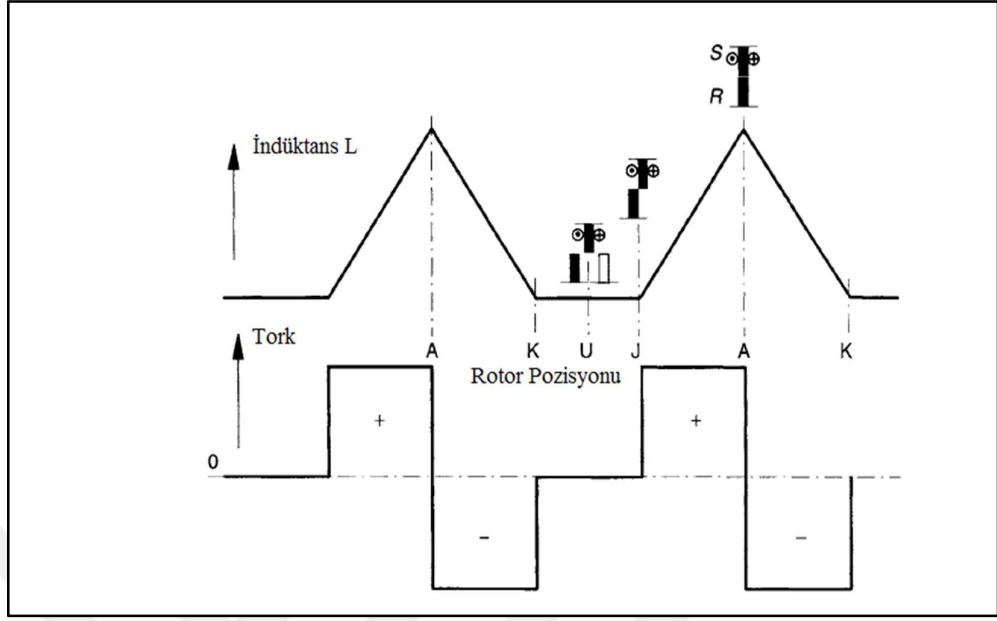
Motorun saat ibresi yönünde dönmeye devam ettiğini varsayarsak rotor bir süre sonra moment üretiminin sıfır olduğu ikinci konuma gelecektir. Bu noktayı hizalanmamış pozisyon olarak adlandırıyoruz. (BDC-bottom dead center) Aşağıdaki Şekil bu durumu göstermektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: BDC noktasında ARM kesiti.

Bu pozisyon TDC pozisyonuna tamamen zıt bir pozisyonudur. Bu pozisyonda manyetik devrenin relüktansı maksimum, indüktans minimum değerdedir.

Buraya kadar anlatılanlardan açıkça görölmektedir ki rotor dönerken bazı yerlerde üretilen moment pozitifken bazı yerlerde üretilen moment negatif değerdedir. Aşağıdaki grafik bu durumun anlaşılmasında yardımcı olacaktır (Şekil 2.6). Őeklin doğrusal çalışma için ideal indüktans profilini gösterdiğini belirtmek gerekir. Normal şartlarda bu indüktans grafiği lineer değildir.



Şekil 2.6: Rotor konumuna göre indüktans ve moment grafikleri.

Şekil 2.6'dan da görüleceği gibi pozitif moment sadece indüktans-rotor konumu grafiği eğiminin pozitif olduğu yerlerde elde edilmektedir. Pozitif momentin anlamı makinenin motor modunda çalışması anlamına gelmektedir. Bu bölge J-A bölgesidir. Bu bölgede rotor hizalı konuma yaklaşmaktadır. J noktasında rotorun çıkık kutbunun ilk noktası ile stator çıkık kutbunun ilk noktası hizalı hale gelmiştir. A noktasında ise stator ve rotor kutupları tamamen hizalanmıştır. Yani J noktası stator ve rotorun birbirine kavuşma noktasının başlama anıdır. Bu nokta overlap başlama noktası olarak adlandırılır. A noktası maksimum overlap noktası ve K noktası da overlap süresinin bitişidir. Grafikten elde edilecek bir diğer önemli sonuçta moment ifadesinin hizalı konumdan sonra yön değiştirdiğidir. Eğer rotor A konumunu geçerse kutuplar arasındaki çekim negatif moment üretecektir. Bu moment aslında frenleme momentidir. Eğer sargılardan tüm bir periyot boyunca akan akım sabit ise bir tam periyodun sonunda üretilen ortalama moment sıfır olacaktır. Eğer burada negatif moment kullanılmayacak ise, yani makine sadece motor olarak çalışacak ise kutuplar birbirinden ayrılmaya başladığı andan itibaren stator sargılarından akan akım kesilmek zorundadır. Grafikte A-K aralığı bu bölgeyi temsil etmektedir. Böylece motordaki ideal akım grafiği indüktans-rotor konumuna göre senkronize edilmiş olur. İdeal moment grafiği ise akım grafiğinin aynısıdır. Aşağıdaki çizelgede hizalı ve hizasız konumlar için karşılaştırma verilmiştir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 : Hizalı ve hizasız konum için karşılaştırma.

Hızlı	Hizasız
$\theta = 0, 180^\circ$	$\theta = \pm 90^\circ$
Maksimum indüktans	Minimum indüktans
Manyetik devrenin doyuma ulaşma ihtimali yüksek	Manyetik devrenin doyuma ulaşma ihtimali yok

2.3 Motor Olarak Çalışma

Makineyi motor olarak çalıştırabilmek için ilgili sargıyı sadece stator ve rotor kutupları birbirine yaklaşıyorken enerjilendirmek gerekmektedir. Burada motor çalışma sadece bir yöne değildir. Makine saat ibresi ya da tersi yönde de motor çalışabilir. Önemli olan nokta indüktans değeri artarken anahtarlama yapmak gerektiğidir. Başka bir ifade ile ideal şartlarda zamana göre manyetik devrenin relüktansı azalırken ilgili fazı enerjilendirmemiz gerekir. Faz enerjilendirilince TDC noktasına kadar enerjili kalmalıdır. TDC noktasında faz akımını kesmek gerekir. Motor kendi ataleti ile TDC noktasını geçecektir. Eğer TDC noktasında akım kesilmez ise ters bir moment oluşur ve ortalama moment azalır.

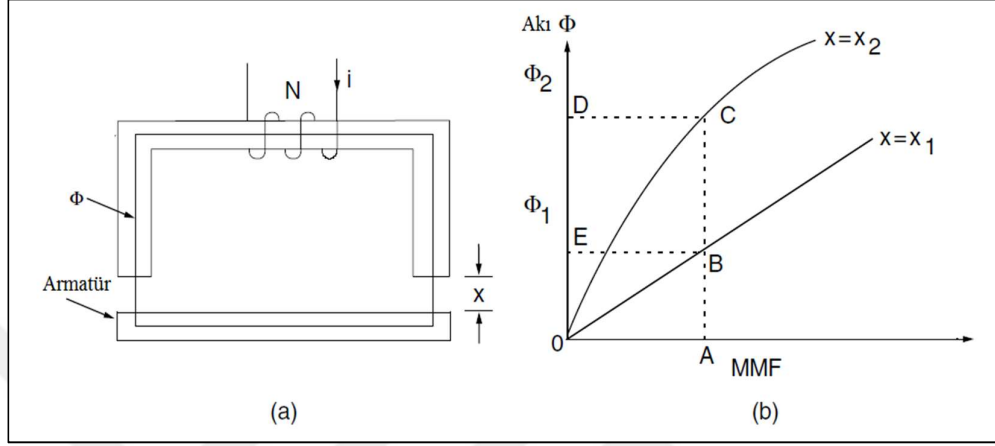
2.4 Jeneratör Olarak Çalışma

Jeneratör olarak çalışma ve frenleme durumunun aynı olduğunu yukarıda belirtilmişti. Jeneratör olarak çalışmada en temel fark motorun milinden alınan mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürüldüğünde bu enerji faydalı bir şekilde kullanılır (kaynağa geri verilmesi gibi).

Tüm motorlarda fiziksel olarak bir gerçek vardır, o da jeneratör çalışma da motorun dönme yönü ile moment ters yönlüdür. Yani motor saat yönüne dönüyor ise uygulanan moment bu yönün tam tersinedir. Motorun saat ibresi yönüne döndüğünü farz edersek jeneratör çalışma için rotor kutupları stator kutuplarından ayrılırken fazlar enerjilendirilmelidir. Bir başka ifade ile faz indüktansı azalıyor iken faz enerjilendirilmelidir. Akım ideal şartlarda TDC noktasında ON yapılmalı, BDC noktasında OFF yapılmalıdır.

2.5 Kuvvet Oluşumu Prensibi

Kuvvet oluşumunu en basit şekilde kavrayabilmek için basit olarak selenoid sistemdeki elektromekanik yapıyı incelemek faydalı olacaktır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Selenoid sistemde kuvvet oluşumu prensibi.

N sarım sayılı selenoid sargılarından akım geçirilir ise bir akı oluşur. Akımı arttırsak oluşan akı da artacaktır ve armatür diye gösterilen çubuk selenoid tarafından çekilecektir.

$X_1 > X_2$ olduğunu varsayarak yukarıdaki şekilde Akı-MMF grafiği verilmiştir (Şekil 27). Bu grafikte X_1 konumu için grafik lineer gösterilmiştir. X_1 noktasında hava aralığı etkin olduğundan dolayı manyetik devredeki akım çok küçüktür yani çizim doğrudur.

Elektriksel enerji aşağıdaki gibi verilir;

$$W_e = \int ei \cdot dt = \int idt \frac{dN\phi}{dt} = \int Nid\phi = \int Fd\phi \quad (2.1)$$

Burada; e indüklenen emf ve F ise mmf'dir. Elektrik enerjisi sargılarda depolanan enerji W_f ve mekanik enerjinin W_m toplamına eşittir.

$$W_e = W_f + W_m \quad (2.2)$$

Yukarıdaki ifadelerden de görüleceği gibi eğer mekanik bir iş yok ise giriş elektrik enerjisi sargılarda depolanan enerjiye eşittir. Bu da Şekil 2.7'deki OBEO alanına eşittir.

Enerjinin tamamlayıcısı (komplementi) ko-enerji olarak ifade edilir. ($\int \varphi dF$) Bu ifade Şekil 2.7’de OBAO alanına denk gelir. Buna benzer olarak X_2 pozisyonunda sargılardaki enerji OCDO, ko-enerji ise OCAO alanıdır.

$$\delta W_e = \delta W_f + \delta W_m \quad (2.3)$$

Sabit bir F_1 uyarıtımı için:

$$\delta W_e = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} F_1 d\varphi = F_1(\varphi_2 - \varphi_1) = \text{Alan}(BCDEB) \quad (2.4)$$

Denklem 2.4 düzenlenirse;

$$\delta W_f = \delta W_{f|x=x_2} - \delta W_{f|x=x_1} = \text{alan}(OCDO) - \text{alan}(OBEO) \quad (2.5)$$

Buradan;

$$\delta W_m = \delta W_e - \delta W_f = \text{alan}(OBEO) \quad (2.6)$$

Bu son verilen alan aslında iki eğri arasındaki alandır. Aslında söz konusu bir motor olunca diferansiyel elektromekanik enerji elektromekanik moment ifadesi;

$$\delta W_m = T_e \delta \theta \quad (2.7)$$

Burada elektromanyetik moment ve $\delta \theta$ diferansiyel rotor açısıdır.

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} \quad (2.8)$$

MMF sabit olduğunda aşağıdaki ifade yazılabilir;

$$\delta W_m = \delta W_f' \quad (2.9)$$

$$W_f' = \int \varphi dF = \int \varphi d(Ni) = \int (N\varphi) di = \int \lambda(\theta, i) di = \int L(\theta, i) i di \quad (2.10)$$

Burada L indüktans ve λ halkalama akısı akım ve rotor pozisyonunun fonksiyonudur. Ko-enerjideki bu değişim θ_2 ve θ_1 rotor pozisyonları arasında olur. Bundan dolayı hava aralığındaki moment ifadesi rotor pozisyonu ve akım cinsinden:

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} = \frac{\delta W_f'}{\delta \theta} = \frac{\delta W_f'(i, \theta)}{\delta \theta} \Big|_{i=sabit} \quad (2.11)$$

Eğer verilen sabit bir akım değeri için indüktans rotor pozisyonu ile lineer olarak değişiyor ise (aslında ideal durumda böyledir) moment ifadesi:

$$T_e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{i^2}{2} \quad (2.12)$$

$$\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1} \Big|_{i=sab} \quad (2.13)$$

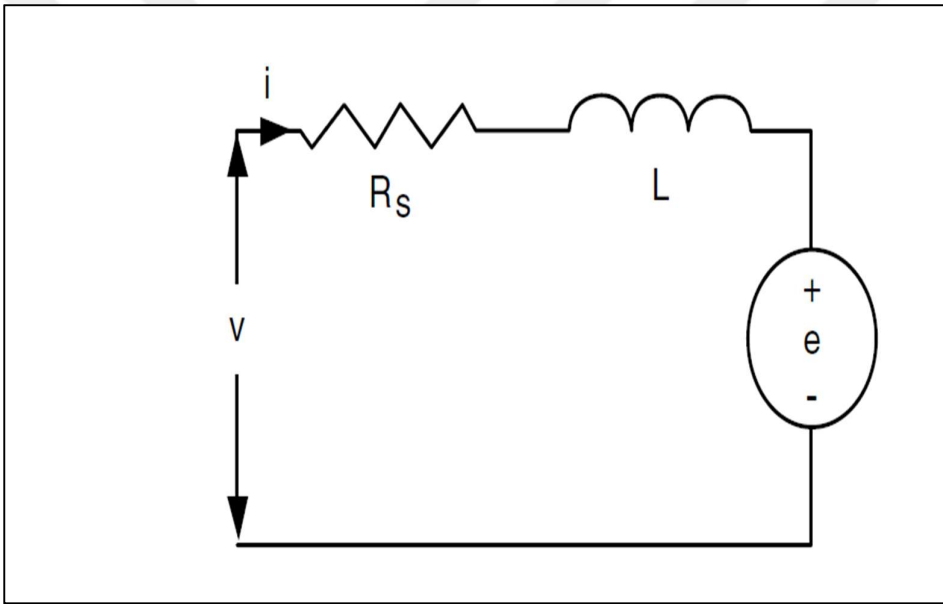
Moment ifadesini veren formülden şu yorumları yapabiliriz:

- Moment akımın karesi ile orantılıdır. Moment ifadesinde akımın işaretinin pek önemi yoktur. Yani akım tek yönlüdür bu durum AC makinelere terstir.
- Rotor indüktansı, stator akımı ve rotor konumunun fonksiyonudur. Bu indüktansın lineerliğini ortadan kaldırır.
- Moment, akımın karesi ile orantılı olduğundan dolayı DC seri motora çok benzer. Başlangıç momenti yüksektir.
- Rotorun dönme yönü, stator sargılarının uyartım yönü değiştirilerek değiştirilir.
- Bu motor doğrudan şebekeye bağlandığında çalışmaz. Yani motor operasyonu için kontrol edilebilir bir konverter topolojisi gerekmektedir. Eğer yapılacak olan uygulama sabit hızlı ise ARM'ler asenkron ve senkron motorlara göre çok pahalı olur. ARM'ler doğası gereği değişken hızlı uygulamalar için uygundur.
- Fazlar arasındaki ortak indüktans ihmal edilebilecek kadar azdır. Ortak indüktansın küçük olmasından dolayı her faz elektriksel olarak diğerlerinden bağımsızdır.
- Yine ortak indüktans etkisinin çok az olmasından dolayı fazlardan birinde meydana gelebilecek kısa devre arızalarında diğer fazlar bundan pek etkilenmezler.

- Akım dört bölge çalışmada tek yönlü olduğundan dolayı bu makinede kullanılabilen tüm konverter topolojilerinde güç anahtarları makine sargılarına seridir.
- Anahtarlar sargılara seri bağlı olduğundan dolayı herhangi bir anahtarlama hatasında kaynağı kısa devre etmek gibi bir risk yoktur.

2.6 Eşdeğer Devre

ARM için fazlar arasındaki ortak indüktans değeri ihmal edilerek basit bir eşdeğer devre Şekil 2.8'deki gibi çizilir.



Şekil 2.8: ARM tek faz için basit eşdeğer devre.

Bir faza uygulanan gerilim, faz direnci üzerindeki gerilim düşümü ile halkalanma akısındaki değişimin toplamına eşittir.

$$V = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2.14)$$

$$\lambda = L(\theta, i) \cdot i \quad (2.15)$$

İndüktans, rotor konumu ve faz akımına bağlıdır.

Yukarıdaki ifadede ilk terim faz direnci gerilim düşümünü, diğer ifade indüktif gerilim düşümünü ve son ifade ise indüklenen gerilimi ifade eder.

Yukardaki gerilim ifadesi ile faz akımı çarpılır ise makinanın anlık güç ifadesi ortaya çıkar. Bu ifade aşağıda verilmiştir.

$$v = R_s i + \frac{d\{L(\theta, i)\}}{dt} = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.16)$$

$$v = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \quad (2.17)$$

Buradan anlık güç ifadesi;

$$p_i = v \cdot i = R_s \cdot i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) i \frac{di}{dt} \quad (2.18)$$

Yukarıdaki anlık güç ifadesini daha iyi yorumlayabilmek için aşağıdaki gibi düzenlenirse;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.19)$$

$$p_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.20)$$

Yukarıdaki ifadede ilk terim dirençte harcanan güç, ikinci ifade ise manyetik alan enerjisindeki değişim oranı ve son ifade ise hava aralığındaki güç ifadesidir.

$$t = \frac{\theta}{\omega_m} \quad (2.21)$$

Olduğundan dolayı hava aralığındaki güç ifadesi;

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m \quad (2.22)$$

Hava aralığındaki güç ise üretilen moment ve rotor hızının çarpımı olarak ifade edilir.

Yukarıdaki ifadeler eşit ise buradan türetilecek ifade;

$$p_a = \omega_m \cdot T_e \quad (2.23)$$

Moment ifadesi ise;

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.24)$$

Olarak bulunur.

2.7 Anahtarlamalı Relüktans Makinesindeki Kayıplar

Diğer elektrik motorlarında olduğu gibi anahtarlamalı relüktans motorlarda da kayıplar 3 ana kategoride toplanır.

- Bakır kayıpları: Faz sargısının direncinden kaynaklanan kayıplardır ve ısı olarak açığa çıkar. Bakır kayıplarının ortaya çıkmasındaki etmenler; devreden akan akım ve Eddy akımlarıdır. Ayrıca yüksek frekanslı akımlar deri etkisinden dolayı iletkenin yüzeyinden akarlar ve buda faz direncini arttırdığından dolayı bakır kayıplarını artırır.
- Demir kayıpları: Rotor ve stator manyetik malzemesinde meydana gelen kayıplardır. Manyetik alanın sürekli olarak değişmesinden dolayı ortaya çıkar. Yine burada da Eddy akımları bir gerilim indükler ve bu gerilim bir akım akıtır. Dolayısıyla akan akımdan kaynaklanan bir kayıp meydana gelir. Bu kayıp, akan akımın karesi ile orantılıdır. Demir kayıpları kullanılan manyetik malzemeye de yüksek derecede bağlıdır.
- Sürtünme ve rüzgâr kayıpları: Dönmeden kaynaklanan mekanik kayıplardır.

3. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNESİNİN FEMM ANALİZİ

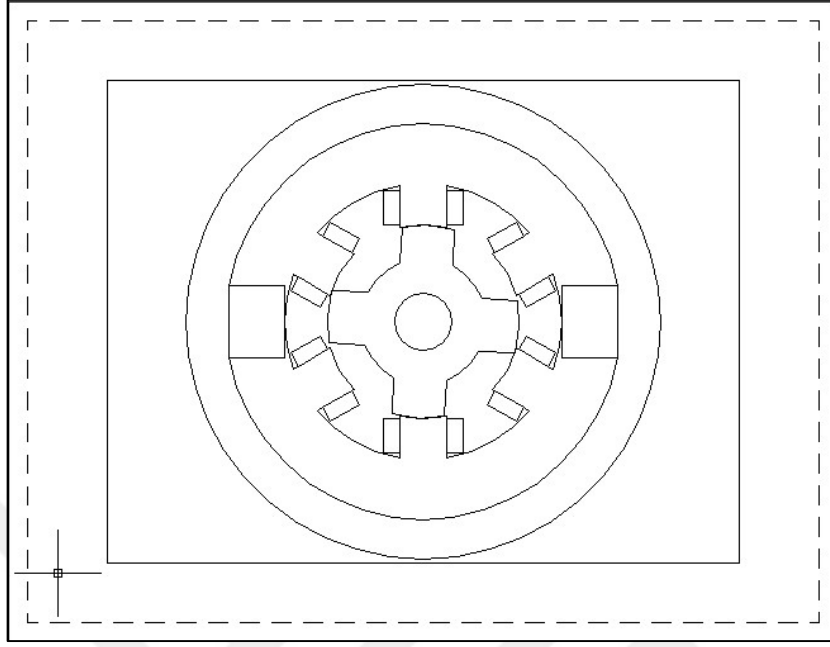
FEMM (Finite Element Method Magnetics); düşü frekanslı elektromanyetik problemleri iki boyutlu düzlemsel ve elektriksel şekilde çözmeye yarayan bir paket programdır [28]. FEMM ile lineer ve lineer olmayan manyetik problemleri, zaman harmoniği içeren manyetik problemleri, lineer elektrostatik problemleri ve sürekli hal ısı akışı problemlerini çözebilmek mümkündür. FEMM programı lisansı ücretsizdir ve dileyen herkes internetten ücretsiz olarak indirebilir.

3.1 Anahtarlamalı Relüktans Motor FEMM Tasarımı

FEMM’de analizi yapılmış olan motorun tüm çizimleri AutoCAD çizim programı ile hazırlanmıştır. AutoCad ile çizilen motor daha sonra FEMM programına gönderilip, bu platformda malzeme tanımları yapılmıştır. Motora ait yapısal veriler çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Şekil 3.1 de ise AutoCad programında yapılan çizim görülmektedir.

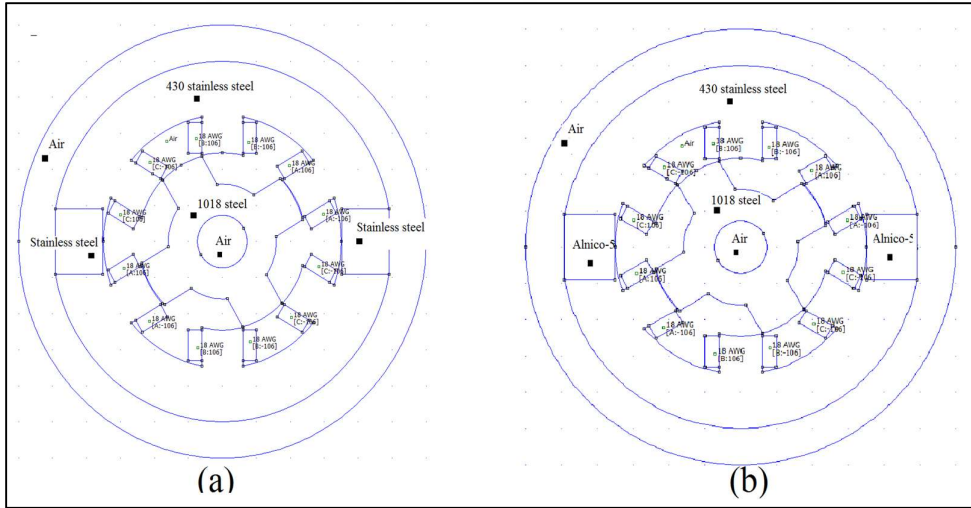
Çizelge 3.1 : Motora ait veriler.

Motor Verileri	Değerler
Stator kutup genişliği	12,2 mm
Stator kutup uzunluğu	10, mm
Stator çapı	70 mm
Stator malzemesi	18 AWG-Cu
Faz başına sarım sayısı	106
Rotor kutup genişliği	13,4 mm
Rotor kutup uzunluğu	8,5 mm
Rotor çapı	31,8 mm
Rotor malzemesi	1018 paslanmaz çelik
Rotor uzunluğu	50 mm
Hız	800 rpm
Mıknatıs	Alnico-5, 2(18x14 mm)
Güç	1500 W
Besleme	100 VDC



Şekil 3.1 : ARM AutoCad çizimi.

Şekil 3.1 de AutoCad çizimi yapıldıktan sonra FEMM programında malzeme materyal tanımlamaları yapılarak FEMM için gerekli analiz işlemlerine başlanmıştır.

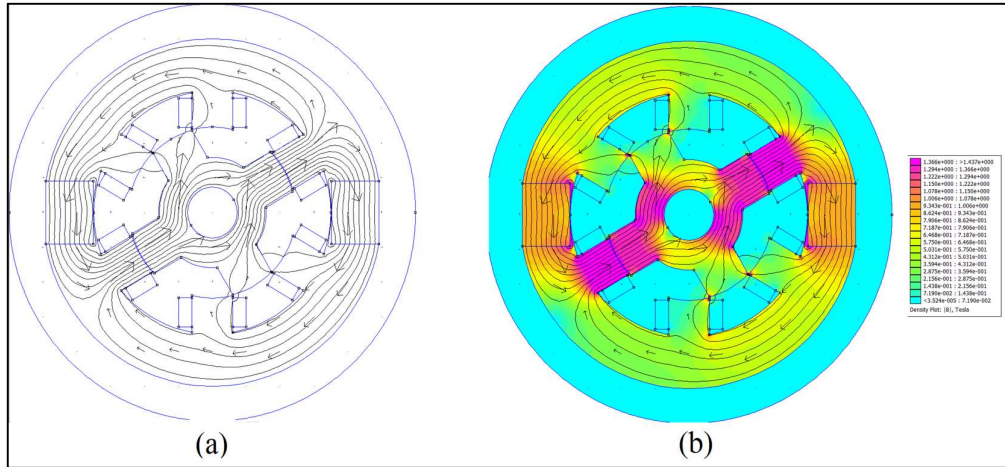


Şekil 3.2 : FEMM programında analiz edilen motorlar: (a) ARM. (b) SMARM.

Femm'de analiz yapılırken ilk önce faz akımları girilir daha sonra rotor konumu belirlenerek analize başlanır. Analiz sonucunda motordaki halkalanma akısı, moment değeri, gerilim düşümü, indüktans değeri gibi veriler elde edilir. Matlab 'da simülasyonu yapabilmek için FEMM de tasarlanan ARM'den veriler alınarak look-up tabloları hazırlanmıştır. Tezin ilk başlarında FEMM'den veriler yukarıda bahsedilen

şekilde alınmıştır ve bunun sonucunda akı ve moment tabloları oluşturulmuştur. Yani FEMM’de 0-15A arası 1A adım aralığı ve 0-45 derece arasında 0,5 derece adım aralığı ile 1456 adet veri alınmıştır. Bu veriler Matlab’da işlenmiştir ve daha sonra Matlab’da akım kontrol yapılmak istendiğinde simülasyonun sonsuz döngülere girildiği görülmüştür. Bunun nedeninin ise akım kontrolünde kullanılan türevden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Bu sorunu aşmak için türev ifadesinden kurtulmak gerekmektedir ve bunun içinde hazırlanan look-up tabloları tekrar tersten gidilerek hazırlanmıştır. Bunun için FEMM’den veriler tersten gidilerek tekrardan alınmıştır. Yani akı tablosu yerine akım tablosu elde edildi. İlk tabloda giriş akım ve rotor konumu değerine karşılık akı değerleri oluşturulmuştu ancak bu tabloda giriş akı ve rotor konumu değerlerine karşılık akım değerleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu tablolar ekler kısmında verilmiştir (Çizelge A.6- Çizelge A.9).

Mıknatsız ARM için fazlardan birinden akım akıtılmadığında herhangi bir akı oluşmayacağı aşikârdır. Ancak SMARM için akım değeri sıfır olsa bile statorda bulunan mıknatıslardan dolayı makinede bir akı oluşacaktır. Aşağıdaki şekilde SMARM için faz akımı yokken makinede oluşan akı yönü ve akı yoğunluğu gösterilmiştir (Şekil 3.3).



3.2 FEMM Verilerinin Elde Edilmesi

FEMM analizinde veriler motorların sadece A fazı üzerinden alınmıştır. Motorun simetrik olduğu varsayımı yani 3 fazında dengeli olduğu düşüncesi ARM için bir sorun teşkil etmeyeceğini hemen ifade etmek mümkündür. SMARM yapısında iki adet Alnico-5 kullanıldığından dolayı motorun simetrisinin bozulacağı, dolayısıyla A, B ve C fazlarının dengesiz olup olmayacağı dikkatle incelenmesi gerekmiştir. Bunu için SMARM’de A fazını elde ederken kullanılan değerler B ve C fazları içinde aynı şartlar altında alınmış ve çizelge olarak sunulmuştur. Çizelge 3.2’de SMARM’nin rotoru B fazına göre 15 derecede konumunda iken B faz akı değerleri alınmış ve C fazı da yine 15 derece konumunda iken C faz akı değerleri alınmış ve elde edilen veriler A fazı ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.2 : Belirli uyarım akımında A, B, C fazları akı değerleri.

Akım (A)	A Faz Akı(Wb)	B Faz Akı(Wb)	C Faz Akı(Wb)
0,55	0,13	0,129	0,1305
1,45	0,14	0,139	0,1402
2,56	0,15	0,149	0,15
3,91	0,16	0,159	0,1601
5,45	0,17	0,169	0,1699
7,35	0,18	0,1797	0,1803
9,61	0,19	0,1897	0,1902
12,57	0,2	0,2	0,2004
15,96	0,21	0,21	0,2103
19,98	0,22	0,2202	0,2204
24,67	0,23	0,2301	0,2303
0,55	0,24	0,2399	0,2401

Burada değerler karşılaştırıldığında akı değerlerinin hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir. Moment değerleri ise Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 de moment değerlerine baktığımızda aynı konumda aynı uyarım akımında A fazı için motorda oluşam moment değeri B ve C fazları için de hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir. Bu kontrol sistemi sadece burada verilen 15 derece için değil birden fazla konum için yapılmıştır. Sonuç olarak motordan alınan A fazı değerlerinin diğer iki faz içinde kullanılabileceği, motorun simetrik olarak kabul edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Simetrinin olup olmadığını anlamak için oluşturulan diğer rotor konumları için oluşturulan çizelgeler ekler kısmında verilmiştir (Çizelge A.1- Çizelge A.5).

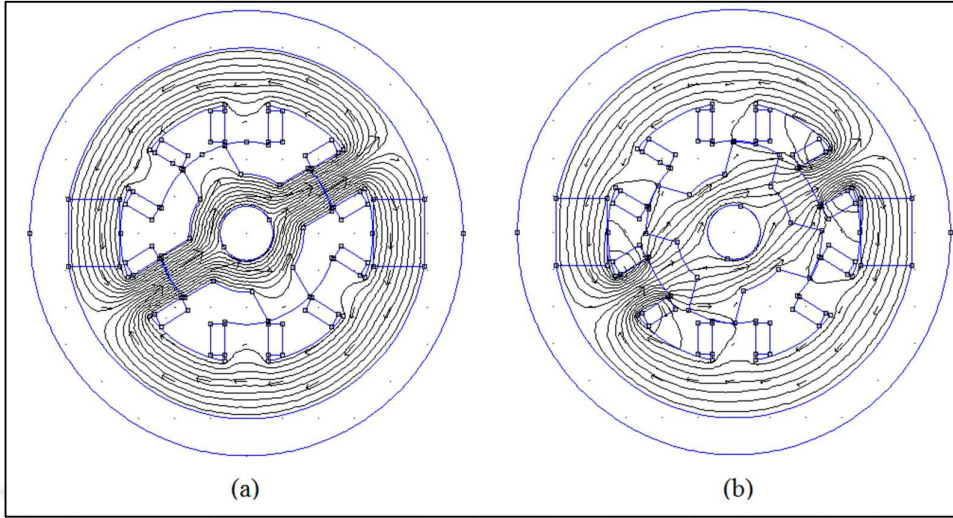
Çizelge 3.3 : Belirli uyarım akımında A, B, C fazları moment değerleri.

Akım (A)	A Faz Moment (N.m)	B Faz Moment (N.m)	C Faz Moment (N.m)
0,55	-0,2094	-0,1725	-0,2075
1,45	-0,5318	-0,4984	-0,5298
2,56	-0,9417	-0,9118	-0,94
3,91	-1,4508	-1,425	-1,4496
5,45	-2,0343	-2,014	-2,0348
7,35	-2,7240	-2,7156	-2,7277
9,61	-3,4396	-3,4435	-3,4457
12,57	-4,2416	-4,253	-4,2493
15,96	-5,0689	-5,08	-5,0791
19,98	-5,9567	-5,9694	-5,9667
24,67	-6,8608	-6,872	-6,869
0,55	-7,7883	-7,797	-7,7953

FEMM'den elde edilen tüm veriler tablo halinde ekler kısmında verilmiştir.

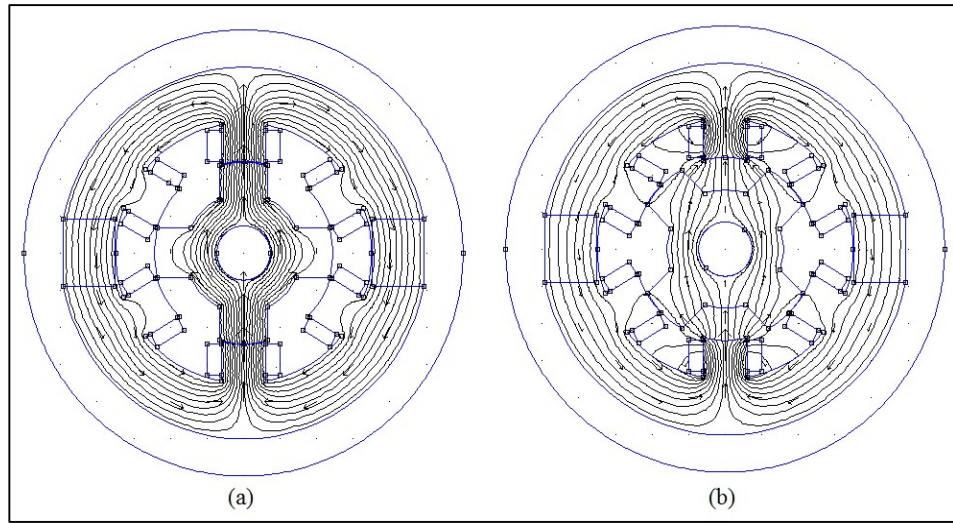
3.3 FEMM Analiz Sonuçları

Aşağıdaki şekillerde ARM'nin A, B ve C fazları için sırasıyla hizalı ve hizasız konum için akı dağılımları verilmiştir. Bu sonuçlar FEMM de yapılan analizin çıktıları olarak alınmıştır. İlk önce anahtarlamalı relüktans motor için A, B, C fazları hizalı ve hizasız konumlarında incelemeler yapılmıştır. Sırasıyla tüm fazlar 6 A ile uyarılmıştır. Bir fazın uyarımı yapılırken diğer fazların 0 A de olması sağlanmıştır. Yani A fazının hizalı hizasız konumlarında akı dağılımı şeklini oluştururken A fazı 6 A ile uyarılıyorken diğer fazlar (B ve C) 0 A ile uyarılmıştır. Böylece sadece bir fazın etkisinde oluşan akı dağılımı elde edilmiştir. Tüm hizalı konumlarda akı yolunun minimum relüktansı takip edecek şekilde yollarını tamamladıkları görülmektedir. Hizalı konumda hava aralığındaki Relüktans değeri minimum olduğundan dolayı, akı değeri maksimum değerine ulaşmıştır. Hizasız konumlarda ise hava aralığındaki Relüktans değerinin maksimuma ulaşmasından dolayı akı değeri çok düşük olduğu gözlemlenmiştir. FEMM programında motorun bir anlık analizi yapıldığı için aslında yapılan analiz statik analizdir. Bunun için özellikle verilen look-up grafiklerinde renkler yanıltıcı olabilir. Bu FEMM programının dezaantajıdır. Bundan dolayı verilen grafikler incelenirken, grafiğin akı yoğunluğunu belirten renkler sadece o an için özeldir. Diğer grafikler ile karşılaştırmamak gerekir.

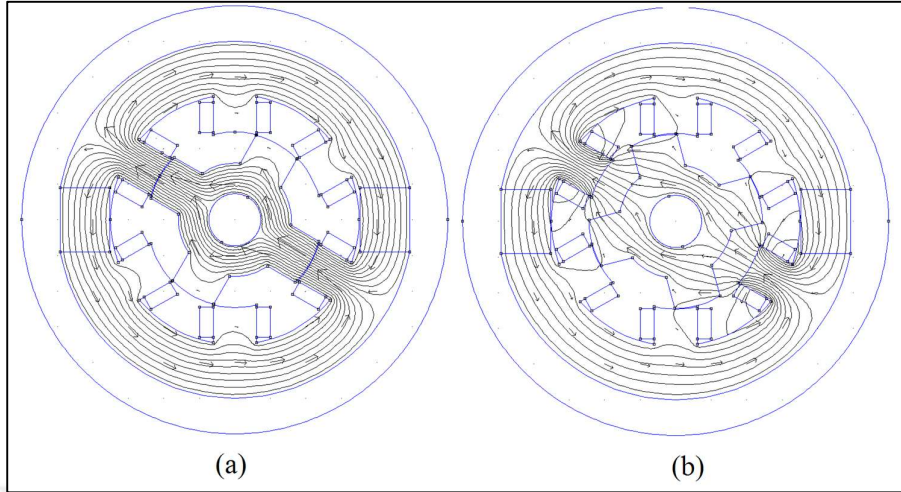


Şekil 3.4 : ARM’da A fazının 6 A ile uyarılması sonucu oluşan akı yönleri: (a) Hizalı.
(b) Hizasız.

Şekil 3.4’de A fazı 6 A ile uyarılmış ARM’nin hizalı ve hizasız konum durumları için oluşan akının yönleri gösterilmiştir. Hizalı konumda, oluşan toplam akı hava aralığı relüktansı minimum değerde olmasından dolayı düzgün bir şekilde yolunu tamamlamıştır. Hizasız konumda hava aralığı relüktansı maksimum olduğundan dolayı akı dağılımında saçaklanmalar görülmektedir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’daki grafikleri ise sırasıyla B ve C fazlarının 6 A ile uyarılması sonucu elde edilen akı dağılımı grafiklerini göstermektedir. Bu grafikler alınırken herhangi bir faz uyarılıyorken diğer iki faz uyarım akımı sıfırdır.

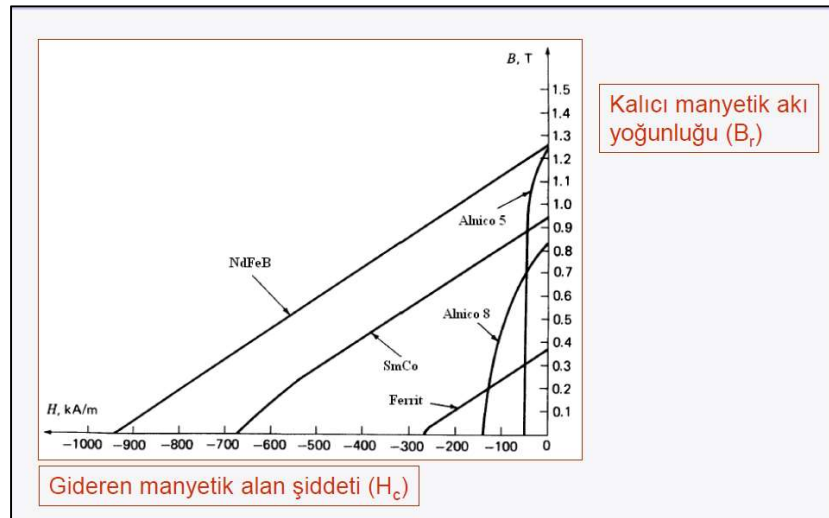


Şekil 3.5 : ARM’da B fazının 6 A ile uyarılması sonucu oluşan akı yönleri: (a) Hizalı.
(b) Hizasız.



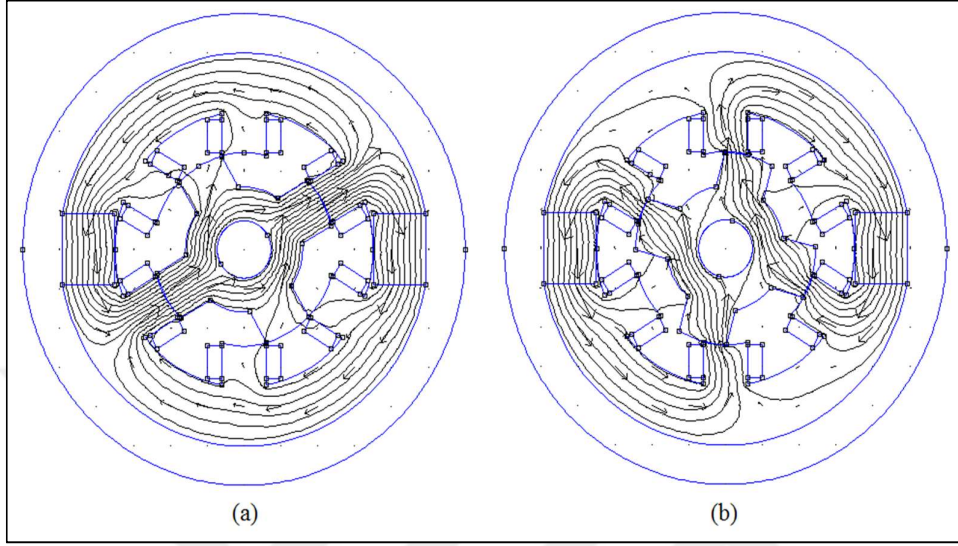
Şekil 3.6 : ARM'da C fazının 6 A le uyarıtımı sonucu oluşan akı yönleri: (a) Hızlı.
(b) Hızsız.

Anahtarlamalı relüktans motor FEMM programı ile tasarlandıktan sonra sürekli mıknatıslı anahtarlamalı Relüktans motor tasarımına geçilmiştir. Bunun için statora iki adet kalıcı mıknatıs yerleştirilmiştir. Statora yerleştirilen mıknatıs Alnico-5 dir. Bu mıknatısın seçilmesinin nedeni maliyetinin düşük olmasıdır. Alnico-5, NdFeB'nin akı değerleri kadar iyi bir akı değerine sahiptir ve NdFeB'dan ucuz bir malzemedir. Alnico-5'in kolayca demagnetize olması en büyük dezavantajıdır. Mıknatıslı tasarım yapılırken rotorun hiçbir konumu için motor ters manyetik alana maruz bırakılmamıştır. Yani bu dezavantaj ortadan kaldırılmıştır. Aşağıdaki şekilde [29] yaygın olarak kullanılan mıknatısların B-H eğrileri verilmiştir. Bu grafiklerden 'de Alnico-5'in bahsedilen özelliklerini görmek mümkündür (Şekil 3.7).



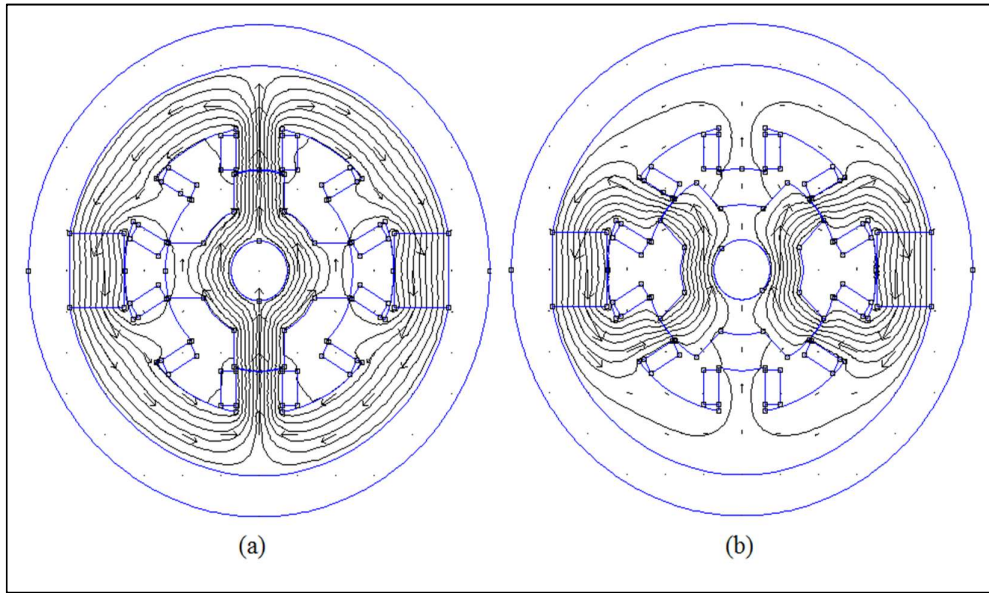
Şekil 3.7 : B-H mıknatıs Eğrileri.

Aşağıdaki şekillerde ise Alnico-5'li ARM'nin A, B ve C fazlarının akı yönleri verilmiştir. İlgili fazlar 6 A ile uyarılmıştır.

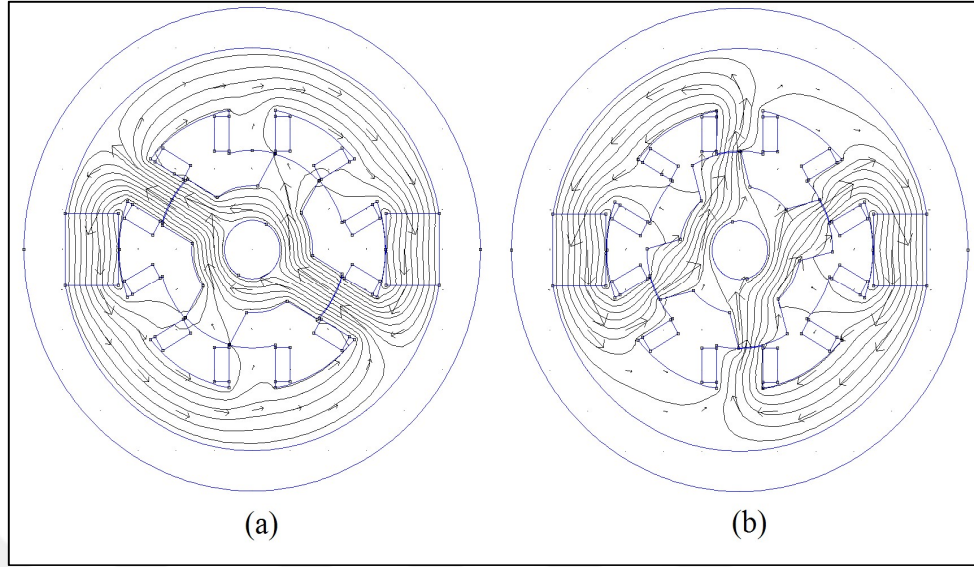


Şekil 3.8 : SMARM'da A fazının 6 A ile uyarılması durumunda oluşan akı yönleri:
(a) Hizalı. (b) Hizasız.

Şekil 3.8'de A fazı için hizalı ve hizasız konumlarda, 6 A uyarım akımı ile elde edilen akı dağılım grafiği gösterilmiştir. Burada statorunda bulunan sürekli mıknatısların akı yönlerinden dolayı hizasız konumda bile akı düzgün bir şekilde rotor üzerinden yolunu tamamlamaktadır. Akı daha yoğun olduğu için saçaklanma ARM ye göre daha azdır.



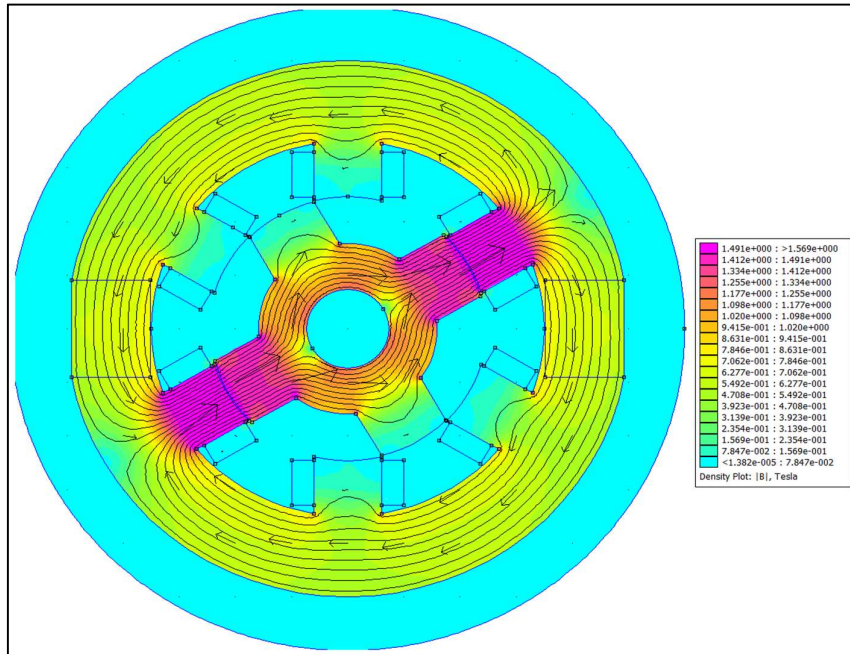
Şekil 3.9 : SMARM'da B fazının 6 A ile uyarılması durumunda oluşan akı yönleri:
(a) Hizalı. (b) Hizasız.



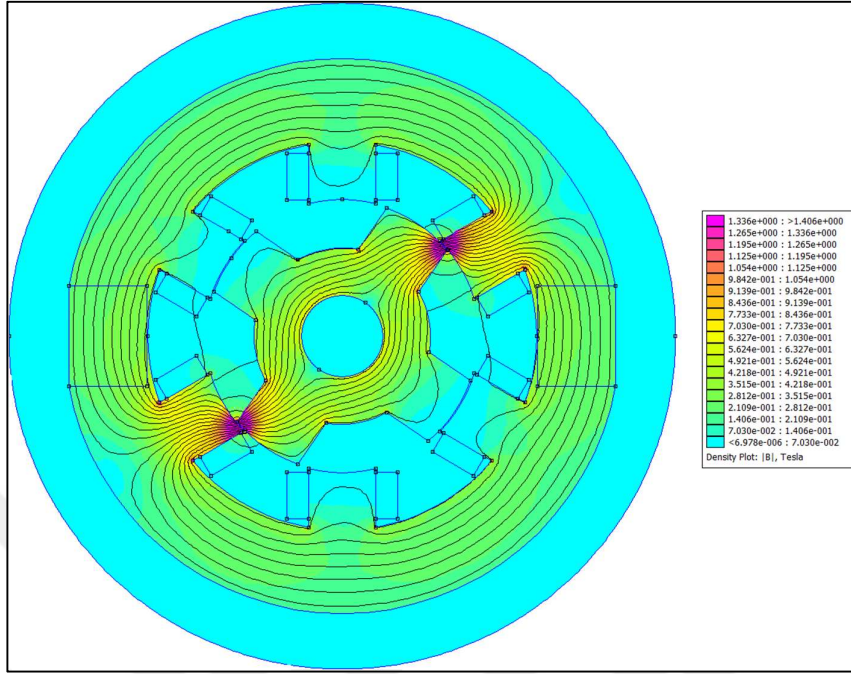
Şekil 3.10 : SMARM’da C fazının 6 A ile uyarılması durumunda oluşan akı yönleri:
(a) Hizalı. (b) Hizasız.

SMARM’nin B ve C fazlarının sırasıyla 6 A ile uyarılması sonucu hizalı ve hizasız konumlarda elde edilen akı dağılımları Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’ da göstermektedir. SMARM’de akı değerinin ARM’ye göre daha fazla olduğu gözlenmektedir.

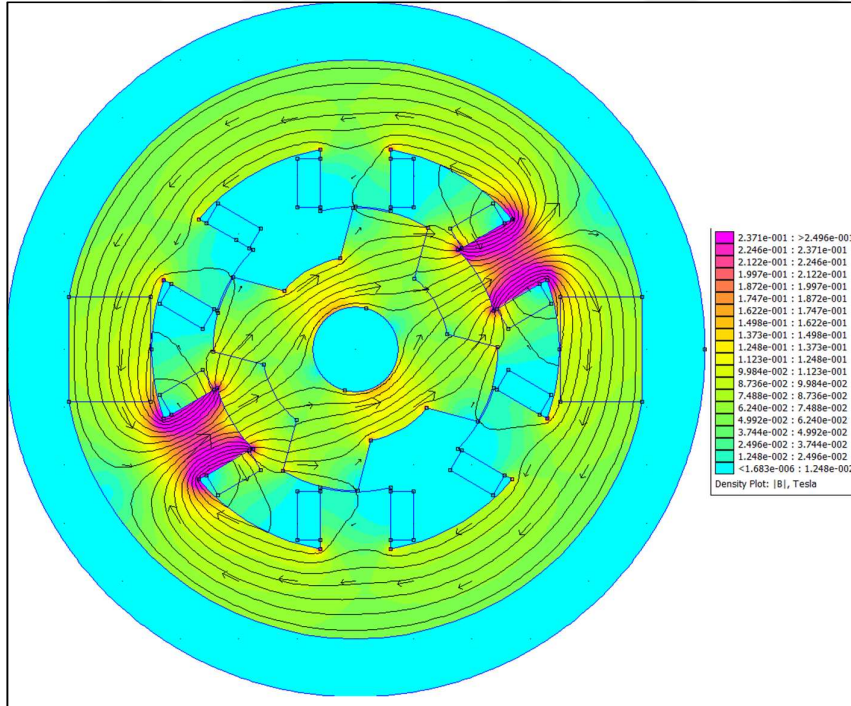
Aşağıdaki grafikler ise mıknatıslı ve mıknatıssız durumlar için hizalı konumda ve 6 A de akı yoğunluğu grafiklerini göstermektedir.



Şekil 3.11 : ARM’nin A Fazı hizalı iken 6 A ile uyarımda akı yoğunluğu.



Şekil 3.12 : ARM $\theta = 25^\circ$ ve A fazı 6 A de uyarımla akı yoğunluğu.

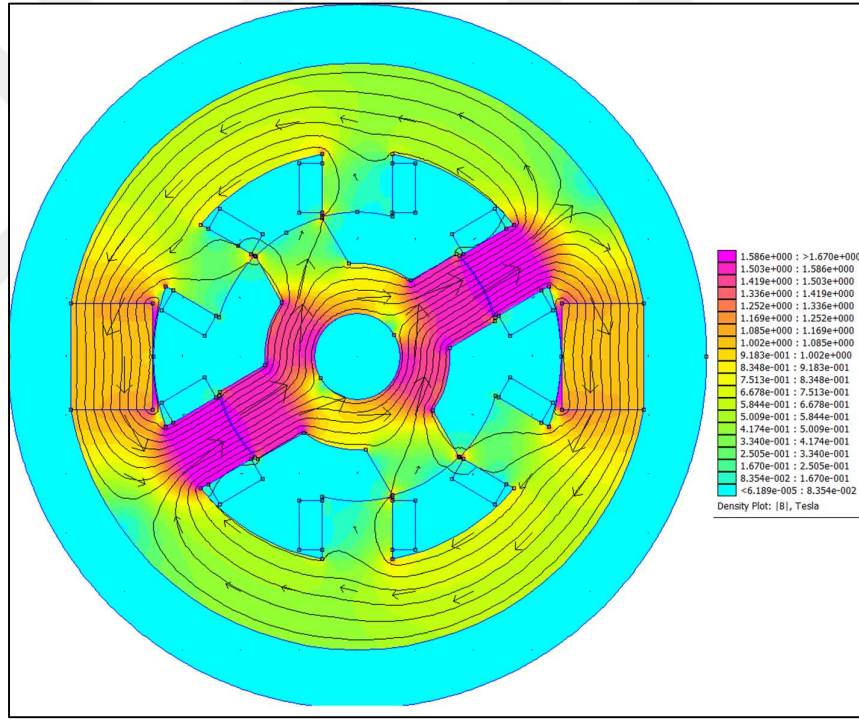


Şekil 3.13 : ARM A fazı hizasız konum ve 6 A de uyarımla akı yoğunluğu.

Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de A fazına ait sırasıyla hizalı konum, 25 derece ve hizasız konumda elde edilen akı yoğunluğu grafikleri verilmiştir. Burada hizalı konumda iken akı yoğunluğu hava aralığında 1,49 T ile 1,56 T arasında değişmektedir.

Motor dönmeye devam ettikçe Relüktans değeri büyüdüğünden dolayı akı yoğunluğuda düşmektedir. Hizasız konum için akı yoğunluğu 0,23 T olarak görülmüştür.

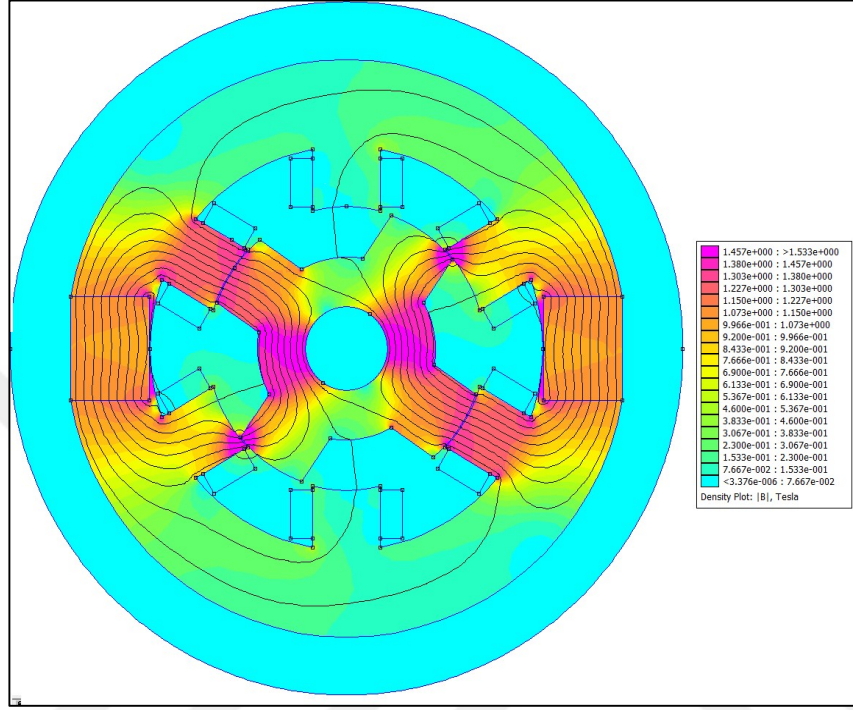
Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 da SMARM için akı yoğunlukları verilmiştir. SMARM'de daha öncede belirtildiği gibi statorda bulunan sürekli mıknatıslardan dolayı akı değeri ARM'den fazladır. Akı yoğunlukları grafiklerine baktığımızda da aynı yorumlar yapılabilir. Hizalı konum için iki motoru da akı yoğunlukları bakımından karşılaştıracak olursak; ARM'de 1,49 T iken sürekli mıknatıslıda bu değer 1,68 T olduğunu görürüz. Aynı üstünlük A fazının tüm rotor konumları için ve B, C fazları içinde geçerlidir.



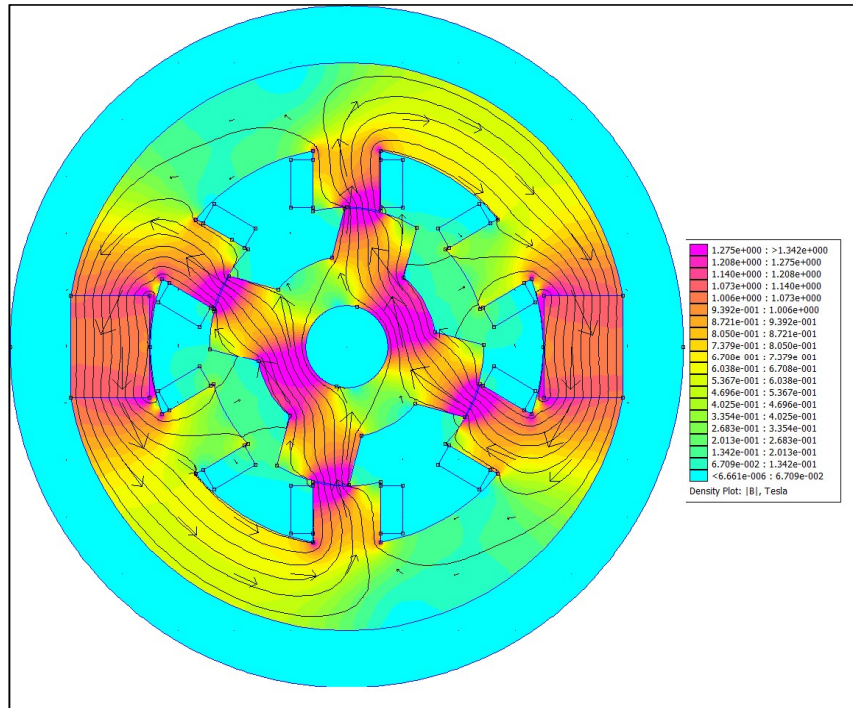
Şekil 3.14 : SMARM A fazı hizalı konum ve 6 A ile uyarıtımla akı yoğunluğu.

Burada akı yoğunlukları verilen şekillerde farklı akı değerleri farklı şekillerde değişik renk sklası ile verilmiştir. Bunun nedeni FEMM programıdır. FEMM analizleri statik olarak yapmaktadır. Motorun bir anlık konumu için FEMM analizi yapar ve bu analize ait sonuçları verir. Başka bir an için analiz yapmak istediğimizde aldığımız veriler (akı yoğunluğu grafiği gibi) sadece o an için verilir. Yani eğer o anda maksimum akı yoğunluğu değeri 0,23 T ise akı yoğunluğu grafiği alınırken bu değer kırmızı olarak görülür. Başka bir konum için akı yoğunluğu değeri 0,19 T ise bu sefer kırmızı renk

0,19 T için grafikte görülecektir. Grafikler yorumlanırken bu bilgi göz önünde bulundurulmak zorundadır. Aksi takdirde grafiklerin yanlış olduğu düşünülebilir.

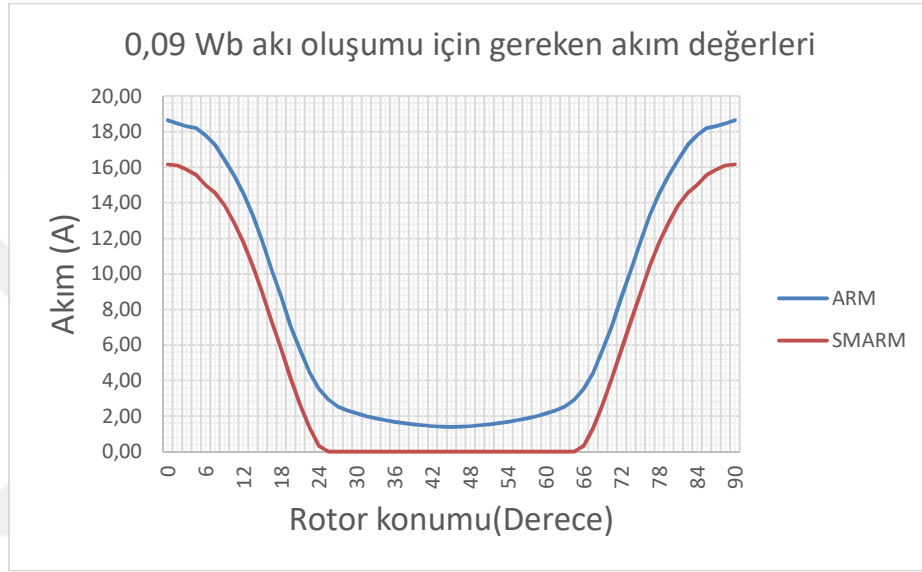


Şekil 3.15 : SMARM A fazı $\theta = 25^\circ$ ve 6 A de uyartımlı iken akı yoğunluğu.



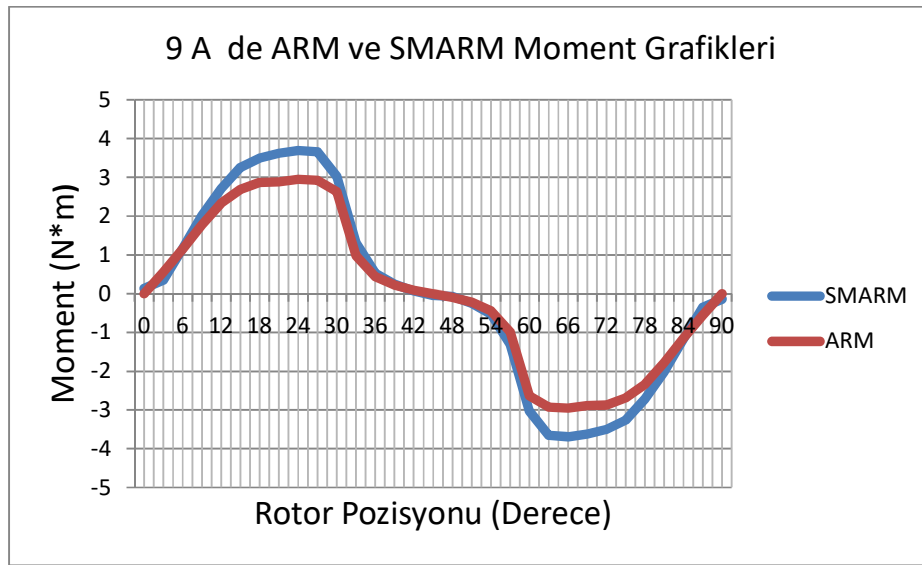
Şekil 3.16 : SMARM hizasız konum ve 6 A ile uyartımla akı yoğunluğu.

Aşağıdaki grafikte 0,09 Wb için gerekli olan akım değerleri grafiği verilmiştir (Şekil 3.17). Grafikten de açıkça görüldüğü gibi gerekli akı değerini elde etmek için SMARM'de daha az akım gerektiği görülmektedir. Bunun nedeni ise SMARM'de bulunan sürekli mıknatıslar bir akı değeri oluşturmaktadır. Mıknatısların oluşturduğu bu akı toplam akıyı arttırmaktadır. Örneğin 0,09 Wb değerinde akıyı oluşturmak için SMARM'de daha az akım gerekmektedir.



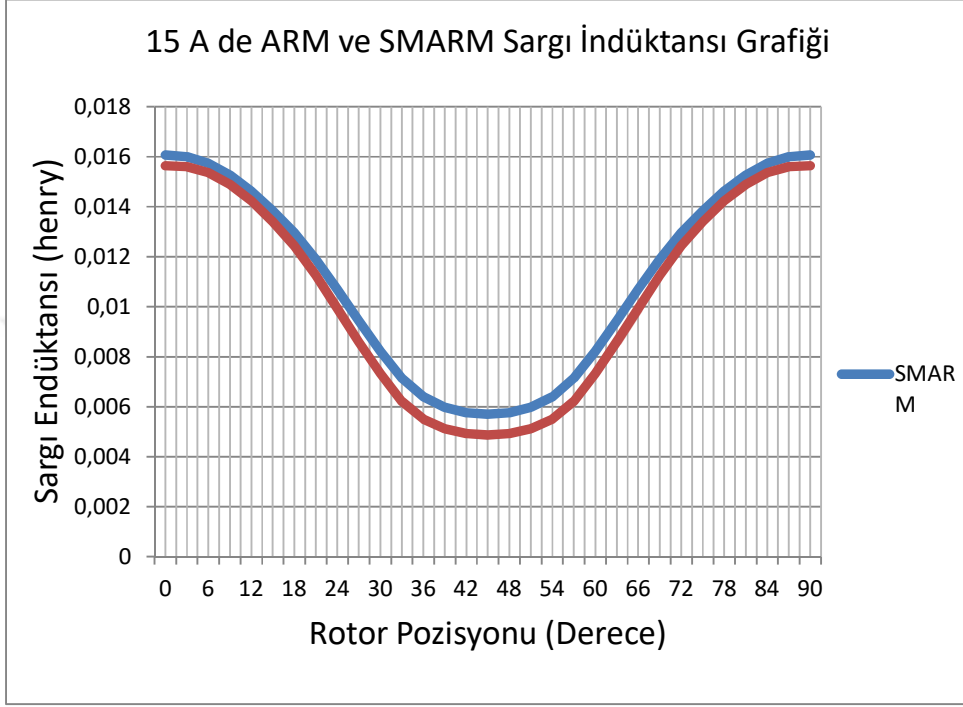
Şekil 3.17 : 0,09 Wb akı oluşturmak için ARM ve SMARM akım-rotor konumu.

Aşağıdaki grafikte ARM ve SMARM için karşılaştırmalı olarak moment grafikleri verilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 : ARM ve SMARM moment grafikleri.

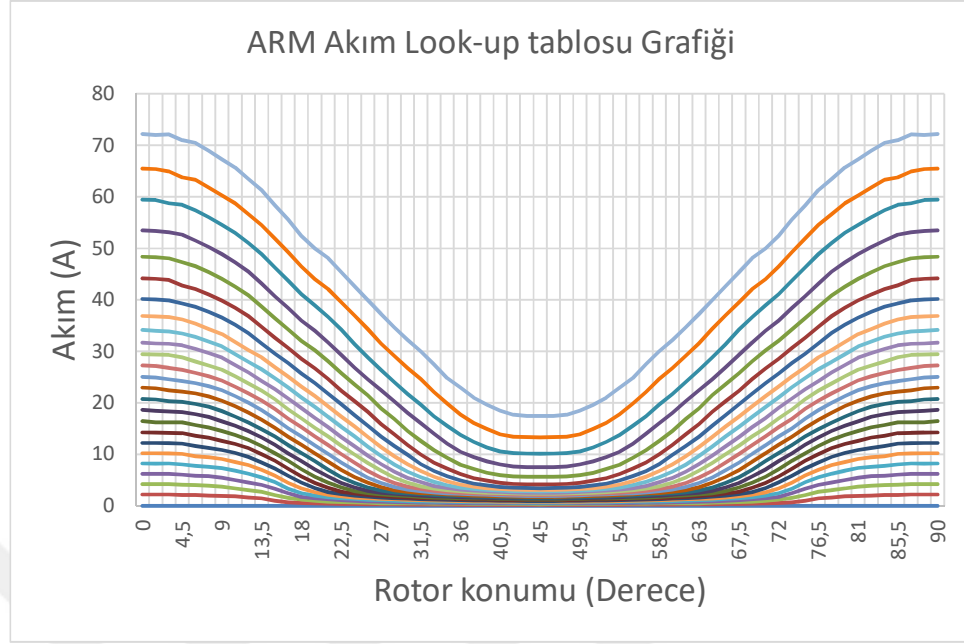
SMARM'de moment değeri aynı pozisyon ve akımdaki ARM'den daha fazladır (Şekil 3.18). Bunun nedeni SMARM de statorda bulunan kalıcı mıknatıslardır. Aşağıdaki şekilde ise sargı indüktansı-rotor konumu grafiği verilmiştir (Şekil 3.19).



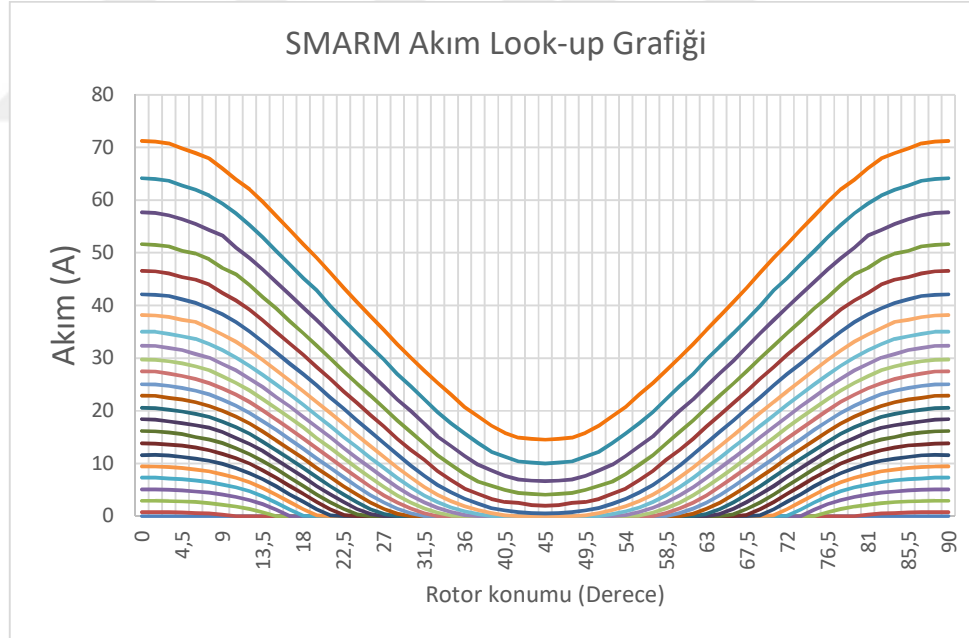
Şekil 3.19 : ARM ve SMARM sargı indüktansı-rotor konumu grafiği.

Aynı rotor konumunda ve aynı faz akımı uyarıtımı altında SMARM'nin faz indüktans değeri daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Aşağıdaki grafiklerde ise FEMM analizinden elde edilmiş olan sonuçlar toplu bir şekilde gösterilmiştir. Bu grafikler aslında akım ve moment look-up tablolarının birer çizimidir. Şekil 3.20 ve 3.21'deki grafikler ARM ve SMARM için oluşturulmuş olan akım look-up tablo grafikleridir. Bu grafiklerde rotor konumu ve akım grafikleri verilmiştir. Grafikte görülen her bir renkli eğri 0, 0,01, 0,02,, 0,24 Wb akı değerlerine ait rotor konumu ve bu konuma karşılık gelen akım değeri grafiğidir. Şekil 3.20 ve şekil 3.21'de ise motora ait rotor konumu-moment grafiğinde verilen her bir renkli eğri, motordaki akı değerine karşılık gelmektedir. Yani görülen eğri ailesi 0, 0,01, 0,02,, 0,24 Wb değerlerinin her birini temsil eden rotor konumu ve bu konuma karşılık gelen moment değerleridir.



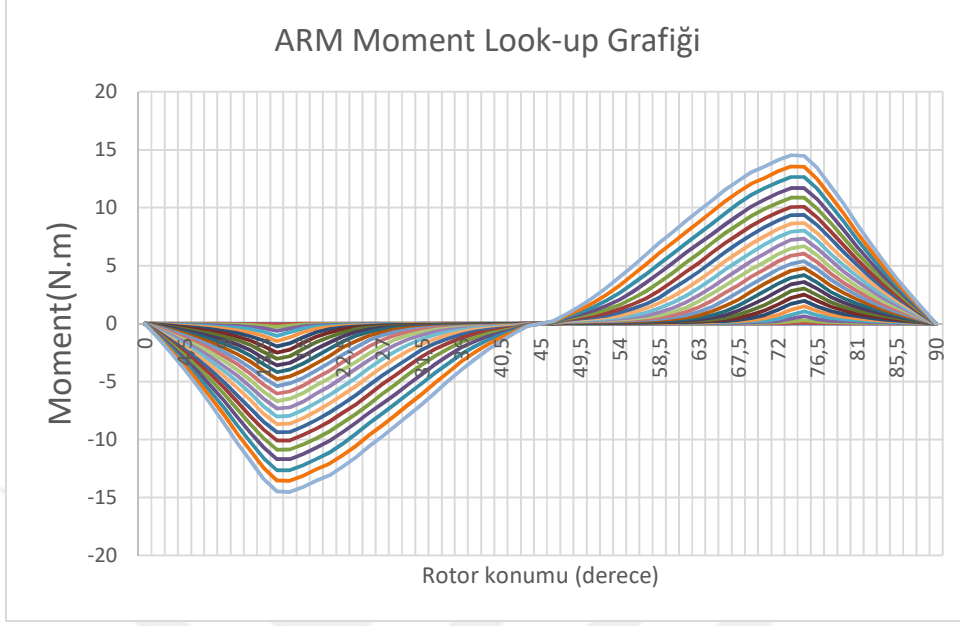
Şekil 3.20 : ARM akım Look-up grafiği.



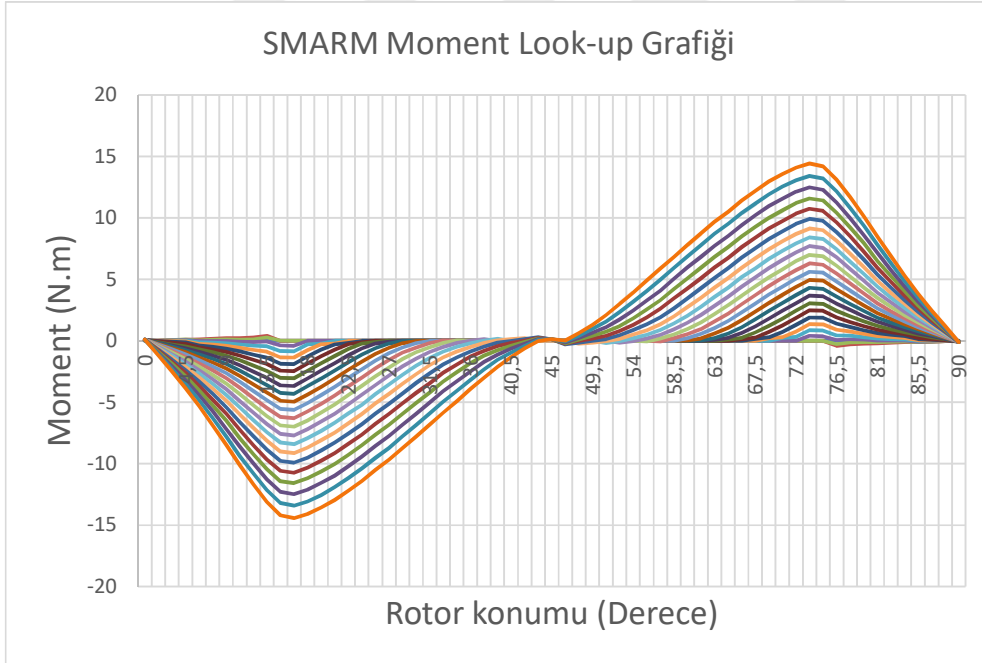
Şekil 3.21 : SMARM akım look-up grafiği.

Burada akımın üst değerlerinin 75 A maksimum değerine kadar çıktığı görülmektedir. Bu değer aslında çalışma bölgesi değeri değildir, sadece look-up tablosunu oluştururken elde edilmiş bir değerdir.

Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’de görülen grafikler ise ARM ve SMARM için elde edilmiş olan moment look-up grafikleridir.



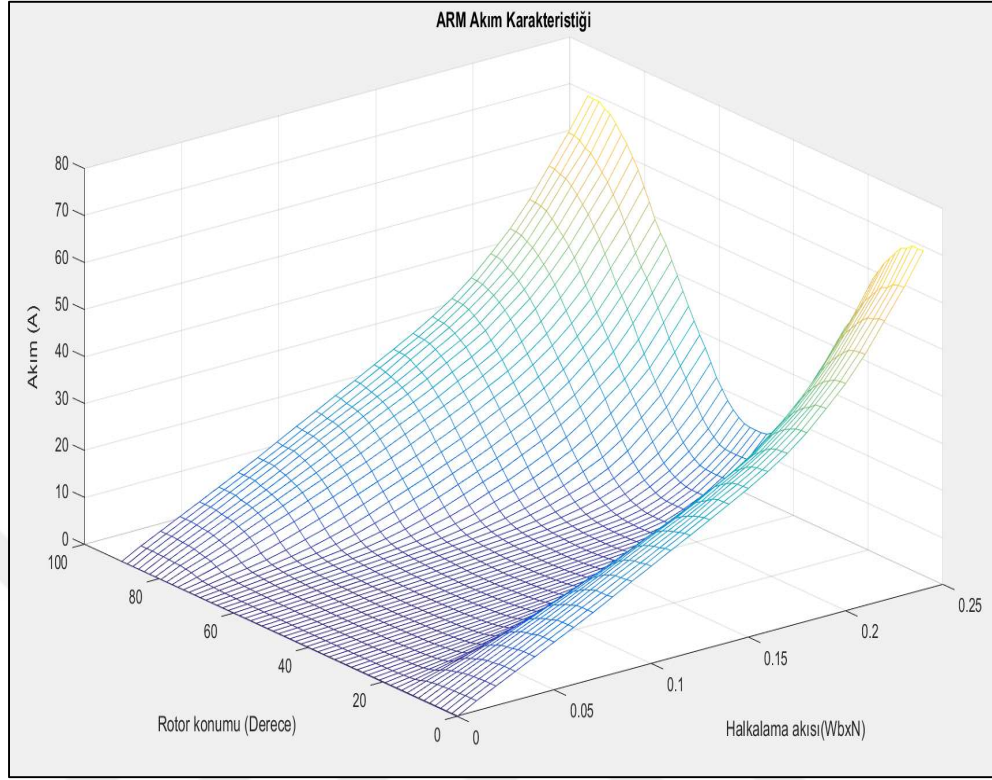
Şekil 3.22 : ARM moment look-up grafiği.



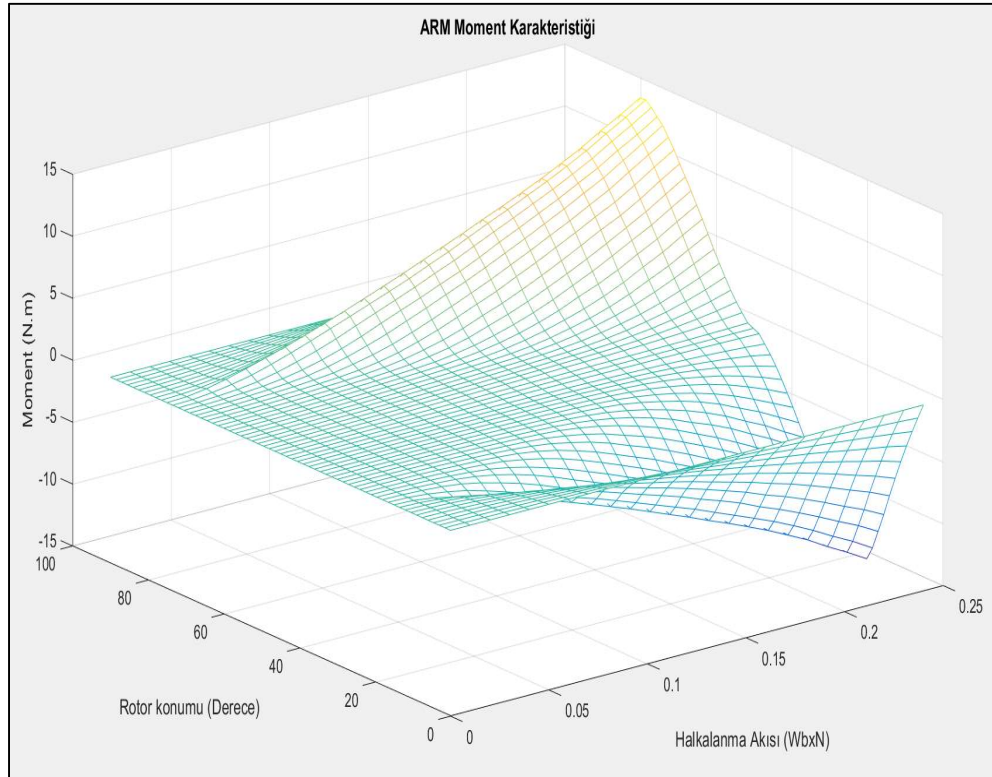
Şekil 3.23 : SMARM moment look-up grafiği.

Aşağıdaki grafiklerde ise mıknatıslı ve mıknatıssız ARM için akım ve moment karakteristikleri verilmiştir (Şekil 3.24-Şekil 3.27).

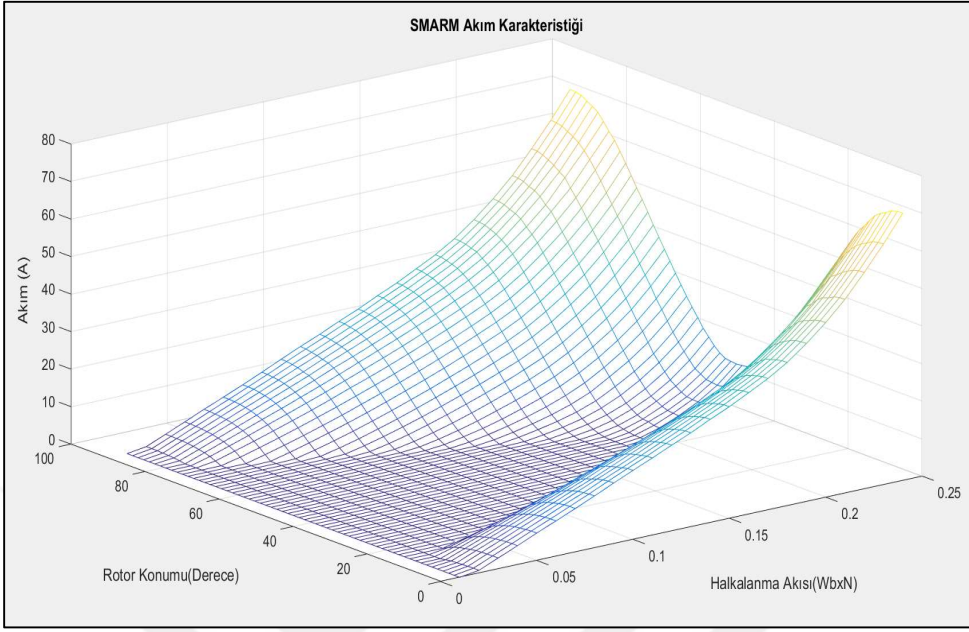
Şekil 3.24 de gösterilen ARM akım karakteristiğinde eksenler rotor konumu, halkalanma akısı ve akım'dır. Şekil 3.25 de ise moment, rotor konumu ve halkalanma akısıdır.



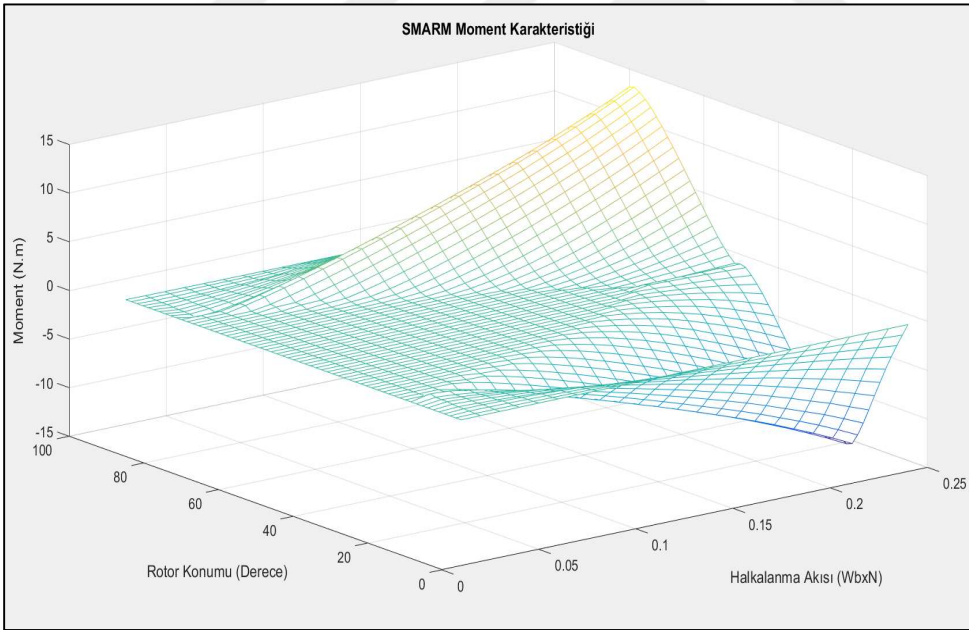
Şekil 3.24 : ARM akım karakteristiği.



Şekil 3.25 : ARM moment karakteristiği.



Şekil 3.26 : SMARM akım karakteristiği.



Şekil 3.27 : SMARM moment karakteristiği.

Şekil 3.26'da SMARM ye ait akım karakteristiği görülmektedir. Bu karakteristikte eksenler akım, rotor konumu ve halkalanma akısı dır.

Şekil 3.27'de ise SMARM ye ait moment karakteristiği görülmektedir. Bu karakteristikte eksenler moment, rotor konumu ve halkalanma akısı'dır.

4. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNESİNİN MATLAB MODELİ

Bu bölümde ARM ve SMARM'nin Matlab ortamında yapılan motor ve sürücü modelleri gösterilmiştir. Ayrıca motorun boşa çalışma, yüklü çalışma gibi şartlar altındaki davranışı gösterilmiştir. Yapılan modellerde hız ve akım kontrol uygulamaları yapılmıştır. Akım kontrolü olmasından dolayı momentin dolaylı olarak kontrolü sağlanmıştır. Hız kontrolü için basitlik olması açısından histeresiz kontrol seçilmiştir. Akım kontrolü için ise PWM metodu kullanılmıştır.

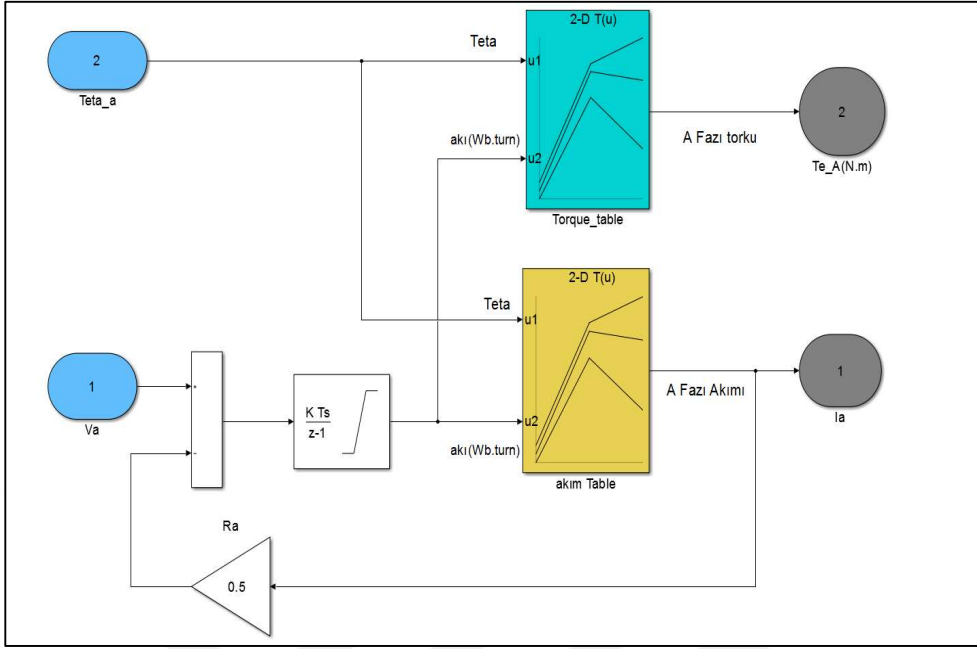
4.1 ARM Elektriksel Model

Anahtarlama Relüktans motorda bir faza ait elektriksel eşitliği veren denklem aşağıdaki gibidir.

$$V = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (4.1)$$

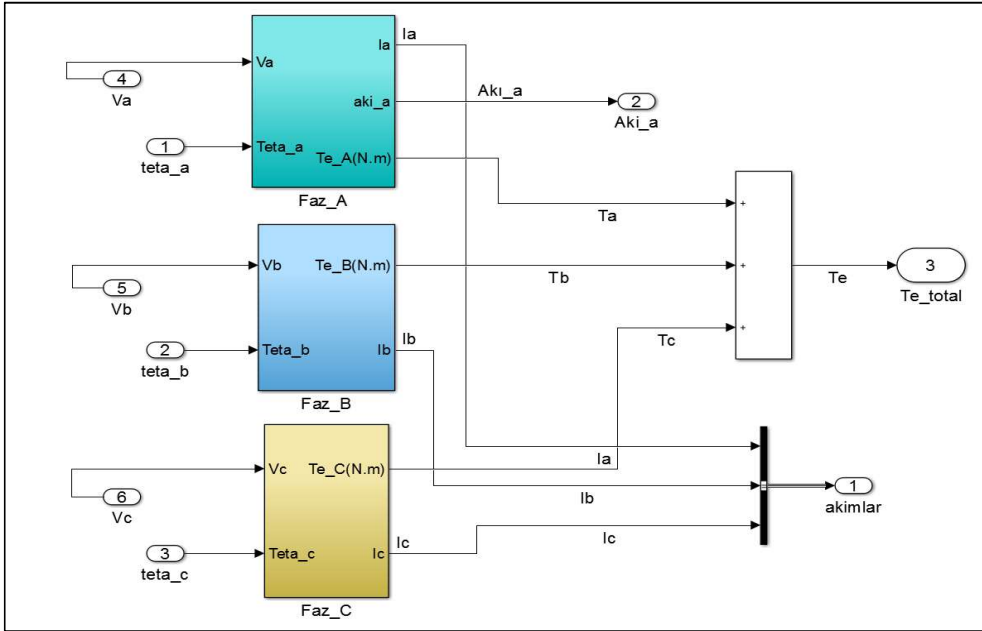
Burada motor modelini oluşturmak için iki adet look-up tablosu kullanılmıştır. Birinci look-up tablosu girişi halkalama akısı ve rotor pozisyonu olup çıkış değeri ise bu konumda belirli olan akı değerini elde edebilecek olan akım değeridir. İkinci look-up tablosu ise yine girişi halkalanma akısı ve rotor pozisyonu iken, çıkışı ise moment değeridir. Elde edilen look-up tabloları 2 boyutludur. Akım look up tablosunda, belirli akı ve rotor konumuna karşılık gelen motor akımı elde edilerek denklem 4.1 gereğince bir dizi matematiksel işleme tabi tutularak sonuçta gerilim elde edilmiştir. Elde edilen gerilimin integrali alınarak (Faraday yasasının tersi) akı elde edilmiştir.

Yukarıdaki bir faza ait elektriksel denklem, matematiksel olarak *Simulink* ortamında kurulmuştur. Motor 3 fazlı olduğundan dolayı aynı bloklar diğer 2 faz içinde kullanılmıştır. Moment look-up tablosundan elde edilen moment değeri sadece bir faza ait moment değeridir. Diğer fazlardan gelen moment değerleri ile toplanarak toplam elektriksel moment bulunmuştur. Akı look-up tablosundan elde edilen akım ise yine ilgili fazın akım değeridir.



Şekil 4.1: ARM tek faz modeli.

Şekil 4.1’de elde edilen moment değeri tez faz için geçerlidir. Motordaki toplam momenti bulmak için üç fazdan da gelen momentler toplanmıştır. Bu toplam moment değeri mekanik sisteme verilerek hız ifadesi elde edilmiştir. Şekil 4.2’de bu yapı görülmektedir.



Şekil 4.2: ARM 3 faz modeli ve toplam elektriksel moment.

4.2 Mekanik Model

Mekanik modelin kurulması için öncelikle mekaniksel matematik ifadenin transfer fonksiyonu çıkarılmış ve bu transfer fonksiyonuna göre model oluşturulmuştur.

$$j \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega = T_e - T_L \quad (4.2)$$

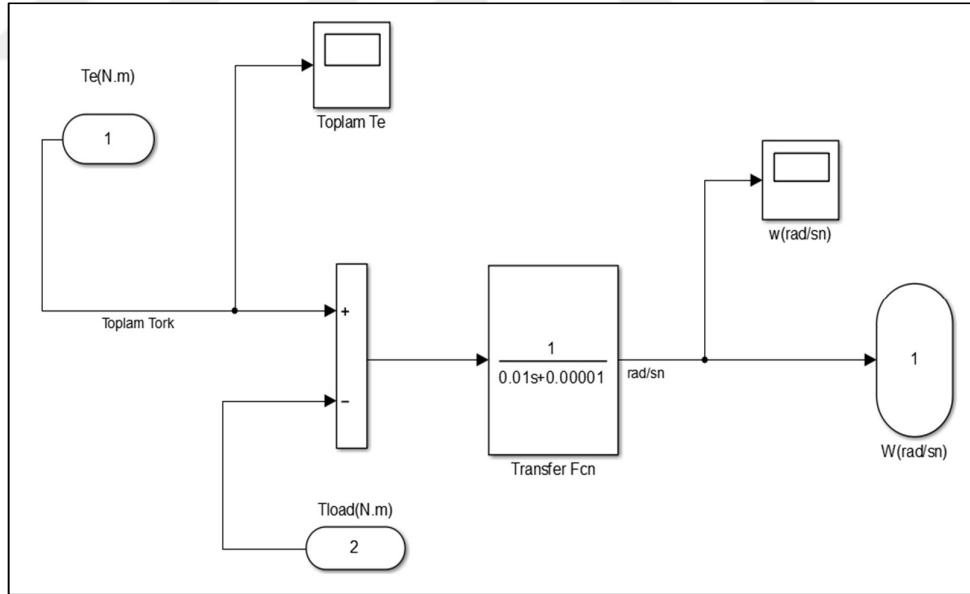
$$j \cdot s\omega + B \cdot \omega = T_e - T_L \quad (4.3)$$

$$\omega(j \cdot s + B) = T_e - T_L \quad (4.4)$$

$$\omega = (T_e - T_L) \cdot \frac{1}{js+B} \quad (4.5)$$

Denklem 4.2 de $J = \text{atalet momenti}$, $B = \text{sürtünme katsayısı}$, $\omega = \frac{\text{rad}}{\text{sn}}$ hızı .

Şekil 4.3 de mekanik sistem bloğu görülmektedir.



Şekil 4.3: ARM mekanik model.

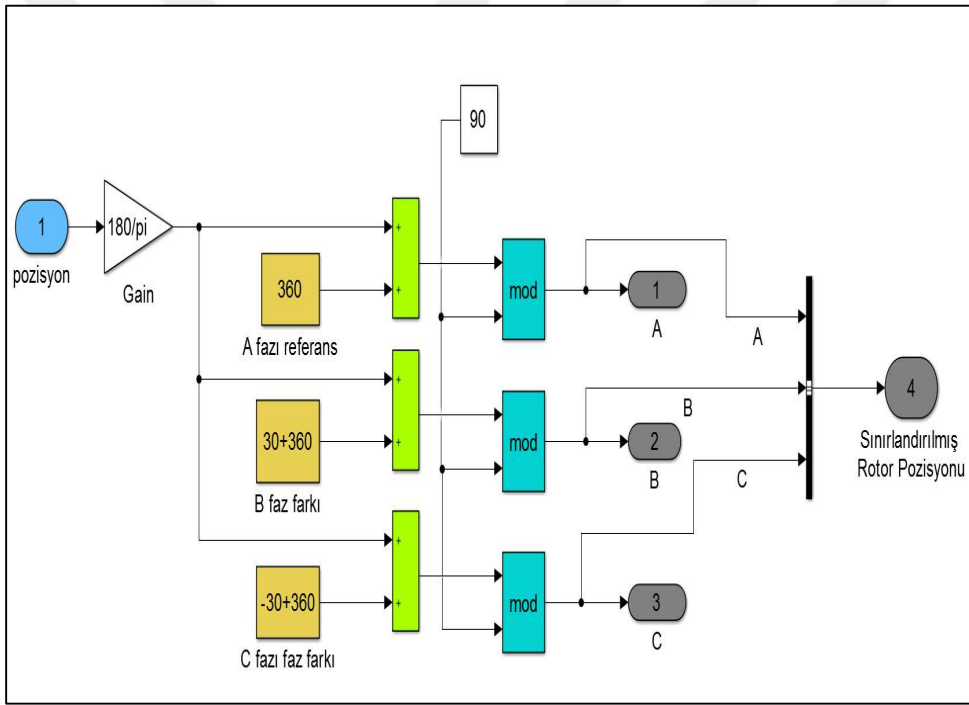
Mekanik hız elde edildikten sonra zamana göre integrali alınarak konum elde edilmiştir. Konum sürekli olarak arttığından dolayı bunu 0° ile 90° arasında sınırlandırmak gerekmektedir. Mekanik sistem için denklem 4.4'de verilen transfer fonksiyonu kullanılmıştır.

4.3 Kontrol Sinyallerinin Oluşturulması

Rotor konumu 0° ile 90° arasına sınırlandırıldıktan sonra stator sargılarını motor ya da jeneratör çalışma için belirli şartlarda tetiklememiz gerekmektedir. Tetikleme işlemlerinin yapılabilmesi için rotor konumuna göre referans sinyaller oluşturulmuştur.

4.3.1 Rotor pozisyonunun $0^\circ - 90^\circ$ arasına sınırlandırılması

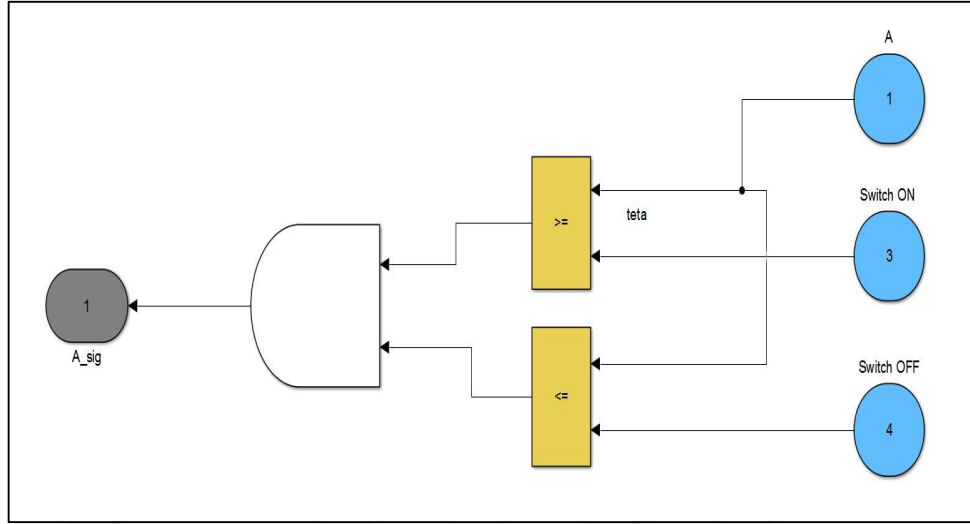
Hızın integrali alınarak bulunan konum bilgisi motorun simetrisinden dolayı $0^\circ - 90^\circ$ arasına indirgenmiştir. Şekil 4.4’de bu sistem görülmektedir.



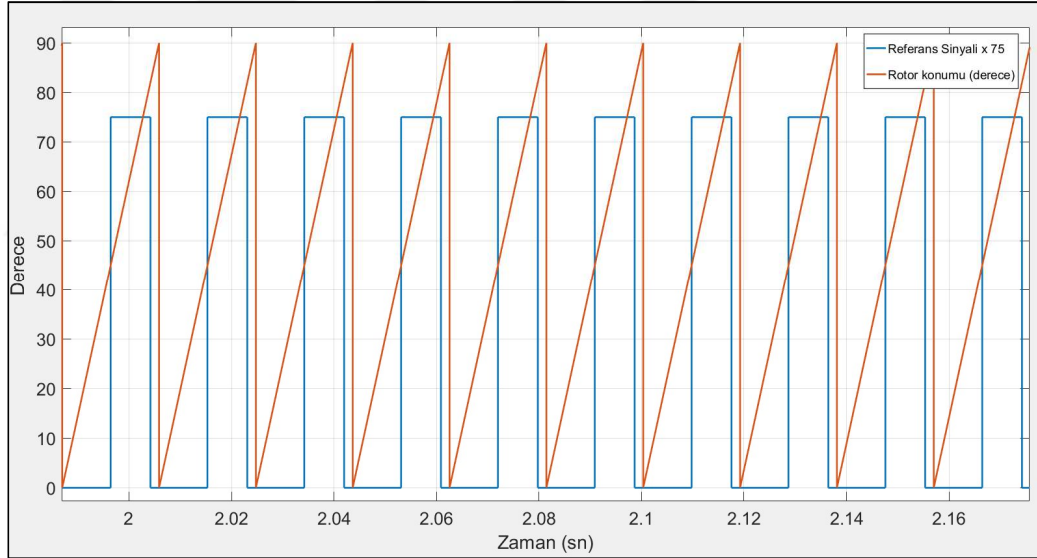
Şekil 4.4: Rotor pozisyonunu $0^\circ - 90^\circ$ arasına sınırlandırılması.

4.3.2 Referans iletime ve kesime girme zamanı sinyallerinin oluşturulması

ARM'nin motor olarak çalışabilmesi için stator sargıları, rotor kutbu stator kutbuna yaklaşıyorken enerjilendirilmelidir. Bunun için referans sinyalleri oluşturulmuştur. Buradaki mantık şöyledir; A fazı için düşünecek olursak eğer, A rotor konumu iletime girme zamanından büyükse ve aynı zamanda kesime girme zamanından da küçükse bu koşulda bir sinyal üretilmiştir. Bu durumun Simulink blok gösterimi şekil 4.5’de gösterilmiştir. Diğer fazlar içinde aynı mantık ifadeleri geçerlidir.



Şekil 4.5: Rotor konumuna göre A fazının referans sinyalinin belirlenmesi.



Şekil 4.6: A Fazı rotor konumu ve referans sinyali grafiği.

Şekil 4.6'da A fazına ait rotor konumu (derece) ve aynı eksen üzerine çizdirilmiş referans iletime girme zamanı ve kesime girme zamanı zamanlarına göre oluşturulmuş olan referans sinyalleri gösterilmiştir. Burada iletime girme zamanı 45° ve kesime girme zamanı ise 82° dir.

4.4 Anahtarlama Relüktans Motor Kontrolü

Bu tezde kontrol algoritması için iki çeşit kontrol uygulanmıştır. Motorun akımı ve hızı histeresiz ve PWM kontrol teknikleri ile kontrol edilmiştir.

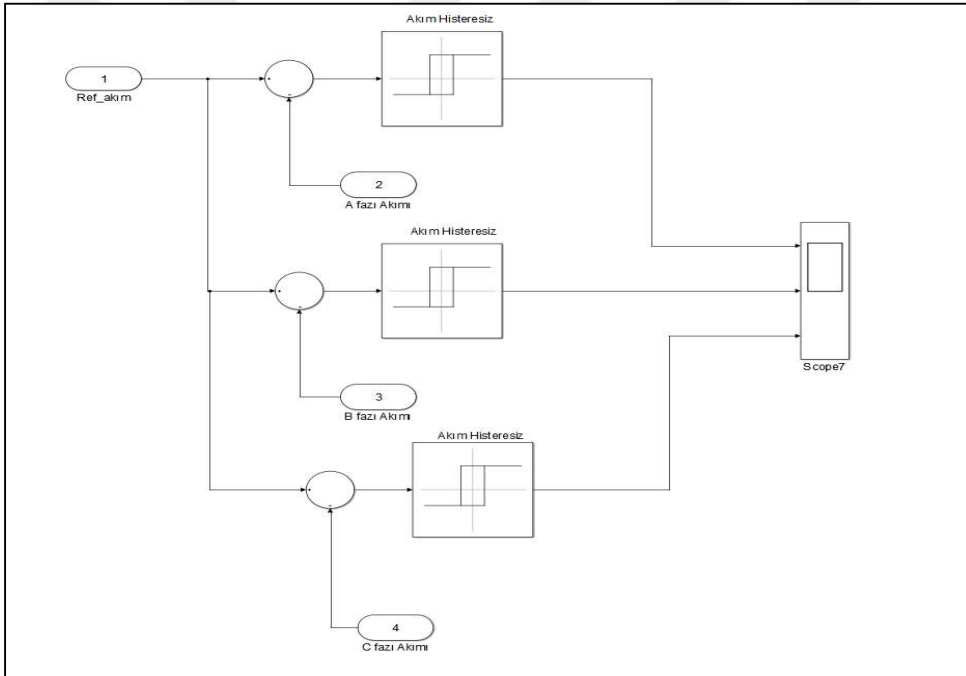
4.5 Anahtarlamalı Relüktans Motor Akım Kontrolü

ARM'nin akımını yani dolayısıyla momentini kontrol etmek için histeresiz metodu kullanılmıştır. Histeresiz seçilmesinin nedeni ise uygulamasının basit olmasıdır.

Histeresiz kontrol için aşağıdaki denklem yazılabilir;

$$\Delta i_{hata} = i_{ref} - i_{faz_{a,b,c}} \quad (4.6)$$

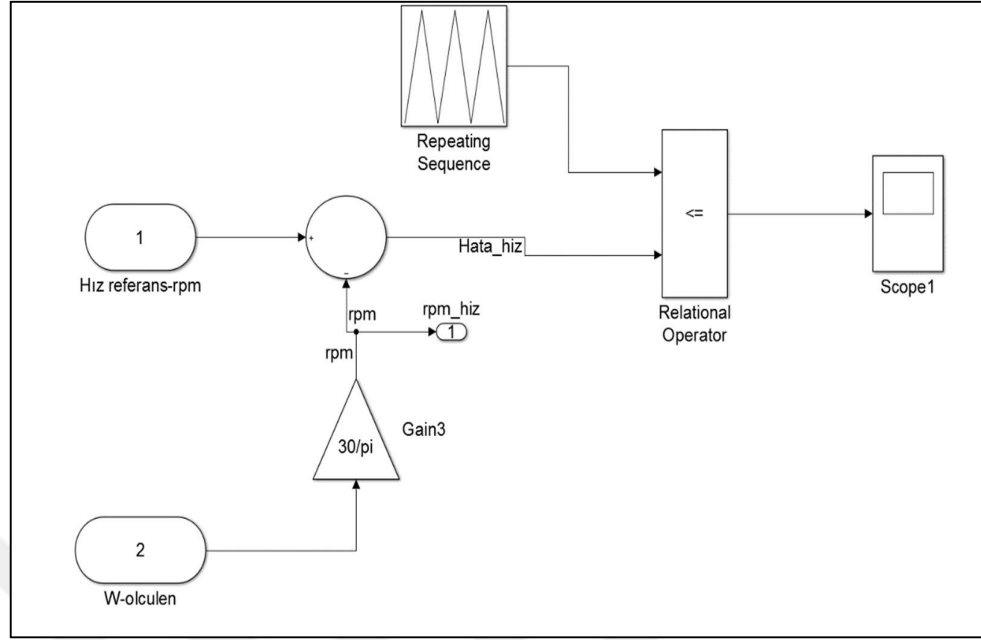
Denklem 4.6'dan da anlaşılacağı üzere hata sinyalinin pozitif ya da negatif olmasına göre sinyaller üretilmektedir. Üretilen bu sinyallere göre konverter ve anahtarlar kontrol edilmiştir. Şekil 4.7 bu modeli göstermektedir.



Şekil 4.7: Akım kontrol blok şeması.

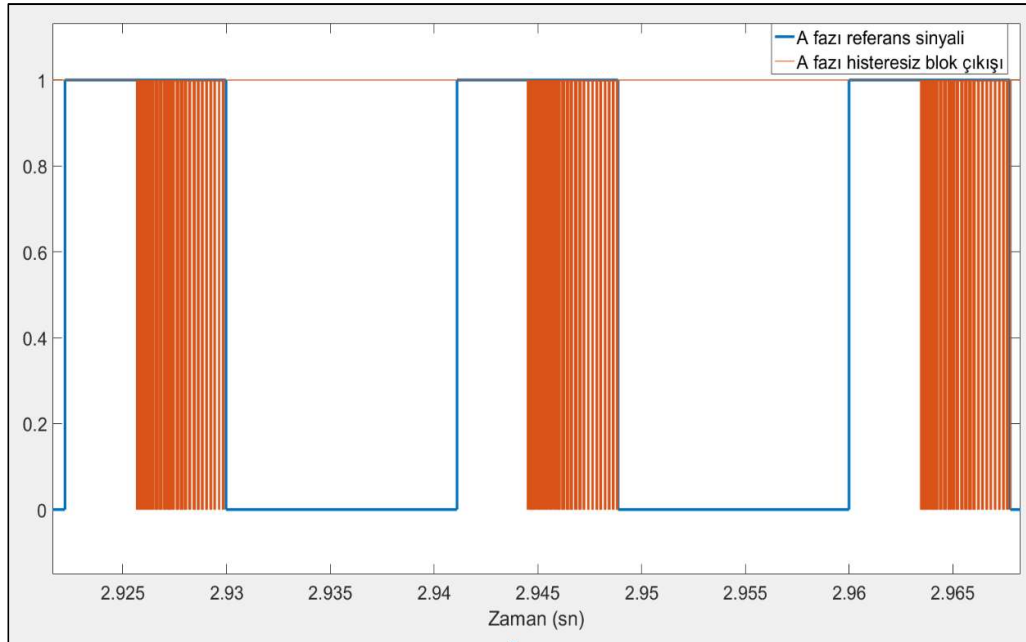
4.6 Anahtarlamalı Relüktans Motor Hız Kontrolü

Akım kontrolünün yanı sıra hız kontrolü de uygulanmıştır. Hız kontrolü için PWM tekniği kullanılmıştır. Ölçülen hız rad/sn olduğu için ilk önce devir/dk'ya çevrilmiştir. Daha sonra referans hızdan ölçülen hız değeri çıkarılarak hata sinyali bulunmuştur. Elde edilen hata sinyali testere dişi dalga ile karşılaştırılmıştır. Eğer; testere dişi dalga hata hız değerinden küçük ya da eşit ise sinyal üretilmektedir. Şekil 4.8'de bu model görülmektedir.

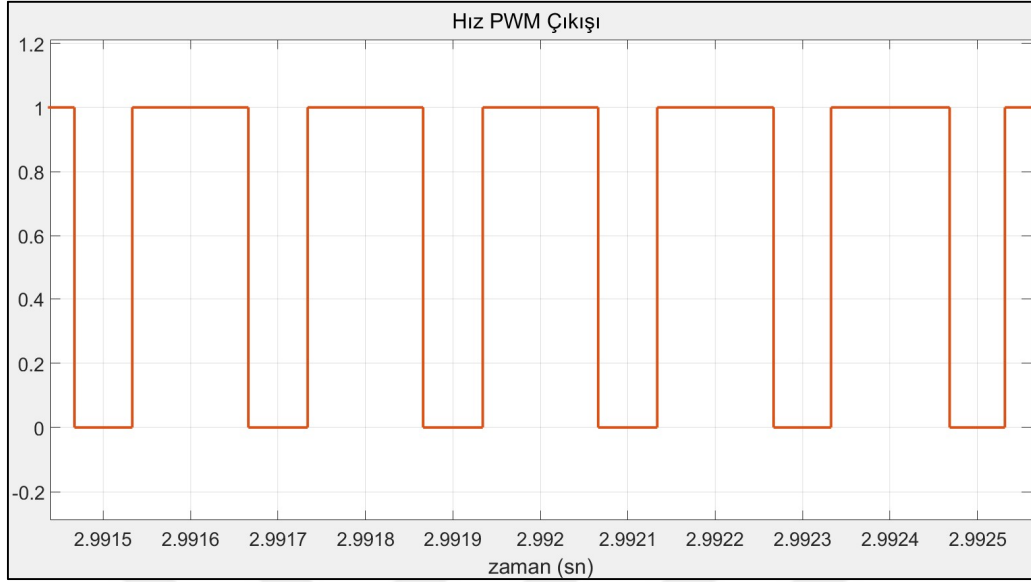


Şekil 4.8: ARM Hız kontrol bloğu.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da ise sırasıyla akım histeresiz çıkışı ve hız PWM çıkışı görülmektedir. Histeresiz akım çıkışı sadece A fazı için verilmiştir. Histeresiz hata değeri 0,01 A dir.



Şekil 4.9: A fazı akım histeresiz çıkışı.



Şekil 4.10: Hız PWM çıkışı.

Şekil 4.10 da gösterilen PWM çıkışı, hız kontrolü için kullanılan sinyaldir. Burada; Şekil 4.8 referans alındığında sistem referans hızından ölçülen hız çıkarılmaktadır ve testere dişi dalga ile karşılaştırılarak PWM sinyal elde edilmektedir. Burada testere dişi dalganın periyodu 0,2 milisaniyedir. Eğer oluşan hata sinyali testere dişi dalgadan küçük ise çıkış elde edilmektedir. Testere dişi dalgasının maksimum noktasının değeri 10, minimum noktasının değeri ise -10 dur. Kontrol metodu olarak ON-OFF kontrol kullanılmıştır.

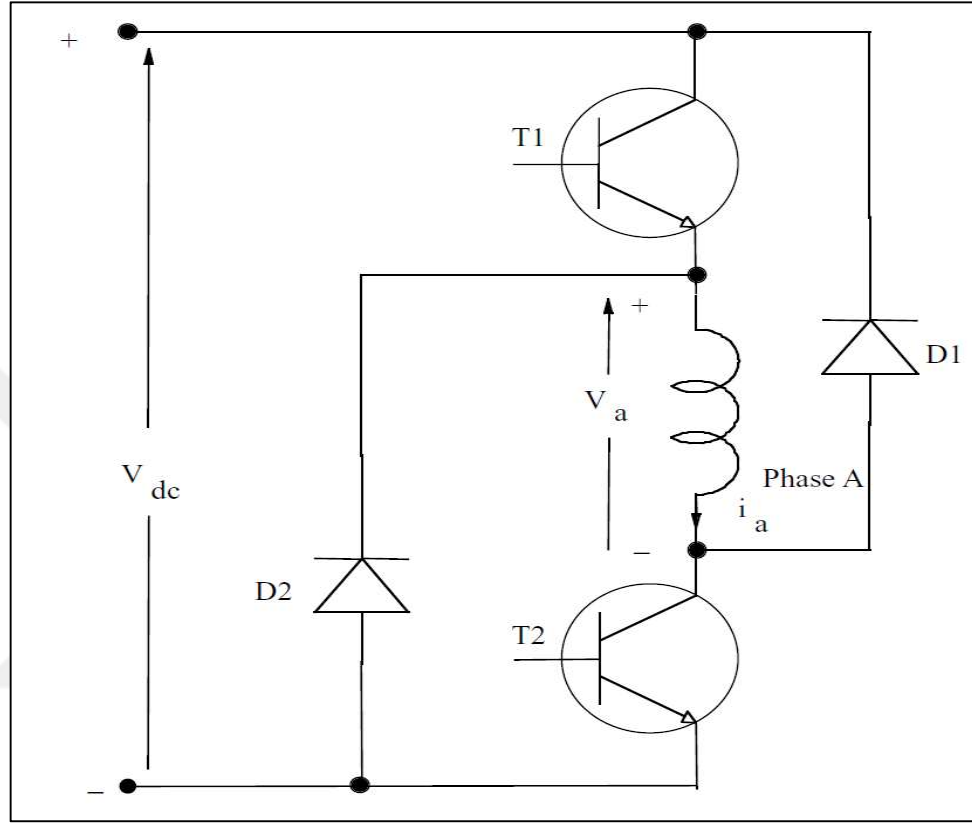
4.7 Konverter Modeli

Anahtarlama relüktans motor kontrolü için oldukça fazla sayıda konverter modeli kullanılmaktadır. Bu tezde kullanım kolaylığından dolayı Asimetrik Yarım Köprü (AHB) konverter kullanılmıştır. Aşağıda AHB konverterin çalışma mantığı detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

ARM de moment ifadesi akımın polaritesinden bağımsız olmasından dolayı her faza sadece bir adet anahtar gereklidir. Bu ifade AC motorlara terstir çünkü AC motorda her faza en az iki tane anahtar gerekmektedir. Ayrıca AC motorlarda anahtar sargılara seri değildir. Bu nedenle AC motorda anahtarlama hatalarından kaynaklanan kaynağı kısa devre etme sorunları vardır. Ancak ARM de böyle bir şey söz konusu değildir.

ARM'de sistemde depolanan manyetik enerjiyi motordan çekmek gerekmektedir. Fazların komütasyonu sırasında bu manyetik enerjiyi serbest dolaşım diyotu ile

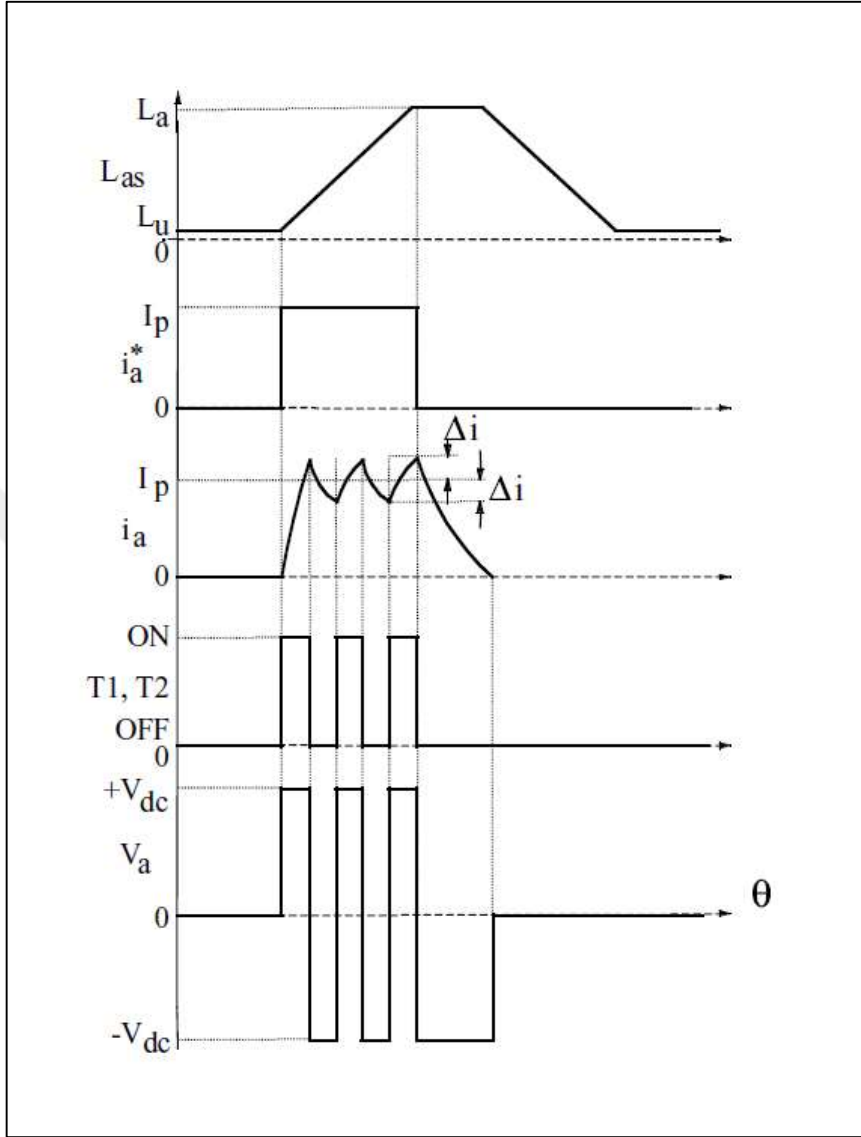
(Freewheeled Diode) motorda harcanır ya da bu enerjiyi güç elektroniği devresi ile kaynağa geri döndürmek için bir yol oluşturmak gerekir. Aksi durumda güç anahtarları üzerinde aşırı bir voltaj indüklenmesi oluşur ve devre zarar görür.



Şekil 4.11: AHB konverterin tez faz için uygulanişı.

Şekil 4.11’de AHB konverterin sadece tek fazını gösterilmiştir. Diğer fazlarda benzer şekildedir. T_1 ve T_2 transistorları iletme geçirirsek kaynak gerilimi faza uygulanacağından dolayı fazdan akım akacaktır. Burada akımın bir referans değeri için kontrol yapılmaktadır ve eğer faz akımı bu referans değerini aşarsa transistorlar kesime götürülür. Motor fazı büyük bir indüktans olduğu için faz akımı aynı yönde bir süre akmaya devam edecektir. Transistorlar kesimde olduğu için bu akım diyotlar vasıtasıyla kaynağa geri verilir. Bu esnada SET değeri üzerinde olan faz akımı değeri hızlı bir şekilde azalarak referans değeri altına düşer. Akım referans değeri altına geldiğinde eğer o faz için iletim devam ediyorsa tekrardan T_1 ve T_2 iletme sokulur. Bu işlem ilgili faz için kesime girme zamanı gelene kadar devam eder. Aynı şekilde diğer fazlar içinde bu algoritma kullanılır.

Şekil 4.12’de bu çalışma mantığı gösterilmiştir.

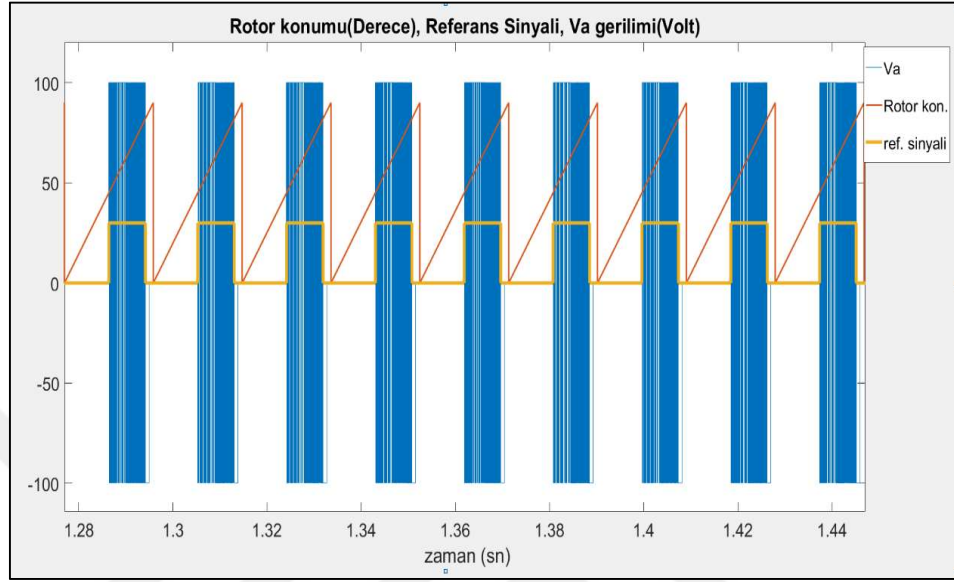


Şekil 4.12: AHB konverter dalga şekilleri.

Burada I_p değeri akım referans değeridir. Yani bu akım aslında fazdan akmasını istediğimiz akım değeridir. Motor çalışmada yani indüktans şeklinin pozitif eğimli olduğu bölgede I_p değerine göre transistörler iletimde ya da kesimdedir. Akım kontrolü histeresiz kontrolör ile yapılmıştır. Eğer gerçek akım ile akım referans değeri arasında Δi kadarlık bir fark olursa transistörler kesime sokulur eğer fark $-\Delta i$ kadar ise transistörler iletime sokulur.

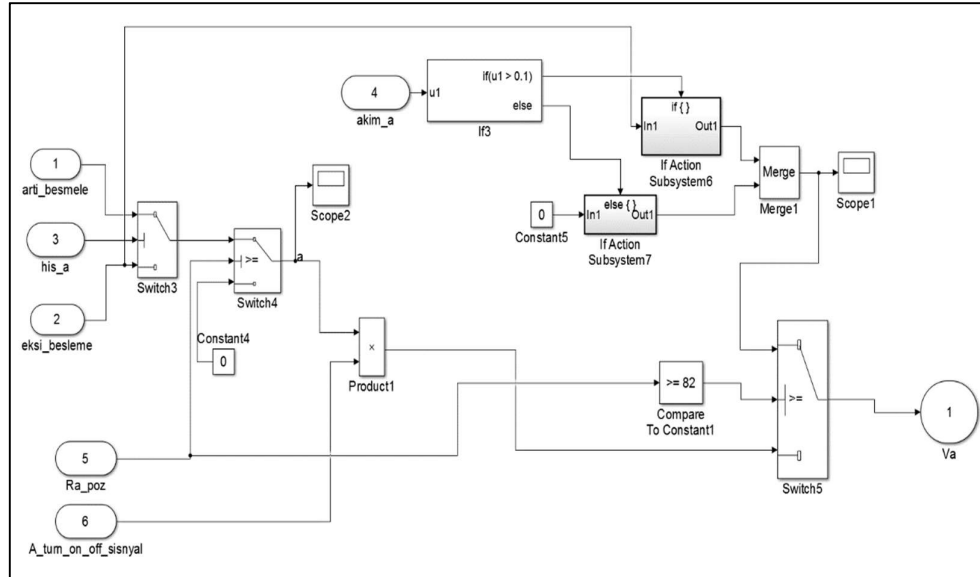
Şekil 4.13’de Simulik den elde edilmiş olan A fazının rotor konumu ve anahtarlarının iletim zamanı ile birlikte A fazı sargı gerilimi görülmektedir. Grafikte yarı iletkenler

anahtarlama yapıldığında A fazının kaynak gerilimine maruz bırakıldığı görülmektedir. Burada referans sinyali görünmesi için 30 kat kuvvetlendirilmiştir.



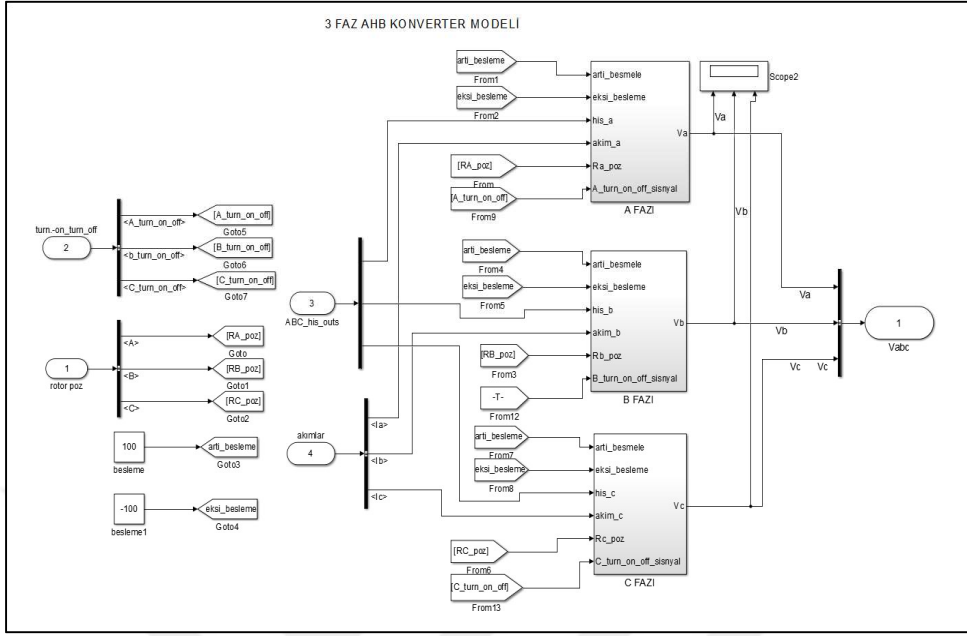
Şekil 4.13: A Fazı rotor konumu ve fazlara uygulanan gerilim.

Şekil 4.14'de AHB konverterin tek fazı için modeli görülmektedir.



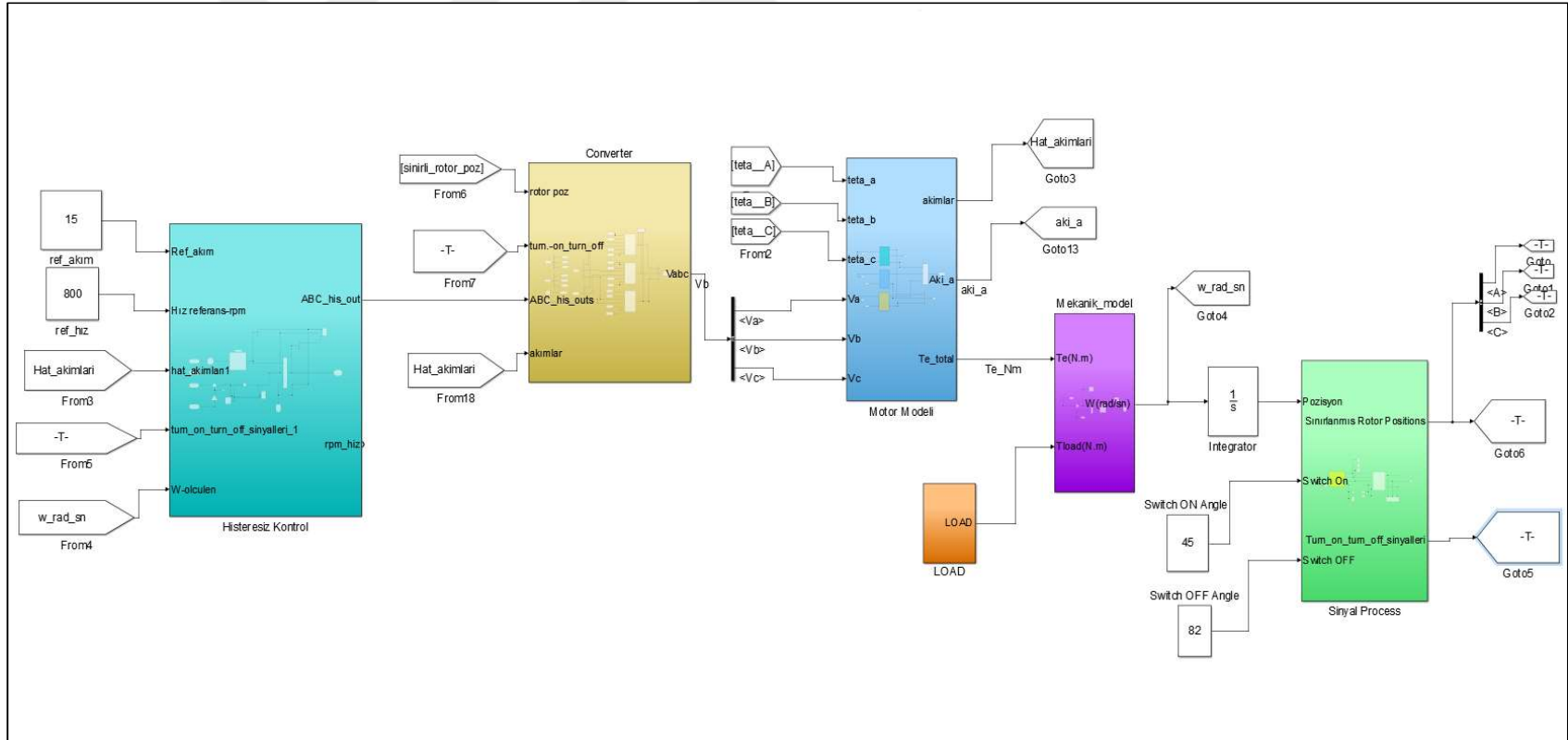
Şekil 4.14: AHB konverter Simulink modeli.

3 faz için model ise yukarıdaki tek faz ile aynıdır. Şekil 4.15'de ise modelin 3 faz için hazırlanmış şekli görülmektedir.



Şekil 4.15: 3 Fazlı AHB konverter simulink modeli.

Son olarak şekil 4.16’da tüm sistem modeli gösterilmektedir. Sistemin kısaca özeti şu şekildedir. Motor modelinde motorun 3 fazlı look-up tabloları ve motora ait elektriksel denklemden faydalanarak oluşturulmuştur. Daha sonra 3 fazdan gelen moment ifadesi toplanarak makinede oluşan toplam moment değeri bulunmuştur. Bu moment değerinden yük momenti çıkarılıp mekanik sistem transfer fonksiyonu ile sisteme ait açısal hız bulunmuştur. Elde edilen açısal hızın zamana göre integrali rotor konumunu vermiştir. Elde edilen rotor konumu, motorun sürekli dönmesinden dolayı sürekli olarak artan bir grafikdir. Bu grafiği 0-90 derece arasında sınırlandırma işlemi ve iletme, kesime girme referans sinyalleri oluşturulması sinyal prosesi olarak adlandırılan blokta yapılmıştır. Daha sonra motorun faz akımları ve ölçülen rotor hızına göre referans hız ve akım değerlerini dikkate alarak akım ve hız kontrol uygulanmıştır. En sonunda da kontrol bloğundan çıkan sinyallere göre AHB konverter motorun fazlarını enerjilendirmektedir. Bu sistem ARM ve SMARM için yapılmıştır.



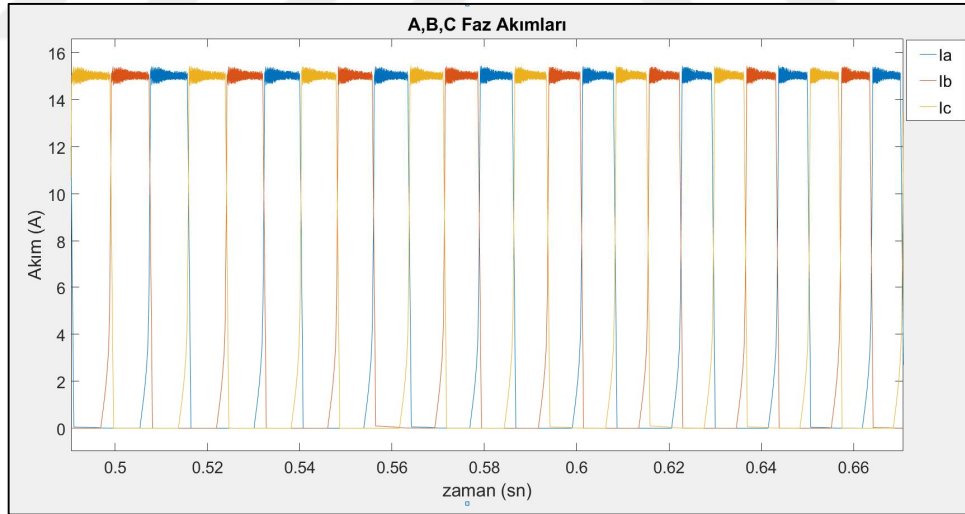
Şekil 4.16: Anahtarlamalı relüktans motor simulink modeli.



5. ANALİZ SONUÇLARI

5.1 Sürekli Hal Analizi

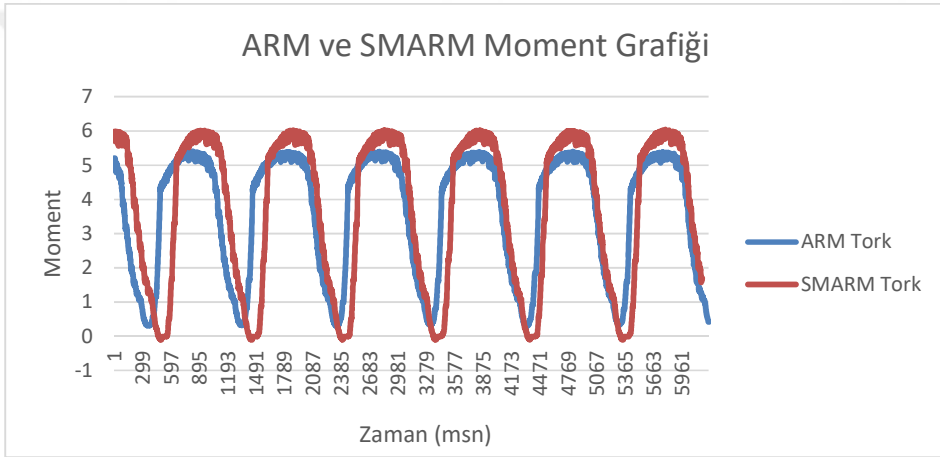
Sürekli halde motor parametreleri akım, hız vb. zamana göre değişmezdir. Motor ilk çalışmaya başladığında ataletinden dolayı yüksek akım çeker ancak sürekli hale ulaştığında akım fonksiyonu zamana göre değişmez olur. Yani akımın zamana göre türevi sıfırdır. Matlab modeli oluşturulduktan sonra elde edilen modelin sürekli hal analizi yapılmıştır. Bunun için sisteme parametre değerleri girilmiştir. Yük momenti olarak $T = 3,5 \text{ N.m}$, hız kontrolü için referans hız olarak $n_{ref} = 800 \text{ dev/dk}$, akım kontrolü için referans akımı $I_{ref} = 15 \text{ A}$ değerlerine ayarlanmıştır. Ayrıca $Turn_{on} = 45^\circ$ $T_{off} = 82^\circ$ olarak ayarlanmıştır. Elde edilen veriler aşağıdadır. Şekil 5.1'de A, B, C fazlarına ait akım grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.1: ARM Sürekli halde A fazı akımı.

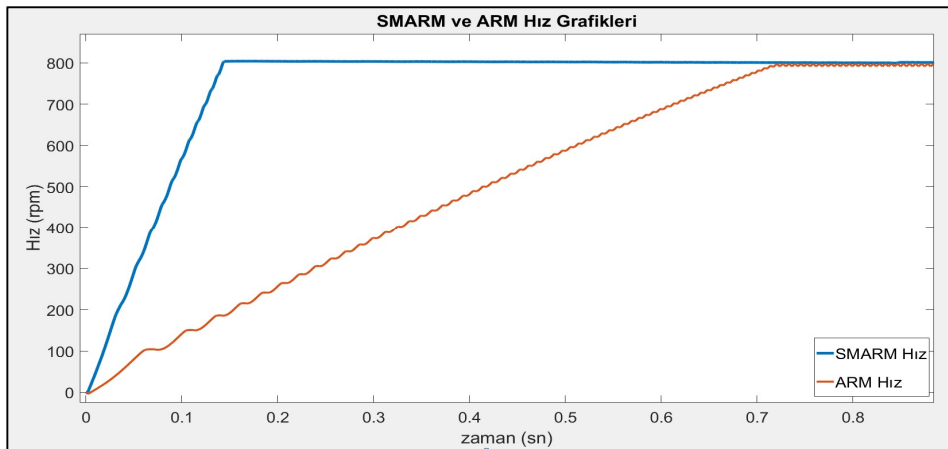
ARM ve SMARM'de akım kontrolü yapıldığı için faz akımlarının referans olarak gösterilen değerde, başarılı bir şekilde kontrol edildiği görülmüştür. Burada referans akımına göre yük momentini belirlemek önemlidir. Örneğin ilgili fazın iletme geçme süresi geldiğinde faz sargıları kaynak gerilimi ile uyarımı yapılmıştır. Sargılara gerilim uygulandığından akım faz indüktansının ve sargı direncinin belirlediği eğim ile artmaya başlar. Akım faz akımı referans olarak gösterilen akım değerini hata payı

kadar aştığında anahtarlar kesime giderek fazlara sıfır volt uygulanır ve faz akımı değeri belirli bir eğim ile düşmeye başlar. Bu esnada akım serbest dolaşım diyotları üzerinde bir yol bularak harcanıyordur. Daha sonra faz akımı değeri referans olarak gösterilen akım değerinden hata payı kadar az olduğunda tekrar fazlar enerjiledirilir ve faz akımı hata payı kadar bir değerde referans akımının üzerine çıkarılır. Bu durum ilgili faz iletim süresince devam eder ve diğer fazın iletim süresi geldiğinde yine diğer faz için de aynı işlemler sürer. Şekil 5.1'deki akım grafiğinde ve Şekil5.2'deki moment grafiğinde yük momenti 3,5 N.m dir. Motor 3,5 N.m yük altında sürekli hale ulaşınca grafikler çizdirilmiştir.



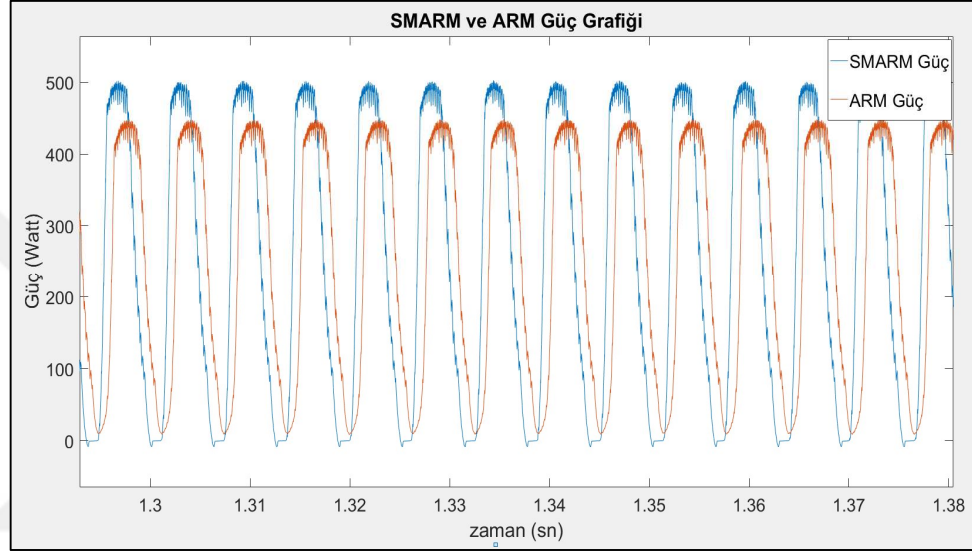
Şekil 5.2: 3,5 N.m yük altında ARM ve SMARM Moment grafiği.

ARM ve SMARM'de moment grafiklerine baktığımızda (Şekil 5.2) SMARM'de sürekli mıknatıslardan kaynaklanan bir moment artışı görülmektedir. SMARM de moment değeri ARM moment değerinden yaklaşık olarak %11 fazladır.



Şekil 5.3: 3,5 N.m yük altında SMARM ve ARM hız grafikleri.

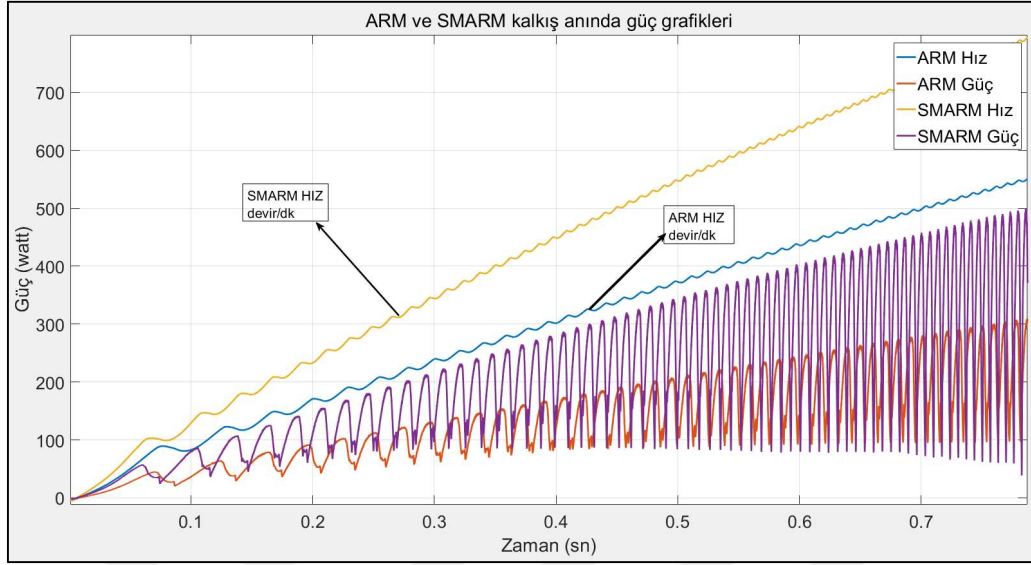
Simülasyonda hız kontrolü uygulandığı için iki motorunda referans hız olan 800 rpm değerini çok güzel bir şekilde yakaladıkları görülüyor (Şekil 5.3). Burada dikkati çeken en önemli sonuç SMARM'nin referans hıza ulaşma süresi oldukça iyidir. Yani SMARM'nin hız grafiğinin artış eğimi ARM'nin eğiminden daha fazladır. SMARM referans hızı yakaladığında ARM'nin hala referans hızı yakalayamadığı çok açık şekilde görülmektedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.4: 3 N.m yük altında ARM ve SMARM Güç grafiği.

Aynı yük koşulları ve tetikleme açıları altında SMARM ve ARM güç grafikleri Şekil 5.4'de verilmiştir. Şekilden de görülmektedir ki SMARM de güç daha fazla çıkmıştır. SMARM'nin güç sağlama oranı, ARM'ye göre yaklaşık olarak %12,1 daha fazla çıkmıştır. Yapıda kullanılan sürekli mıknatıslar (Alnico-5) sayesinde sistemde bir akı artışı olmuştur. Akı artışından dolayı sistemde diğer özellikler aynı kalsa bile (tetikleme açıları, yük momentleri, besleme gerilimleri vb.) sistemde güç artmıştır. Artan bu güç sayesinde motor aynı yük ile daha kısa sürede referans hıza ulaşmıştır. Şekil 5.4 de SMARM'nin güç eğrisinde az da olsa güç negatif çıkmıştır. Bunun nedeni sürekli mıknatıslardan kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.5'de ise motorun 3,5 N.m ile sıfır hızdan referans hıza ulaşırken motor tarafından sağlanan güç grafiklerini göstermektedir. Sürekli rejime ulaşma zamanlarına bakıldığında her türlü durum için (yük momentleri var ya da yok) SMARM'nin daha kararlı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Yani sürekli hale ulaşma zamanı SMARM için daha kısadır.



Şekil 5.5: ARM ve SMARM kalkış anındaki güç grafikleri.

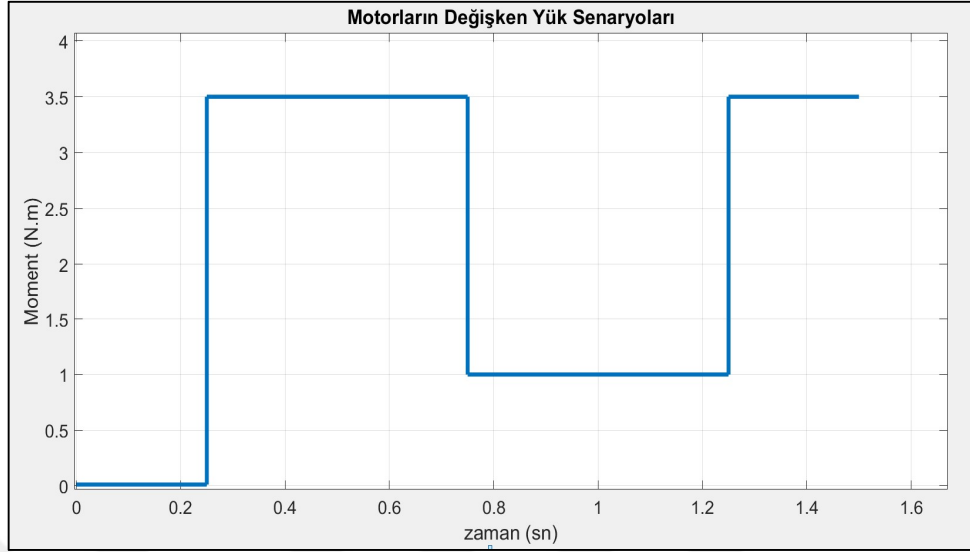
Yük altında her iki motorda sıfır hızdan yol almaya başladığında SMARM'nin yüke aynı şartlar altında daha fazla güç aktarabildiği saptanmıştır. Yani SMARM'nin kalkış anında yol verme momenti daha fazladır. Şekil 5.5'de düşey eksen güç (watt), yatay eksen ise zaman (sn) dir.

5.2 ARM Ve SMARM Dinamik Davranışı

Bu bölümde ARM ve SMARM'nin yük değişimlerine karşı verdikleri dinamik davranışlar incelenmiştir. Bu analiz yapılırken motorlar belirli bir senaryoya göre çalıştırılmıştır. İlk önce her iki motorda $T=0$ N.m ile çalışmaya başlamış ve kalkıştan 0,25 sn. sonra 3,5 N.m ile yüklenmiştir. 0,75. sn. sonunda motorların yükü 1 N.m ye düşürülmüş ve 1,25 sn. de tekrar 3,5 N.m ile yüklenmiştir. Diğer çalışma parametreleri ise $n_{ref} = 800$ d/dk, $I_{ref} = 15$ A, $Turn_{on} = 45^\circ$, $Turn_{off} = 82^\circ$ dir.

Şekil 5.6'da bu senaryoya ait Moment-Zaman grafiği gösterilmiştir. Burada 3,5 N.m motorun herhangi bir yük durumu için alınan moment değeri, 0 N.m ise motorun boşa çalışma durumlarına denk gelirken 1 N.m ise light-load olarak belirlemiştir.

Burada dinamik davranışından beklenti motorların fiziksel Dünyada davranışlarına benzer özellik gösterip göstermeyeceğidir. Fiziki sistemlerde motor çeşidi ne olursa olsun yük momenti yok ise çektiği akım çok azalır. Yüksüz durumda motor sadece mekaniksel kayıplarını ve eğer varsa manyetik alanı oluşturmak için gereken akımı talep eder

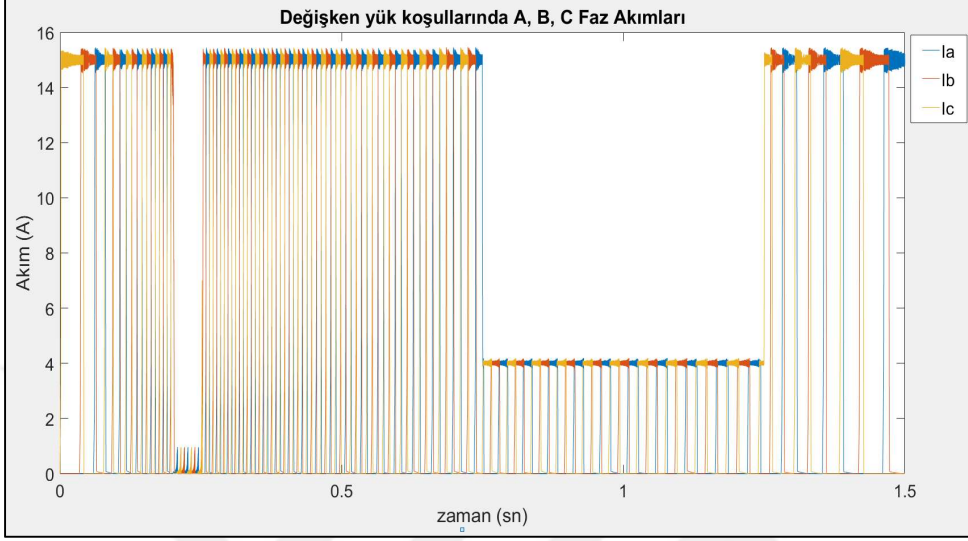


Şekil 5.6: Dinamik yük momenti karakteristiği.

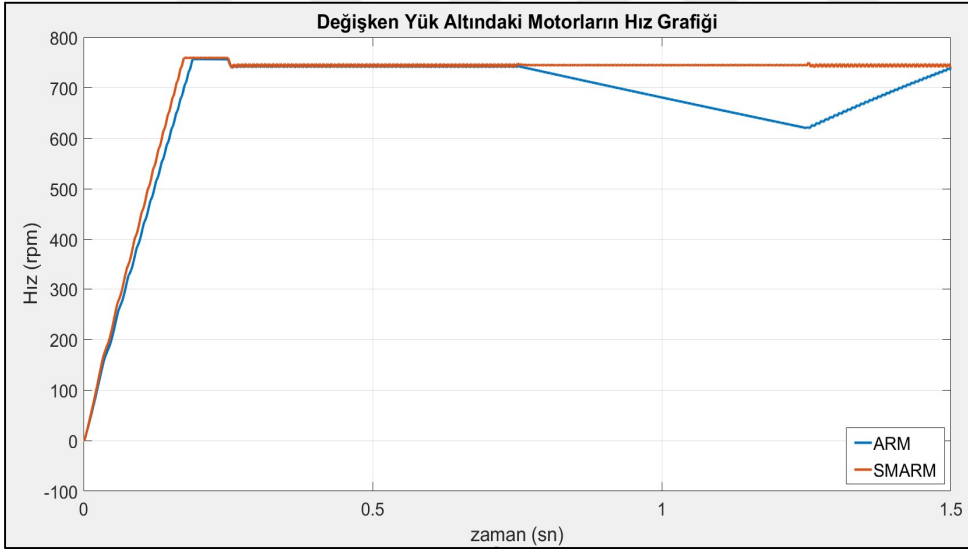
Şekil 5.7’de dinamik yük değişime maruz bırakılan ARM ve SMARM’nin 3 faz akımını göstermektedir. Motor ilk çalışmaya başladığı andan 0,25 saniyeye kadar boşa olduğundan akım ilk önce motorun atalet momentini karşılamak için fazladır. Daha sonra motor boşa olduğundan dolayı akım 0 A’ye kadar düşmüştür. Motorun 1 N.m ile yüklendiği durumda referans akım 15 A iken motorda akım darbeleri oluşmuştur ve bu durumda moment darbeleri oluşacağını söylemek mümkündür. Bundan dolayı motor 1 N.m ile yüklü iken bu durumda referans akım 4 A olarak verilmiştir ve çekilen akım böylece sınırlandırılmıştır. Yani motorun yükü azaldıkça referans akımı da buna bağlı olarak azaltılmıştır. Daha sonra ise motor 5 N.m ile yüklenmiştir. Referans akım yük arttığından dolayı tekrar 15 A yapılmıştır. Referans akımın 15 A olmasından dolayı faz akımı 15 A ulaşınca akım kontrol sistemi devreye girmiş ve faz akımını her zaman 15 A de başarılı bir şekilde tutmayı başarmıştır. Daha sonra motor 1 N.m ile yüklendiğinde çektiği akım değeri doğal olarak azalmış ve referans akım değerinden düşük olduğu için akım kontrol sistemi herhangi bir kontrol uygulamamıştır. Tabi yine akım darbelerini önlemek amacı ile referans akım düşürülmüştür.

Şekil 5.8’de ise değişken yük senaryosu uygulandığında motorların hızları gösterilmiştir. Burada 3,5 N.m yük ile yükleme yapıldığında ARM’un hızının çok düştüğü ve hız kontrolü olmasına rağmen hızın aşırı derecede düşmeye başladığı görülmektedir. Aynı boyutlarda ve özelliklerde olan SMARM için ise 3,5 N.m yük

altında güzel bir şekilde hızını koruduğu görülmektedir. Burada sürekli hal hız hatası oluşmuştur ancak çalışmayı pek etkilememektedir.



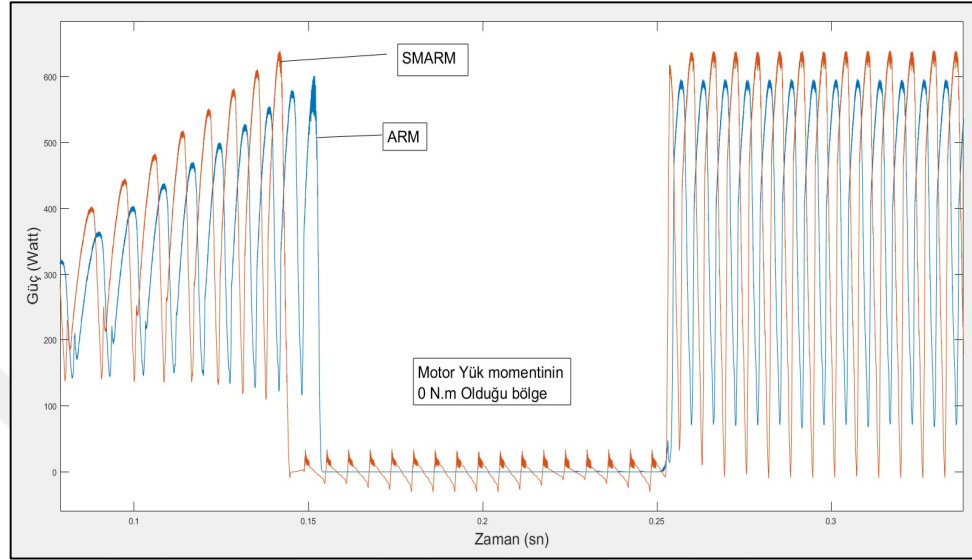
Şekil 5.7: ARM değişken yük altında çekilen akımlar.



Şekil 5.8: Değişken yük altında ARM ve SMARM hız grafiği.

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi aşırı yüklenme koşullarında SMARM'de hız çok az düşmüştür. ARM aşırı yüklenme durumunda referans hıza göre düşüşü %13,33 olarak saptanmıştır. Yani SMARM'nin nominal hızda dönüyorken aşırı yüklenmesiyle oluşturulan hız grafiğinde azalma eğilimi daha küçüktür. SMARM'de hız düşüşünün az olmasının nedeni yapıda kullanılan sürekli mıknatısların sayesinde. Çünkü sürekli mıknatıslar motor gücünü önemli ölçüde arttırmıştır. Şekil 5.9'da değişken yük

altında ARM ve SMARM'nin güç grafikleri verilmiştir. Şekil 5.9'da ARM'nin yüksüz olduğu durumda çok az güç tükettiği, SMARM'nin ise sürekli mıknatıslardan dolayı azda olsa bir güç sarf ettiği görülmektedir.

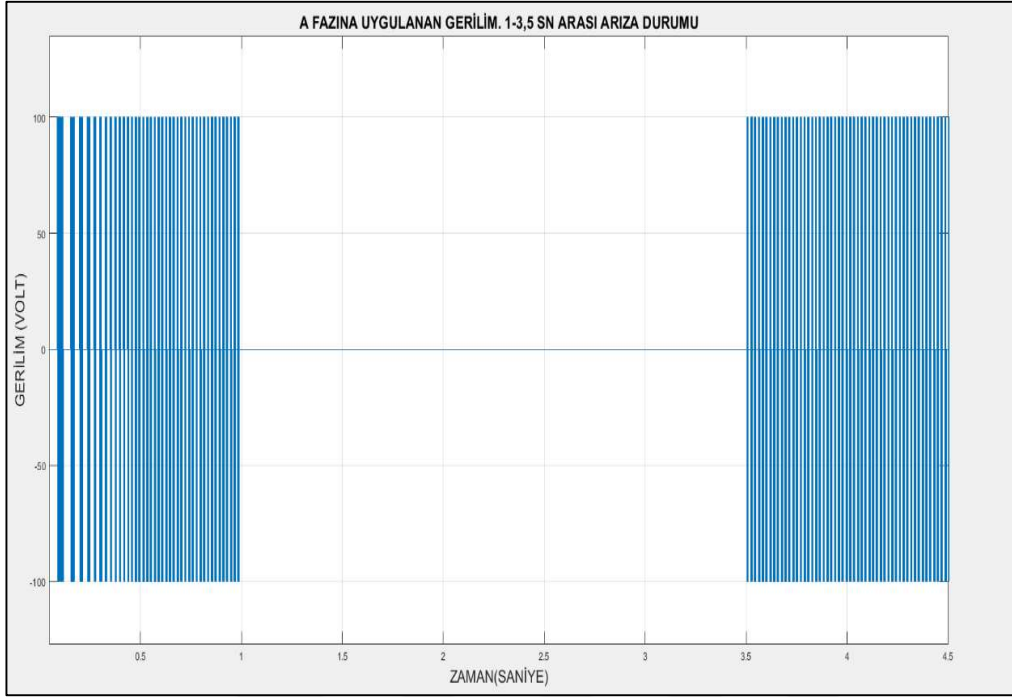


Şekil 5.9: Değişken yük altında ARM ve SMARM güç grafiği.

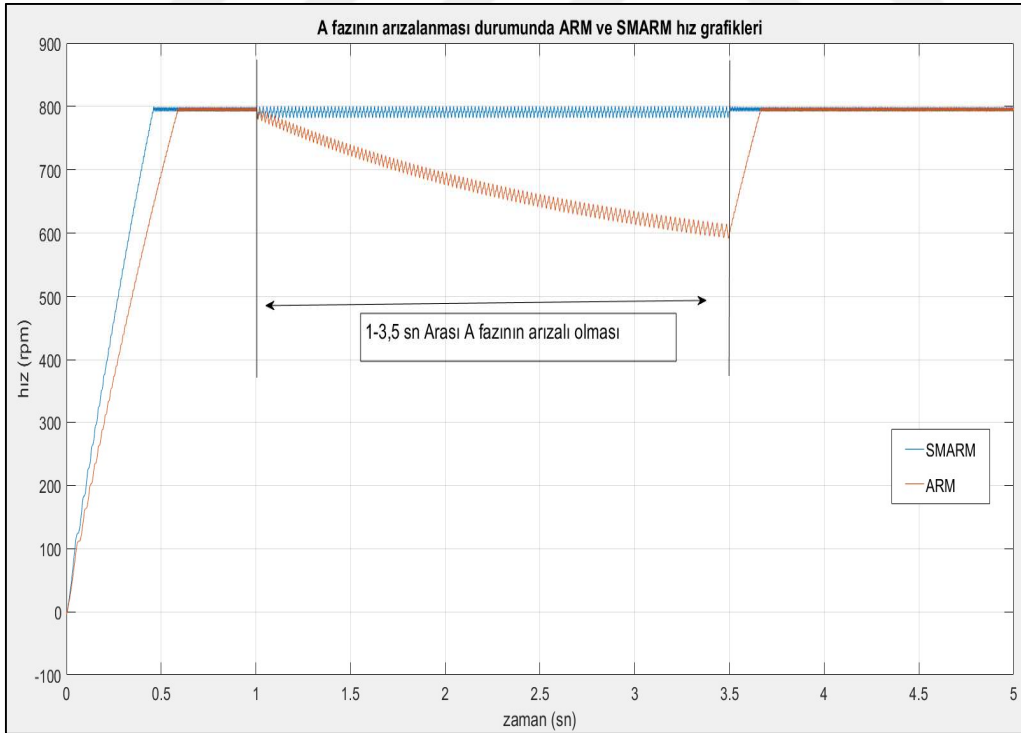
5.3 ARM ve SMARM Arıza Analizi

Anahtarlamalı relüktans motorlar güvenilirlik bakımından diğer motorlardan üstün olduğunu tezin başlarında ifade edilmiştir. Burada ARM ve SMARM için normal çalışma koşullarında çalışma devam ederken aniden A fazının gittiği varsayımı ile motorun bu ekiye gösterdiği tepki incelenmiştir. Motor 2,75 N.m yük momenti ile yüklü durumdadır. Referans akım değeri 15 A, referans hız değeri ise 800 rpm dir. A fazına ait besleme gerilimi dalga şekli aşağıdaki gibidir. Bu şekilde fazda meydana gelen arızada 1-3,5 sn. aralığında besleme geriliminin sıfır volt olduğuna dikkat edilmelidir (Şekil 5.10).

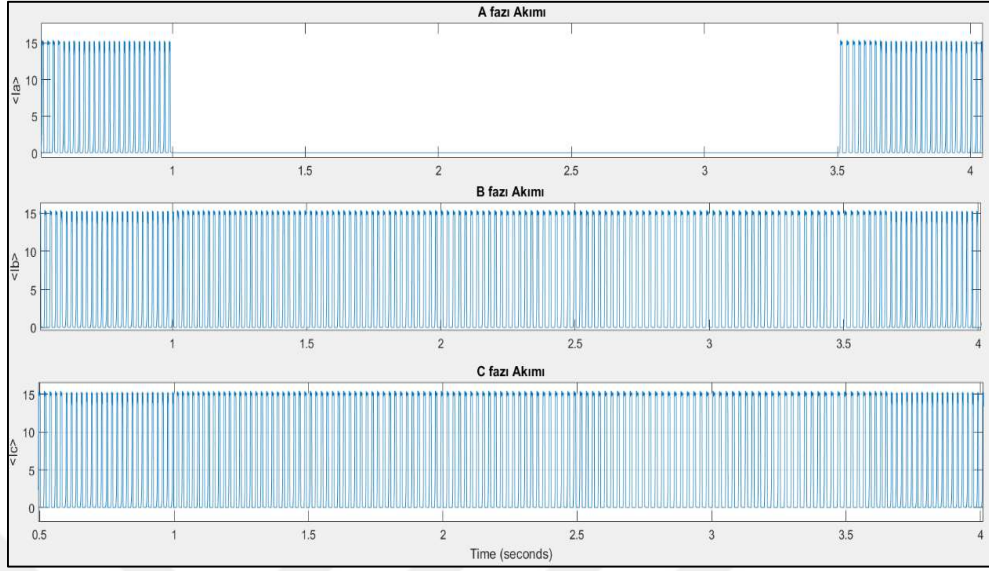
Şekil 5.11'de ARM ve SMARM için A fazının gerilimsiz kalması sonucunda elde edilen hız gösterilmiştir. Grafikten açık şekilde belli olmaktadır ki SMARM faz arızalarından etkilenmesi daha azdır, yani SMARM daha güvenilirdir. Şekil 5.12'de ise arıza durumu için fazlara ait akım grafiği verilmiştir. Arıza durumunda A fazında hiç akım akmadığı görülmektedir. Bu toplam momenti azaltma etkisi göstermektedir.



Şekil 5.10: A fazı besleme gerilimi dalga şekli (1-3,5 sn arası arıza durumu).

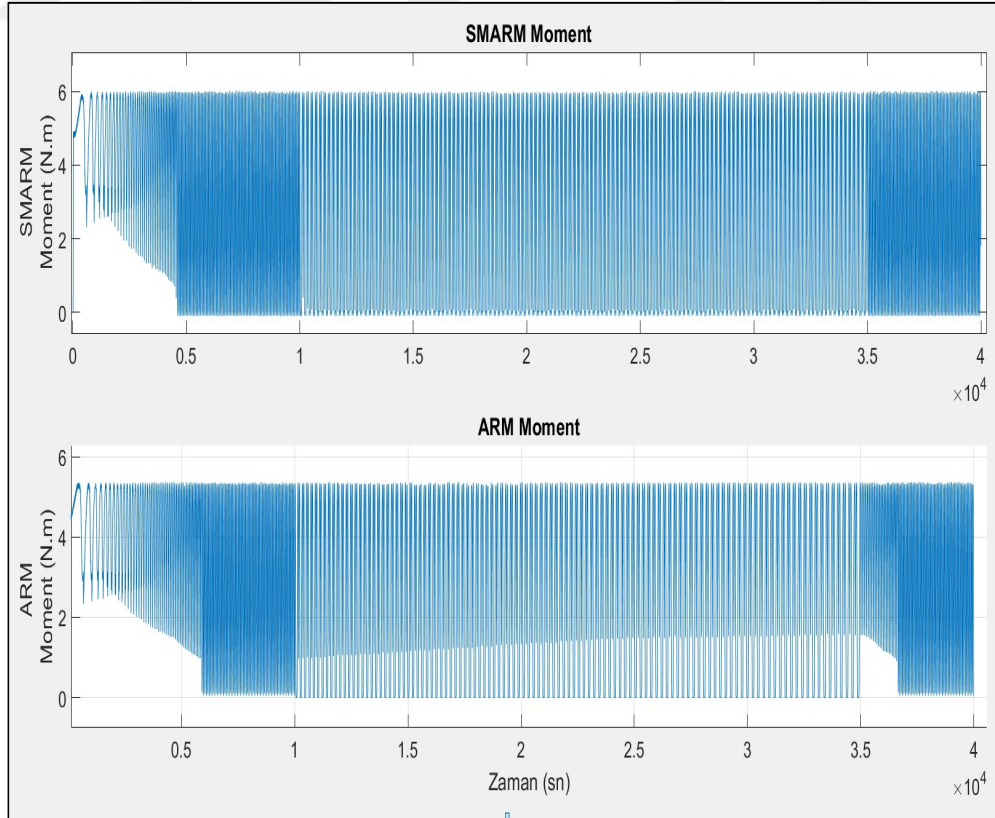


Şekil 5.11: A fazı arızası durumunda ARM ve SMARM hız grafiği.

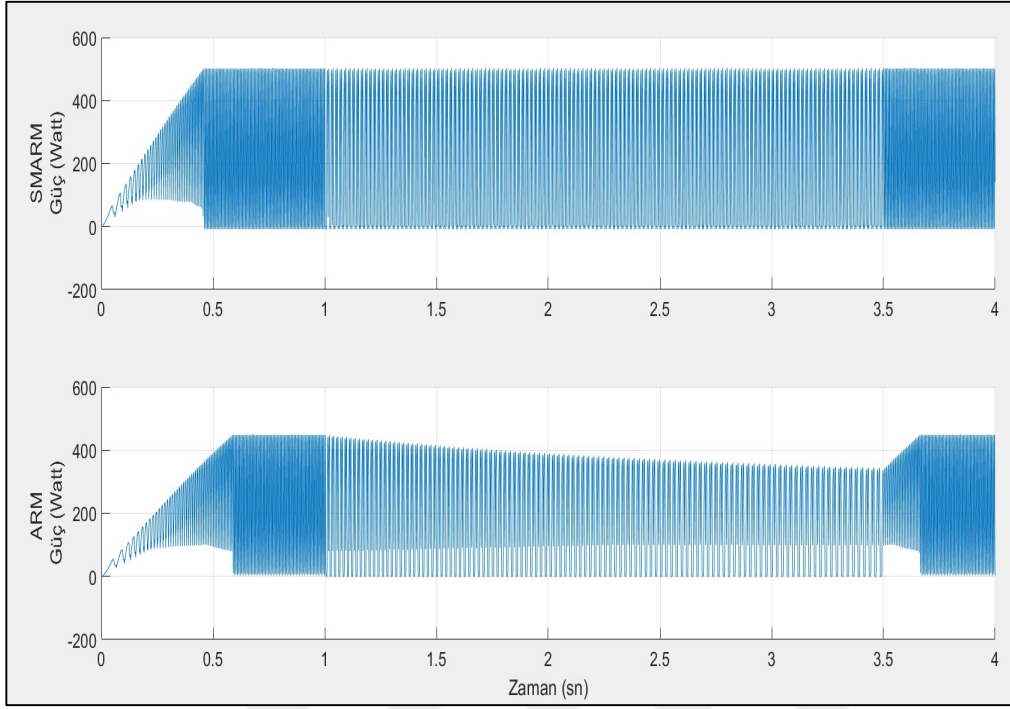


Şekil 5.12: A fazı arızası durumunda fazlara ait akım grafiği.

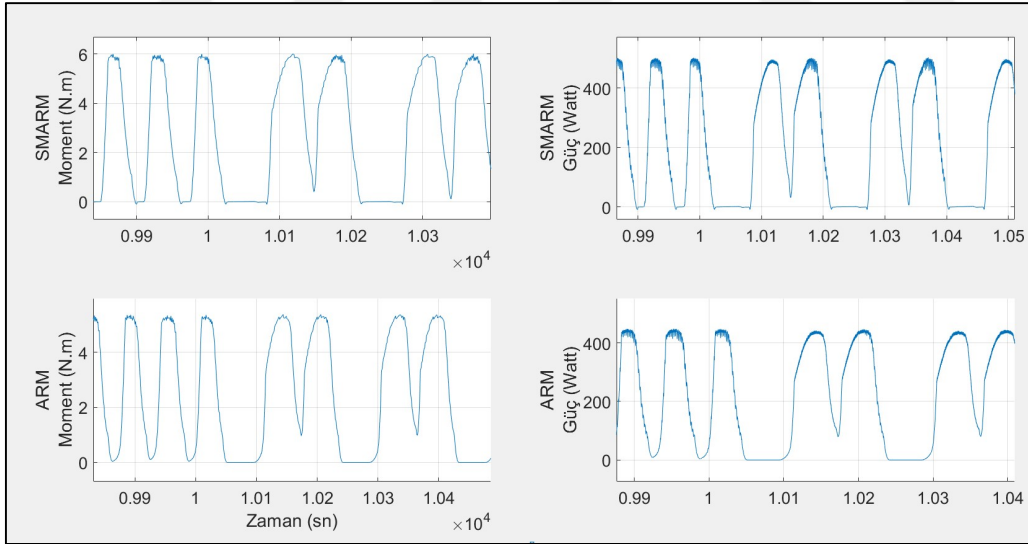
Şekil 5.13’de A fazının arıza durumu için ARM ve SMARM’nin toplam moment grafikleri verilmiştir. Şekil 5.14’de ise yine arıza durumu için SMARM ve ARM’nin güç grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.13: A Fazı arızası durumunda ARM moment grafiği.



Şekil 5.14: A fazı arızası durumunda SMARM güç grafiği.



Şekil 5.15: ARM ve SMARM A fazı arızası durumu detay grafiği.

Şekil 5.15’de ARM ve SMARM’nin arıza olması durumundaki ilk an verilmiştir. Burada SMARM ve ARM’nin moment ve güç grafikleri arızanın meydana geldiği ilk an olan 1 sn civarında moment ve güçlerinde meydana gelen değişimler detalı bir şekilde verilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde 6/4 yapıdaki bir anahtarlamaalı relüktans motor ve yine aynı motorun statoruna sürekli mıknatıs eklenerek elde edilen sürekli mıknatıslı anahtarlamaalı relüktans motor üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Manyetik analiz programı olan FEMM ile her iki motorunda manyetik analizi yapılmıştır. Motorların 1-15 A aralığında değişen akım değerleri ile 0-45 derece arasındaki rotor konumlarını göz önünde bulundurarak akı ve moment tabloları elde edilmiştir. Şöyle ki: Belirli bir rotor konumu ve fazlardan akan belirli bir akım değerinde makinede oluşan moment değerini ve o anda makinada bulunan akı değerini bu tablolar aracılığıyla motorun tam bir tur dönmesi durumunda her anı için öğrenmek mümkündür.

Bölüm 4'de Matlab programı kullanılarak anahtarlamaalı relüktans makinesinin matematiksel olarak modeli oluşturularak bu modele akım ve hız kontrolü uygulanmıştır. FEMM'den alınan değerler oluşturulan modelde yerine konularak ARM ve SMARM için sürekli hal, değişken yük karşısındaki davranışları ve son olarak arıza durumunda gösterdikleri performanslar incelenip yorumlanmıştır.

Anahtarlamaalı relüktans motora sürekli mıknatıs eklenince moment değerinin arttığı ve bu artışın %12 civarında olduğu gözlenmiştir. Faz indüktansı bakımından bakıldığında SMARM'de faz indüktansı değerinin daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Her iki motorda belirli yük momentleri altında hız performansı testine tabi tutulmuştur. Yapılan benzetim sonuçları SMARM'nin gösterilen referans hıza ulaşma süresinin daha çabuk olduğunu, ARM'nin referans hıza ulaşmasının daha geç olduğu sonucuna varılmıştır.

Sürekli mıknatısların getirdiği bir artı değer ise SMARM'de güç değerinin %13 daha fazla olmasıdır. Moment dalgalılığının SMARM'de daha az olduğu moment grafiklerinden görülmüştür.

Nominal hızda iki motorda çalışırken motorlara aşırı yük momentleri uygulanmış ve SMARM'nin bu durum karşısında hızını daha kararlı bir şekilde koruyabildiğini,

ARM'nin hızının çok ani bir şekilde düştüğü dolayısıyla SMARM'nin hız performansının çok daha iyi olduğu gözlenmiştir.

Arıza durumları için her iki motorunda güvenilirliği incelenmiştir. Belirli bir senaryoya göre her iki motorunda birer fazı arızaya uğratılmış ve bu durumda motorların hızı, akımları ve moment değerlerine bakılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre SMARM güvenilirlik bakımından ARM'ye göre daha üstündür. Nominal hızda motorlar çalışırken A fazının gitmesi durumunda ARM'de hız aniden düşmeye başlamış ve motor tekrar normal haline döndürüldüğünde referans hızı tekrar ulaştığı görülmüştür. SMARM için de arıza durumunda hızın düştüğü görülmüş ancak bu düşüş hızı ARM ile kıyaslandığında daha az olduğu görülmüştür. Bu nedenle SMARM'ler güvenilirlik açısından daha iyidir. Arıza anında arıza olan fazda akımın akmadığı görülmüştür. Motorlar arızaya tepki olarak hızlarını düşürmüşlerdir. Akım için diğer fazlarda bir değişim olmamasının nedeni ise akım kontrolü olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer fazlar yük momentini karşılayabilmek için akımını artırmaya çalışmaktadır ancak akım kontrol bloğu buna müsaade etmeyerek faz akımlarını referans akım değerinde tutmaya zorlamaktadır. Arıza anında bir fazın olmamasından kaynaklanan moment düşümü her iki motorda da gözlemlenmiştir ancak SMARM'nin toplam momentini yine de ARM'den yüksektir.

Aşırı yüklenme durumunda 0,5 sn'de hızdaki düşüş ARM'de %13,33 iken, SMARM de bu değer %0,55 olarak hesaplanmıştır. Aynı sonuçlar arıza durumları içinde geçerlidir.

Sonuç olarak SMARM performans bakımından daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Dezavantaj olarak ise sürekli mıknatıslı motorların yüksek sıcaklıklarda mıknatıs özelliklerinin kaybolabileceği söylenebilir. Mıknatıslar ilk başlarda motorun üretim maliyetini arttırsa da özellikle hız kararlılığı maksimum moment değerinin yüksek olması gibi artıları düşünüldüğünde bu maliyetin pek bir öneminin olmayacağı ortadadır.

Bundan sonraki çalışmalarda elde edilmiş olan SMARM ve ARM verileri ve oluşturulan matematiksel model kullanılarak tüm sistem jeneratör olarak çalıştırılabilir. Bu şekilde hem motor hem de jeneratör olarak çalışan SMARM jeneratör olarak birçok uygulamada öne çıkacağı açıktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Ramu K.** (2001). Switched Reluctance Motor Drives Modelling,Simulation,Analysis,Design,and Applications, Washington: CRC Press.
- [2] **Krishnan R.** (2001). Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications, London, CRC Press.
- [3] **Ertan H. ve Üçtuğ M.** (1994). Switched Reluctance Motors, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Modern Electrical Drives, Antalya-Türkiye.
- [4] **MacMinn S. ve Sember J.**(1989). Control switched reluctance aircraft starter-generator over a very speed range, Proc.Inter Society Energy Conversion Engineering Conf.
- [5] **Cameron D. and Lang J.**(1999). The control of high speed variable reluctance generators in electric power systems, IEEE Trans. Ind. Applicat.
- [6] **Kokernak J. and Torrey D. and Kaplan M.**(1999). A Switched reluctance starter/alternator for hybrid electrical vehicles, Proc IEEE PCIM99.
- [7] **Mese E. and Sozer Y. and Kokernak J.** (2000). Optimal excitation of high speed switched reluctance generator, Proc. IEEE APEC2000.
- [8] **Torrey D.**(1999). Variable reluctance generators in wind energy systems, Proc. IEEE PESC'93.
- [9] **Cardenas R. and Ray W. and Asher G.**(1995). Switched reluctance generators for wind energy applications, Proc. IEEE PESC'95.
- [10] **Miller T.** (1989). Brushless Permanent-Magnet motor drives and reluctance motor drives, New York, Oxford University Press.
- [11] **Miller T.** (1993). Switched reluctance motors and their control, Oxford, Magna Physics publishing and clarendon press.
- [12] **Vijayraghavan P.**(2001). Design of switched reluctance motor and development of a universal controller for switched reluctance and permanent magnet brushless DC motor drives, Virginia, The faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [13] **Lawrenson P.** (1980). Variable speed switched reluctance motors, Proc. Inst. Elect. Eng. B.
- [14] **Burnlce D.** (1972). Compatible brushless reluctance motors and controlled switch circuits, United States Patent: 3,679,953.

- [15] **Krishnan R.** (1988). Design procedure for switched reluctance motor, IEEE Trans. on Industry App.
- [16] **Radun A.** (1994). Design considerations for the switched reluctance motor, IEEE Transactions on Industry Applications.
- [17] **Radun A.** (2000). Analytically Computing the flux linked by a switched reluctance motor phase when the stator and rotor poles overlap, IEEE Transactions on Magnetics.
- [18] **Arumugam R.** (1985). Magnetic Field Analysis Of A Switched Reluctance Motor Using A Two Dimensional Finite Element Method IEEE Trans. on Magnetics.
- [19] **Moallem C.** (1990). Predicting The Torque Of Switched Reluctance Machine From Its Finite Element Field Solution, IEEE Transactions on Energy Conversion.
- [20] **Dawson M.** (1986). Switched Reluctance Motor Torque Characteristics: Finite Element Method And Test Results, IEEE IAS Annual Meeting Part 1.
- [21] **Krishnan R.** (1991). Dynamic Analysis Of An SRM Drive System, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.
- [22] **Srinivas K. And Arumugam R.** (2003). Dynamic Characterization Of Switched Reluctance Motor by Computer Aided Design And Electromagnetic Transient Simulation, IEEE Trans on Magnetics.
- [23] **Matsuo A.** (1997). Self Excited Variable Reluctance Generator, Wisconsin Power Electronics Research Center.
- [24] **Barazarte D.** (2011). Comparison Of Electric Generators Used For Wind Generation, IEEE Latin America Transactions.
- [25] **Qiji Z.** (2014). Fault Tolerant Performances Of Switched Reluctance Machine And Doubly Salient Permanent Magnet Machine In Starter/Generator System, 17th International Conference On Electrical Machines And Systems (ICEMS), Hangzhou, China.
- [26] **Sunan E.** (2014). Three Phase Full Bridge converter Controlled Permanent Magnet Reluctance Generator For Small Scale Wind Energy Conversion Systems, IEEE Transactions On Energy Conversion.
- [27] **Drury B.** (2009). The Control Techniques Drives And Controls Handbook 2nd Edition, IET Power and Energy Series-57.
- [28] **Meeker D.** (2013), Finite Element Method Magnetics, FEMM.
- [29] **Yılmaz M.** (2014). Fırçalı ve Fırçasız Doğru Akım Motorlar Endüstriyel Elektronik Sistemlerin Tasarımı Ve Uygulamaları, İstanbul, İstanbul Teknik Üniversitesi MKM 510E Ders Notu p. 24.
- [30] **Chinokura O.** (1998). Analysis Of Dynamic Characteristics OF Switched Reluctance Motor Based On SPICE, IEEE Trans. On Magnetics.

EKLER

EK-A: Çizelgeler.



Çizelge A.1 : SMARM Hizalı durum için 3 faz motor değerleri.

Akım (A)	0	0,49	1,95	4,06	6,66	9,98	14,51
A Fazı Akı(Wb)	0,18	0,9	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24
B Fazı Akı(Wb)	0,1841	0,1895	0,1997	0,2098	0,22	0,23	0,2399
C Fazı Akı(Wb)	0,1849	0,1901	0,2	0,21	0,2202	0,2301	0,24
A Fazı Moment (N.m)	-0,1115	-0,1150	-0,1219	-0,1291	-0,1363	-0,1433	-0,1503
B Fazı Moment (N.m)	-0,11078	-0,1165	-0,1207	-0,1288	-0,1356	-0,1447	-0,151
C Fazı Moment (N.m)	-0,11068	-0,11364	-0,12047	-0,1299	-0,1382	-0,1425	-0,1508

Çizelge A.2 : SMARM 9 derece için 3 faz motor değerleri.

Akım (A)	0,2	0,92	1,89	3,31	5,27	8	11,4	15,7	20,74
A Fazı Akı(Wb)	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24
B Fazı Akı(Wb)	0,1592	0,1694	0,1798	0,1901	0,1997	0,2098	0,22	0,2302	0,2398
C Fazı Akı(Wb)	0,1604	0,1703	0,1804	0,1905	0,2	0,2101	0,2202	0,2304	0,24
A Fazı Moment (N.m)	0,0203	-0,2032	-0,4975	-0,8640	-1,2876	-1,8270	-2,4646	-3,1820	-3,9141
B Fazı Moment (N.m)	0,067	-0,1588	-0,4602	-0,8374	-1,2678	-1,81	-2,4519	-3,1739	-3,9067
C Fazı Moment (N.m)	0,0221	-0,2014	-0,4964	-0,8626	-1,284	-1,8217	-2,4584	-3,1761	-3,9087

Çizelge A.3 : SMARM 15 derece için 3 faz motor değerleri

Akım (A)	0,55	1,45	2,56	3,91	5,45	7,35	9,61	12,57	15,96	19,98	24,67	30,11
A Fazı Akı(Wb)	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24
B Fazı Akı(Wb)	0,129	0,139	0,149	0,159	0,169	0,1797	0,1897	0,2	0,21	0,2202	0,2301	0,2399
C Fazı Akı(Wb)	0,1305	0,1402	0,15	0,1601	0,1699	0,1803	0,1902	0,2004	0,2103	0,2204	0,2303	0,2401
A Fazı Moment (N.m)	-0,2094	-0,5318	-0,9417	-1,4508	-2,0343	-2,7240	-3,4396	-4,2416	-5,0689	-5,9567	-6,8608	-7,7883
B Fazı Moment (N.m)	-0,1725	-0,4984	-0,9118	-1,425	-2,014	-2,7156	-3,4435	-4,253	-5,08	-5,9694	-6,872	-7,797
C Fazı Moment (N.m)	-0,2075	-0,5298	-0,94	-1,4496	-2,0348	-2,7277	-3,4457	-4,2493	-5,0791	-5,9667	-6,869	-7,7953

Çizelge A.4 : SMARM 30 derece için 3 faz motor değerleri

Akım (A)	1,18	2,58	4,07	5,63	7,27	8,93	10,71	12,51	14,41	16,38	18,33	20,44	22,61
A Fazı Akı(Wb)	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
B Fazı Akı(Wb)	0,038	0,048	0,058	0,068	0,078	0,088	0,0988	0,1088	0,119	0,129	0,139	0,1492	0,1592
C Fazı Akı(Wb)	0,0403	0,0501	0,0631	0,0703	0,0804	0,0903	0,105	0,1089	0,1201	0,1306	0,14091	0,1501	0,1608
A Fazı Moment (N.m)	-0,3695	-0,8344	-1,3394	-1,8731	-2,4381	-3,0089	-3,6213	-4,2376	-4,8791	-5,5399	-6,1883	-6,8773	-7,5670
B Fazı Moment (N.m)	-0,2841	-0,771	-1,299	-1,855	-2,438	-3,0251	-3,648	-4,279	-4,935	-5,6062	-6,266	-6,969	-7,671
C Fazı Moment (N.m)	-0,286	-0,765	-1,277	-1,867	-2,458	-3,0256	-3,651	-4,276	-4,949	-5,708	-6,308	-6,894	-7,597

Çizelge A.4 (Devam): SMARM 30 derece için 3 faz motor değerleri

Akım (A)	22,61	24,99	27,71	31,05	34,92	39,42	44,42	50,31	57,01
A Fazı Akı(Wb)	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24
B Fazı Akı(Wb)	0,1592	0,1695	0,1794	0,189	0,1996	0,21	0,2197	0,2297	0,2401
C Fazı Akı(Wb)	0,1608	0,1709	0,181	0,1906	0,2013	0,2098	0,2202	0,2301	0,2394
A Fazı Moment (N.m)	-7,5670	-8,2860	-9,0073	-9,7687	-10,5678	-11,4231	-12,2782	-13,1985	-14,1937
B Fazı Moment (N.m)	-7,671	-8,401	-9,133	-9,904	-10,712	-11,57	-12,43	-13,35	-14,351
C Fazı Moment (N.m)	-7,597	-8,387	-9,141	-9,915	-10,689	-11,621	-12,49	-13,29	-14,346

Çizelge A.5 : SMARM 45 derece için 3 faz motor değerleri

Akım (A)	0,74	2,91	5,07	7,31	9,42	11,59	13,83	16,16	18,41	20,56	22,86	25,03
A Fazı Akı(Wb)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
B Fazı Akı(Wb)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
C Fazı Akı(Wb)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
A Fazı Moment (N.m)	0,0216	0,0296	0,0370	0,0442	0,0505	0,0563	0,0616	0,0666	0,0717	0,0757	0,0797	0,0830
B Fazı Moment (N.m)	0,0215	0,0214	0,0313	0,0411	0,0501	0,0559	0,0611	0,06643	0,071533	0,07489	0,07881	0,08271
C Fazı Moment (N.m)	0,0222	0,03	0,0373	0,0443	0,0503	0,0559	0,0612	0,0662	0,0707	0,0748	0,0789	0,0825

Çizelge A.5 (Devam): SMARM 45 derece için 3 faz motor değerleri

Akım (A)	27,48	29,75	32,36	35	38,18	42,1	46,55	51,63	57,66	64,15	71,23
A Fazı Akı(Wb)	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24
B Fazı Akı(Wb)	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24
C Fazı Akı(Wb)	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24
A Fazı Moment (N.m)	0,0863	0,0890	0,0914	0,0932	0,0951	0,0969	0,0983	0,0996	0,1005	0,1012	0,1018
B Fazı Moment (N.m)	0,0855	0,08848	0,09089	0,0938	0,0952	0,0958	0,0972	0,0986	0,10078	0,10096	0,1015
C Fazı Moment (N.m)	0,0862	0,0892	0,0923	0,0948	0,0966	0,0977	0,0985	0,0986	0,1	0,1015	0,1055

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : FARUK DURAK
Doğum Tarihi ve Yeri : 07.10.1990-GAZİANTEP
E-posta : farukdrk@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016-Devam Ediyor: Aksa Jeneratörde Elektrik Mühendisi
- 2012-2014 yılları arasında "CO2 Lazer Makineleri" üzerine makine imalatı yapan özel bir firmada ARGE Mühendisi
- 2012-2013 yılları arasında TÜBİTAK-TEYDEP tarafından desteklenen Lazer Markalama ve Kesim Sistemi isimli, 7120625 numaralı projede proje yürütücülüğü görevi.