



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEGMENTAL TİP ANAHTARLAMALI
RELÜKTANS MOTORUN MOMENT
SALINIMLARINI AZALTMAK İÇİN SÜRÜCÜ
VE KONTROLÖR TASARIMI VE
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Hakan TERZİOĞLU

DOKTORA TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2016
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hakan TERZİOĞLU tarafından hazırlanan “SEGMENTAL TİP ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN MOMENT SALINIMLARINI AZALTMAK İÇİN SÜRÜCÜ VE KONTROLÖR TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması 11/08/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Ramazan AKKAYA

Danışman

Prof. Dr. Saadetdin HERDEM

Üye

Doç. Dr. A. Afşin KULAKSIZ

Üye

Yrd. Doç. Dr. Mustafa YAĞCI

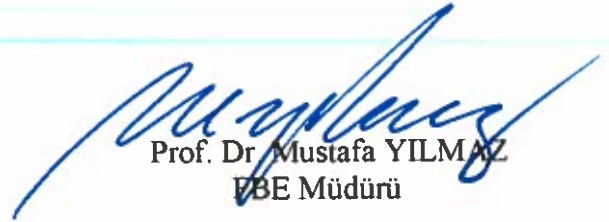
Üye

Yrd. Doç. Dr. Mümtaz MUTLUER

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.



Prof. Dr. Mustafa YILMAZ
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi BAP tarafından 15101006 nolu proje ile desteklenmiştir.

Prof. Dr. Güngör BAL bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



İmza

Hakan TERZİOĞLU

Tarih: 16.08.2016

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SEGMENTAL TİP ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN MOMENT SALINIMLARINI AZALTMAK İÇİN SÜRÜCÜ VE KONTROLÖR TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Hakan TERZİOĞLU

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Saadetdin HERDEM

2016, 178 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Saadetdin HERDEM
Doç. Dr. Ramazan AKKAYA
Doç. Dr. A. Afşin KULAKSIZ
Yrd. Doç. Dr. Mustafa YAĞCI
Yrd. Doç. Dr. Mümtaz MUTLUER

Günümüzde üretim maliyeti düşük, performansı yüksek ve kolay denetlenebilen motorların kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bundan dolayı basit ve dayanıklı yapısı, ucuz maliyeti, düşük ataleti, yüksek hızı ve verimi ile Anahtarlama Relüktans Motorlar (ARM'ler) günümüzde giderek kullanımı artmaya başlayan elektrik makineleridir. ARM'ler birçok avantaja sahip olmalarına rağmen, yakın zamana kadar çok fazla kullanım alanı bulamamışlardır. Bunun en önemli nedenleri arasında rotor konumunun bilinmesinin gerekliliği ve dolayısıyla bir pozisyon sensörüne gereksinim duyulması, torkta meydana gelen ani çökmeler ve bunun sonucunda oluşan tork dalgalılığı ve akustik gürültü gösterilebilir. ARM'lerin en büyük dezavantajı olan tork dalgalılığı üzerine yapılan birçok çalışmada bu problem, motorun fiziksel yapısı, sürme devresi ya da kontrol devresi üzerinden çözülmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasında 5 fazlı U Tipli Segmental Rotorlu 10/8 Anahtarlama Relüktans Motorun (ST-ARM) tork salınımlarının azaltılması hedeflenmiştir. Tork salınımlarını azaltmak için ST-ARM'nin faz kontrolünü sağlayan tetikleme sinyali önerilmiştir. Önerilen sinyaldeki tetikleme açılarının optimum değerleri, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) gibi sezgisel algoritmalar kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, sezgisel algoritmaların parametre değişiminin tork salınımları üzerindeki etkisi de belirlenmiştir. ST-ARM'nin matematiksel ifadeleri kullanılarak Matlab/Simulink ortamında model oluşturulmuştur. Sezgisel algoritma uygulamaları için bu model kullanılmıştır. PSO ve DGA ile belirlenen tetikleme sinyali, dsPIC33EP512MU810 işlemcili SnadPIC PIC Microchip Geliştirme Kartı ile H-köprü sürücü devresine uygulanmış ve ST-ARM bu sürücü ile çalıştırılmıştır. ST-ARM'nin tork değeri FUTEK markanın TRD300 model tork sensörü ile ölçülmüştür.

Deneyel çalışmaların sonuçları incelendiğinde ST-ARM, DGA ve PSO yazılımından elde edilen tetikleme açılarıyla çalıştırıldığında her iki yöntemle de elde edilen tork salınımları hedeflenen %56'lık tork salınımlarının altında kalmıştır. Bu da bu tez çalışmasındaki DGA ve PSO yazılımlarının her ikisinin de ST-ARM'nin tork salınımlarının azaltılmasında başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu tez çalışmasındaki sezgisel algoritma yazılımlarından DGA'nın PSO'ya göre daha başarılı olduğu deneyel sonuçlardan görülmüştür. Ayrıca, PSO ve DGA parametreleri değiştirilerek ST-ARM'nin tork salınımları, yüklü çalışma durumunda %29.46, yüksüz çalışma durumunda %23.5 değerlerine düşürülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Diferansiyel gelişim algoritması (DGA), Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Segmental tip anahtarlama relüktans motor, Tork salınımı

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF DRIVER AND CONTROLLER TO REDUCE TORQUE RIPPLE OF SEGMENT TYPE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Hakan TERZİOĞLU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Saadetdin HERDEM

2016, 178 Pages

Jury

**Prof. Dr. Saadetdin HERDEM
Assoc. Prof. Dr. Ramazan AKKAYA
Assoc. Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ
Asst. Prof. Dr. Mustafa YAĞCI
Asst. Prof. Dr. Mümtaz MUTLUER**

Nowadays, the usage of the electric motors that is low cost, high performance, easy controllable stands out. Switched reluctance motors (SRMs) have low cost, low inertia, high speed, high efficiency, simple and robust construction. Therefore, the usage of SRMs increases day by day. Although SRMs have several advantages, it has not found much use field from reasons such as the necessity of knowing the rotor position, the need for a position sensor, the sudden collapses that occurred in torque, the torque ripples and acoustic noise. The biggest disadvantage of SRMs is the torque ripple. In previous studies, this problem was tried to solve on the physical structure, driving circuit and control circuit of SRMs.

In this thesis study, the torque ripples of 10/8 switched reluctance motor (ST-SRM) which consists of 5 phase-U type segmental rotor was tried to decrease. To reduce torque ripples, triggering signals that provide phase control were proposed. The optimum values of triggering angles in proposed signal were determined by using heuristic algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO) and Differential Evolution Algorithm (DEA). Besides, the effects of heuristic algorithm parameter changes on torque ripples of ST-SRM were determined. The model in Matlab/Simulink was formed by using the mathematical expressions of ST-SRM. This model was used for heuristic algorithms. The triggering signal determined by PSO and DEA was applied to H-bridge driver circuit through the SnadPIC PIC Microchip development board with dsPIC33EP512MU810. The torque value of ST-SRM was measured by FUTEK TRD model torque sensor.

By examining the results of the experimental study, it was shown that the torque ripples of ST-SRM is remained under targeted ripple value of %56. These results showed that both PSO and DEA are successful in decreasing of torque ripples of ST-SRM. When the results were compared, it was emerged that PSO is more successful than the DEA for the torque ripples. Besides, by varying the parameters of PSO and DEA, the torque ripples of ST-SRM were decreased to %29.46 for loaded study, to %23.5 for unloaded study, respectively.

Keywords: Differential evolution algorithm (DGA), Particle Swarm Optimization (PSO), Segment type switched reluctance motor, Torque ripple

ÖNSÖZ

Hazırladığım bu tez çalışmasında, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, tecrübelerini her zaman benimle paylaşan değerli hocalarım tez danışmanlarım Prof. Dr. Saadetdin HERDEM'e ve Prof. Dr. Güngör BAL'a bana ayırdıkları değerli zaman ve sağladıkları destek için minnettarım.

Çalışmamın başlangıcından bitimine kadar, değerli fikir ve öngörülerini benden esirgemeyen tez izleme komitesi hocalarım Doç. Dr. Osman B LG N'e ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa YAĞCI'ya, Doç. Dr. Ramazan AKKAYA'ya, yazılım noktasında tecrübesi ve bilgisiyle her zaman yanımda olan değerli dostum Serkan SATUK'a, tez çalışmamın her aşamasında bana desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Cemil SUNGUR'a, Yrd. Doç. Dr. Murat SELEK'e, Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN'a, Öğr. Gör. Mustafa ARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun çalışmalarım esnasında her türlü fedakarlığı gösteren ve maddi-manevi desteğini esirgemeyen sevgili eşim Elif TERZ OğLU'na ve kızlarım Hatice Ecrin ve Sevede Yağmur'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan, beni her konuda daima destekleyen aileme de teşekkür ederim.

Hakan TERZ OğLU
KONYA-2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLAR.....	22
3.1. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Yapısı ve Temel Özellikleri	23
3.2. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Çalışma Prensibi.....	27
3.2.1. Değişken relüktans.....	27
3.2.2. ARM motorun çalışması.....	29
3.2.3. ARM'ler de Enerji Dönüşümü ve Tork Üretimi.....	34
3.3. ARM'lerin Eşdeğer Devre Modeli ve Dinamik Denklemleri	39
3.4. ARM'de Tork-Hız Karakteristiği.....	43
3.5. ARM'lerde Kullanılan Sürücü Devrelerin Temel Özellikleri.....	44
3.6. ARM'lerde Kullanılan Sürücü Devreler	45
3.7. ARM'de Komütasyon İşlemi	45
3.8. ARM için sürücü devreleri ve özellikleri.....	47
3.8.1. Unipolar (Tek yönlü akım sağlayan) sürücüler	47
3.8.2. Bipolar (Çift yönlü akım sağlayan) sürücüler.....	48
3.9. Sürücü Devrelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	52
3.10. ARM'lerin Uygulama Alanları.....	53
4. SEZGİSEL ALGORİTMALAR.....	55
4.1. Matematiksel Modelleme Yöntemi.....	58
4.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)	60
4.2.1. PSO Algoritmasının temel adımları.....	61
4.3. Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA).....	64
4.3.1. DGA'nın temel adımları	65
5. MATERYAL VE METOD	75
5.1. ST-ARM'nin Matematiksel Modelinin Çıkartılması	78
5.1.1. Faz sargı endüktansının doğrusal olmayan matematiksel modeli	78
5.1.2. ST-ARM'nin doğrusal olmayan matematiksel modeli	83
5.2. Sezgisel Algoritmalar Kullanılarak ST-ARM'nin Tetikleme Açılarının Belirlenmesi	96
5.2.1. PSO ve DGA Yazılımı Performans Değerlendirmesi	96
5.2.2. PSO ve DGA ile ST-ARM'nin Tetikleme Açılarının Optimizasyonu	98

5.3.	ST-ARM Kontrol Deney Düzenekinin Oluşturulması.....	105
5.3.1.	ST-ARM- Tork sensörü-Dinamo-Enkoder bağlantıları.....	106
5.3.2.	H-Köprü Sürücü Devreleri.....	113
5.3.3.	Kontrol Kart Devresi	116
5.3.4.	Besleme Kart Devreleri	121
5.3.5.	Sensör Kart Devresi	124
5.3.6.	Veri İşleme Kartı	127
5.3.7.	Arayüz Tasarımı	129
5.4.	ST-ARM'nin Kontrolü için Deneysel Çalışmaların Gerçekleştirilmesi	132
6.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	136
6.1.	ST-ARM'nin Konum Sensörleriyle Çalıştırılması.....	137
6.2.	ST-ARM'nin Sezgisel Algoritmalarla Belirlenen Tetikleme Açılıyla Çalıştırılması.....	140
6.2.1.	ST-ARM'nin PSO'dan belirlenen tetikleme açılıyla tetiklenerek çalıştırılması.....	141
6.2.2.	ST-ARM'nin DGA'dan belirlenen tetikleme açılıyla tetiklenerek çalıştırılması.....	148
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	155
	KAYNAKLAR	160
	ÖZGEÇMİŞ	168

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

β_r	: Rotor kutup yay açısı
β_s	: Stator kutup yay açısı
c_i	: Sabit sayılar
CR	: Çaprazlama oran katsayısı
D	: Değişken sayısı
F	: Ölçekleme faktörü
i	: Faz akımı
L_a	: Çakışık konum faz endüktansı
L_u	: Çakışık olmayan konum faz endüktansı
L_{max}	: Maksimum faz endüktansı
L_{min}	: Minimum faz endüktansı
M	: Ortak endüktans
m	: Faz sayısı
n	: Motor hızı
NP	: Popülasyon boyutu
T_e	: Üretilen tork
$r_{1,2,3}$	: Rastgele seçilecek kromozomlar
$u_{j,i,G+1}$	: $x_{j,i,G}$ den bir sonraki jenerasyon için üretilen kromozom
W	: Atalet ağırlık değeri
$x_{j,i,G}$	: G jenerasyonunda, i. kromozomun j. parametresi (gen)
$x_j^{(lo)}, x_j^{(hi)}$	: Değişkenlere ait alt ve üst sınır değerleri
x_i	: Değişken
v_i	: Parçacık hızı
θ	: Rotor konumu
ω	: Açısal hızı

Kısaltmalar

ARM	: Anahtarlamalı Relüktans Motor
DGA	: Diferansiyel Gelişim Algoritması
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
ST-ARM	: 5 fazlı U Tipli Segmental Rotorlu 10/8 Anahtarlamalı Relüktans Motor

1. GİRİŞ

Anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM) ile ilk kez 1838 yılında Dawidson tarafından İskoçya’da bir elektrikli lokomotif hareket ettirmek için kullanılırken karşılaşılmıştır. Uzun yıllar kontrolünün zorluğundan dolayı çalışmalar yapılmamıştır. Ancak motor ve sürücü devre tekniğinin gelişimi bu motorlara olan ilginin tekrardan artmasına sebep olmuştur. Ayrıca ARM’lerin basit ve dayanıklı yapısı, ucuz maliyeti, düşük ataleti, yüksek hızı ve verimi ile endüstrinin ihtiyacını karşılayabilecek özelliklerde olması motorun üzerindeki yapılan çalışmaların artmasına neden olmuştur. ARM’lerin çok sayıdaki avantajı aşağıdaki gibi sıralanabilir (Güvenç U., 2005; Bal, 2011; Civelek B., 2012).

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

ARM’nin tüm avantajları endüstriyel anlamda sanayinin ihtiyacı olan bir elektrik makinesinde aranana tüm özellikleri neredeyse karşılamaktadır. Fakat ARM’lerin çok sayıda avantajlarının yanında motorun kullanım alanının sınırlandırılmasına neden olan çok önemli dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Rotor konumunun bilinmesinin gerekliliği ve dolayısıyla bir pozisyon sensörüne gereksinim duyulması,
- Torkta meydana gelen ani çökmeler ve dolayısıyla oluşan tork dalgalılığı ve akustik gürültü gösterilebilir.

ARM'lerin dezavantajlarının giderilmesi kullanım alanlarının artmasını sağlayacağından bu dezavantajların giderilmesi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Rotor konum sensörleriyle çalıştırılmasında konum sensörleri motorun bir parçası olmuştur. Sensörlerin ucuz olması sebebiyle bu dezavantaj çok büyük bir önem oluşturmamaktadır. Ayrıca gerçekleştirilen bazı çalışmalarla ARM'lerin rotor konum bilgisine ihtiyaç duymadan kontrol edilmesi sağlanmıştır. ARM'lerin kullanım alanlarının artmasını sağlayacak en önemli gelişme tork salınımlarının azaltılması üzerinde yapılan çalışmaların başarısıyla gerçekleştirilebilir. Bundan dolayı ARM'lerin en önemli dezavantajı tork salınımlarının azaltılmasıdır. Tork salınımları ARM'lerdeki gürültünün de kaynağıdır(Uygun D., 2012; Terzioğlu H. ve ark., 2013).

Bugüne kadar tork salınımlarının azaltılması için yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda, motorun fiziksel yapısı, sürme devresi ya da kontrol devresi üzerinden çözülmeye çalışılmıştır. Motorun tasarımında gerçekleştirilen değişikliklerle ARM'lerin tork salınımları azaltılmaya çalışılmış ve kısmen de başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Segmental yani parçalı yapıya sahip rotor yapılarının oluşması da bu çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. Segmental rotor yapısına sahip olan motorların klasik rotor yapısına göre daha az salınım ve daha çok tork ürettiği yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Sürücü devre ve kontrolü üzerinde yapılan çalışmalardan sürücü performanslarının ARM'lerin tork salınımları üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalarda yeni sürücü devreleri oluşturulurken aynı zamanda yeni kontrol teknikleri denenmiş ve ARM'lerin tork salınımları azaltılmıştır. Tüm bu çalışmalara rağmen karmaşık bir modele sahip olan ARM'ler için tek bir doğruya ulaşılamamıştır çünkü her ARM kendine ait özelliklere sahip olan bir motordur. Bundan dolayı üretici firmalar ARM'lerin denetim şekline göre geniş oranda değişiklik gösteren tork-hız eğrilerinden dolayı motorların tork-hız eğrilerini belirlememişlerdir. Dolayısıyla sürücü devre ve kontrol devresi üzerinde yapılan çalışmalar günümüzde de hala önemini korumaktadır (Güvenç U., 2005).

Bu tez çalışmasında 5 fazlı U Tipli Segmental Rotorlu 10/8 Anahtarlamalı

Relüktans Motorun tork salınımlarının azaltılması amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan motor bundan sonra ST-ARM olarak ifade edilecektir. Bu motorun akademik bir çalışma sonucunda prototip olarak üretilmiş olması ve bu motorla ilgili çok fazla çalışmanın yapılmamış olması tezin önemini artıran unsurlardan olmuştur. Ayrıca klasik ARM yerine ST-ARM kullanılmış olması ve motorun bipolar olarak kontrol edilmesi çalışmayı daha da önemli hale getirmiştir.

ARM'ler ile yapılan çalışmalarda kullanılan sürücü ve kontrol sinyalinin motorun tork salınımları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Çalışmaların birçoğu sürücü devre tasarımından daha çok kontrol sinyalinin belirlenmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Kontrol sinyali çalışmalarında ARM'lerde fazların enerjilendirilmeye başlanacağı zaman t_{on} ile fazlarının enerjisinin kesileceği zaman t_{off} 'un belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. ARM'lerdeki bu t_{on} ve t_{off} zamanları motorun akım değerine ve salınımına doğrudan etki etmektedir. ARM'lerde tork değeri akımın karesiyle ve endüktansın konuma göre türeviyle değiştiğinden akımdaki salınımlar direk tork salınımlarına sebep olmaktadır.

Bu tez çalışmasında temel alınan nokta akımdaki salınımları minimize etmektir. Bu başarıldığı takdirde torktaki salınım değerleri de azaltılabilecektir. Bugüne kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak kontrol sinyali zamana değil rotorun açısal konumuna göre belirlenmiştir. Böylece ARM'nin hızı ne olursa olsun açısal değer değişmeyeceğinden daha geniş hız aralıklarında kullanılabilen bir kontrol sinyali önerilmiştir. Ayrıca tez çalışmasında diğer çalışmalardan farklı olarak kontrol sinyali sadece tek darbe olarak değil, 3 darbe olarak tasarlanmış ve darbelerin konumları da belirlenmiştir. Son konum faz sargısının tamamlandığı açı değeridir ki bu ARM'nin fiziksel yapısıyla ilgili bir durumdur ve her faz için sabit bir değerdir. Kontrol sinyalinde önerilen bu yaklaşım tez çalışmasını diğer çalışmalardan ayırmaktadır. Tez çalışmasında önerilen sinyalin (bu sinyal tetikleme sinyali olarak da ifade edilebilir) açılarını belirlemek için sezgisel algoritmalarından Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmıştır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda PSO'nun on ve off zamanlarını belirleme noktasında çalışmalar yapılmış olsa da önerilen tetikleme sinyali gibi bir uygulama gerçekleştirilmemiştir. DGA ile ARM'nin kontrolü üzerine yapılan bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır ve bu bakımdan da tezin ayrı bir önemi ortaya çıkmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan PSO ve DGA yazılımında kullanılan parametre değerleri değiştirilerek her algoritma için 2

adet çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu da bu tez çalışması için PSO ve DGA yazılımlarındaki farklı parametrelerin sezgisel algoritmaların performansını ne kadar etkilediği ve bu sonuçların ARM'nin tork salınımlarına yansımalarının ne kadar olduğu konusunda iyi bir uygulama örneği olacağı düşünülmektedir.

ST-ARM'nin bipolar olarak çalıştırılmasından dolayı H-köprü sürücü devresi tercih edilmiştir. Sürücünün kontrol devresi olarak dsPIC33EP512MU810 işlemciye sahip olan SnadPIC PIC Microchip Geliştirme Kartı kullanılmıştır. PSO ve DGA'dan elde edilen tetikleme açıları ile kontrol edilen ST-ARM'nin yüklü ve yüksüz olarak deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında ARM'lerin en önemli sorunu olan tork salınımlarının azaltılması için bir tetikleme sinyali önerilmiş ve bu sinyalin açısız değerleri sezgisel algoritmalarla PSO ve DGA kullanılarak optimize edilmiştir. Sezgisel algoritmalarla elde edilen tetikleme açılarıyla kontrol edilen ST-ARM'nin tork salınımlarının daha önceki çalışmalardaki salınımlardan ortalama %50 oranında azaltıldığı görülmüştür.

Bu tez çalışması toplam yedi bölüm ve kaynaklardan oluşmaktadır.

Birinci Bölümde; tezin konusu genel olarak tanıtılmış, tezin önemi ve amacı hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

İkinci Bölümde; ARM'ler hakkında bugüne kadar yapılan literatürdeki çalışmalar hakkında özet bilgiler verilmiştir.

Üçüncü Bölümde; ARM'lerin yapısı ve temel özellikleri, çalışması, eşdeğer devre modeli ve sürücü devreleri açıklanmıştır.

Dördüncü Bölümde; Sezgisel algoritmalar, PSO ve DGA hakkında geniş bilgi verilmiştir.

Beşinci Bölümde; tez çalışmasında kullanılan materyal ve metotlar, ST-ARM'nin matematiksel modelinin çıkartılması ve Matlab/Simulink modelinin oluşturulması, Sezgisel algoritmalar için ST-ARM matematiksel fonksiyonun tanımlanması, ST-ARM kontrol deney düzeneği ve Visual Studio C#'da hazırlanan arayüz hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Altıncı Bölümde; Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneylerin, grafikler ve çizelgelerle sonuçları açıklanmıştır.

Yedinci Bölümde; yapılan tez çalışmasında elde edilen sonuçlar tartışılmış ve ileride bu konuda çalışma yapacak araştırmacılara öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

(Dawson ve ark., 1987) tarafından yapılan çalışmada farklı kontrol şemalarının etkinliğini, performansını ve motor tasarımını değerlendirmek için doğru bir model gerektiği açıklanmıştır. Sonlu eleman metodu, manyetik materyallerin doğrusal olmayan özelliklerini, rotor ve statorun belirgin kutup geometrilerini göz önüne alarak ARM'nin performansını tahmin etmek için kullanılmıştır. Hesaplanan sonuçlar 7.5 W'lık Oulton ARM'den elde edilen test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

(Elmas ve ark., 1994) tarafından yapılan çalışmada yapay sinir ağları kullanılarak doğrusal olmayan bir ARM sürücüsü modellenmiştir.

(Elmas ve Bay, 1995) tarafından yapılan çalışmada bulanık mantık tabanlı doğrusal olmayan relüktans motor sürücüsünün çalışması modellenmiştir.

(Kjaer ve ark., 1997) tarafından yapılan çalışmada aktuator ve hareket kontrol uygulamaları için yüksek bantlı ARM tork kontrolünün değerlendirilmesi ve testi araştırılmıştır. Yeterince hızlı ve doğru bir tork kontrolü hedeflenen bu çalışmada kavramın doğruluğunu sağlamak için bir deneysel test düzeneği tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tork kontrolünün kalitesi şeffaf bir tarzda geleneksel hız ve pozisyon kontrol döngülerinin tasarımına izin vermektedir. Bu makalede yüksek hız performanslı hareket kontrolü, özellikle yüksek bant genişlikli hız ve pozisyon kontrolü ve dört bölgeli işlemi rapor edilmiştir.

(Kosaka ve Matsui, 2000) tarafından yapılan çalışmada, tam kutup adımli Anahtarlama Relüktans Motorun konum algılayıcısız denetlenmesi ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Önerilen Bulanık Mantık tabanlı algoritma ile hem akı halkalanmasını hem de akımları kullanarak rotor konumunu belirlemek mümkün olmuştur. 400 W, 3000 d/dk, 12/8 stator ve rotor kutup yapısına sahip motorda uygulanan bu algoritma ile oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir.

(Wichert ve ark., 2001) tarafından yapılan çalışmada, anahtarlama relüktans motorlarda verimi arttırmak ve kayıpları azaltmak için optimum yapısal parametrelerin belirlenmesi incelenmiştir.

(Hong ve ark., 2002) tarafından yapılan çalışmada, klasik anahtarlama relüktans motorlarda değişik stator kutup şekilleri ve boyunduruk yapıları modellenerek motorda oluşan titreşimlerin düşürülmesi amaçlanmıştır.

(Xu ve Torrey, 2002) tarafından yapılan çalışmada, klasik ARM ile karşıt kuplajlı ARM'nin sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri gerçekleştirilerek çalışma karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

(Ursem ve Vadstrup, 2003) tarafından yapılan çalışmada, Danimarkalı pompa üreticisi Grundfos AIS tarafından üretilen iki adet asenkron motorun parametrelerinin belirlenmesi için diğer üç evrim algoritmasıyla diferansiyel gelişim algoritması kıyaslanmıştır. Yapılan deneylerde bazı motor büyüklüklerinde diferansiyel gelişim diğer üç algoritmadan daha iyi sonuç vermiştir. Özellikle 5.5kW'ın üzerindeki motor problemlerinde daha hızlı yakınsanma göstermiştir. Ayrıca diferansiyel gelişim algoritmasını uygulamanın diğer algoritmalara kıyasla çok daha basit olduğu ve daha az parametre ayarı gerektirdiği görülmüştür.

(Liptak, 2004) tarafından yapılan çalışmada ARM'nin kontrolünde kullanılan sürücü yapısının sistemin toplam performansını etkilediği ve motoru değerlendirirken motor kayıplarının ve tork dalgalanmasının da düşünülmesi gereken etkenler olduğu ifade edilmiştir.

(Choi ve ark., 2005) tarafından yapılan çalışmada yumuşak ve sert anahtarlama modlarındaki DC hat gerilim dalgalanması ile ilgili ARM'nin karakteristik analizini sundukları çalışmalarında ARM'nin basit, sade ve düşük maliyetli yapısına değinerek bu motorlarda görülen akustik gürültü ve tork dalgalanmasının sebepleri üzerinde durmuşlardır. ARM sürücü devrelerinde bulunan DC hat kapasitöründen ve bu kapasitör değerinin hat geriliminde meydana getirdiği dalgalanmalardan bahsetmişler ve bunun neticesinde tork değerlerinin bozulduğuna işaret etmişlerdir. Anahtarlama elemanı kapatıldığında faz akımının diyot üzerinden veya DC hat kapasitörü üzerinden aktığı ve genelde bu elemanlar üzerindeki dalgalanmaların, motor analizi sırasında göz önünde bulundurulmadığı ifade edilmiştir. DC hat üzerindeki dalgalanmalar, yumuşak ve sert anahtarlama modlarında sonlu eleman analizi ile incelenmiş, bu modlar arasında sert anahtarlama modunda DC hat kapasitörü üzerinde daha fazla dalgalanma olduğu görülmüş ve buna sebep olarak da akım değişim oranının yüksek oluşu verilmiştir. DC hat ve diyot üzerindeki dalgalanmaların etkisi düşünülerek tork dalgalanmasının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

(Husain ve Hossain, 2005) tarafından yapılan "ARM sürücülerinin modellenmesi, simülasyonu ve kontrolü" adlı çalışmalarında, servo uygulamaları için oldukça kritik olan tork kontrolünü sağlayabilmek için karmaşık bir kontrol tekniğinin

kullanım gereksiniminden bahsetmişler ve ARM kontrolörü için doğruluğu yüksek bir model sunmuşlardır. Pratikte karşılaşılan ölçüm hataları, işlemci gecikme zamanı ve analog sinyali sayısal sinyale dönüştürme etkeni oluşturulan modele dâhil edilmiştir. Simülasyonda tatmin edici sonuçlara ulaşıldıktan sonra oluşturulan test düzeneği üzerinde çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçların simülasyon sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür.

(Kioskeridis ve Mademlis, 2005) tarafından yapılan tek pals kontrollü ARM sürücülerinde maksimum verimlilik elde etmek için seçilmesi gereken tetikleme açısının araştırıldığı çalışmada, çevre akılarının optimum kontrolü, tetikleme açısı, yüke karşı tork gereksinimleri, rotor hızı gibi unsurlar incelenmiş, açılma ve kapanma açılarının sürekli olarak yeniden belirlendiği bir kontrolör sunulmuştur. Sunulan kontrolörün, tek pals ve PWM kontrol arasında bir geçiş sağlamakta olduğu ve bu nedenle tüm hız sahasında ARM sürücüleri için optimum performansın sağlandığı beyan edilmiştir.

(Jeyabharath ve ark., 2005) tarafından yapılan ARM'lerin indüksiyon motorlarına rakip hale geldiği belirtilen “ARM sürücüler için yeni bir sürücü topolojisi” adlı çalışmada yazarlar, sensör bulundurmeyen tek uçlu primer endüktans sürücüsünü, güç çarpanı ön düzenleyici gibi çalıştırmışlardır. Bu sayede güç çarpanı değerlerinde bir iyileşme, daha düzgün birtakım regülasyonu ve düşük maliyetli bir sürücünün elde edildiği bildirilmiştir.

(Edrington ve ark., 2005) tarafından yapılan çalışmada bipolar anahtarlama relüktans motorlardan bahsetmişler ve sürücü tekniğini açıkça ortaya koymuşlardır.

(Mao ve Tsai, 2005) tarafından yapılan çalışmada stator kutuplarının yeni tasarım şekli (C-core) ile klasik anahtarlama motorlara göre daha yüksek moment üreten, verimi daha yüksek, aynı zamanda esnek sargı yapısına sahip bir anahtarlama relüktans motorunun tasarımı yapılmıştır.

(Cebolla ve ark., 2006) tarafından yapılan çalışmada, anahtarlama relüktans motorlarında akım yönü ve sargı diziliminin çıkış momentine etkisi incelenmiş, 24/18 bir anahtarlı motor için faz akımlarının yönüne ve sargıların dizilimine göre çıkış momenti deneysel sonuçları ile ortaya konmuştur.

(Choi ve Koh, 2006) tarafından yapılan çalışmada, kutup şeklinin anahtarlama relüktans motorun moment dalgalılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ortalama moment üretimi fazla ve moment dalgalanması daha az olan bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir.

(Lin ve ark., 2006) tarafından yapılan çalışmada B-eğrili sinir ağı (BSNN) kullanılan ARM'nin tork dalgalanma azaltma şeması sunulmaktadır. Kapalı döngü tork kontrolü, bir online tork tahmin edici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. BSNN için kullanılan lokal ağırlık güncelleme algoritmasından dolayı, tork dalgalanma azaltması için bir uygun faz akım profili online gerçek zamanlı olarak elde edilmiş ve arzu edilen torktaki değişimlere göre iyi bir dinamik performansa sahip olduğu açıklanmıştır. Önerilen şemanın yüksek bant genişlikli bir akım kontrolör gerektirmediği açıklanmış ve simülasyon ve deneysel sonuçlarla şemanın geçerliliği gösterilmiştir.

(Vasak ve ark., 2007) tarafından yapılan çalışmada ARM'nin tork kontrolü için kısıtlı tahmin kontrol temeline dayalı bir yaklaşım öngörülmüştür. Özellikle, motor torkunun yüksek derecede doğrusal olmama karakteristiği bir PWA formunda yakınsanmakta olduğu ifade edilmiştir. Bu yaklaşım temelindeki, ARM'nin basit PWA modeli oluşturulmuş ve tork kontrolör tasarımına dayalı bir model için kullanılmıştır. Kullanıcı tarafından belirlenen izin verilen maksimum tork izleme hatası motor durum uzayındaki ayarları ve tork referanslarını belirlemek için kullanılmıştır.

(Sato, 2007) tarafından yapılan çalışmada dönme ve doğrusal hareket için 2 derecelik serbestliğe sahip ARM temelinde yeni bir elektromanyetik aktuator sunulmuştur. Prototip aktuator, 30 N'luk maksimum itme kuvveti, maksimum 1000 1/dk hızlı, 2 derece hareket serbestliğine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Motorun performans testinde, dönme hızı ve doğrusal pozisyon kontrolünün bağımsız olarak gerçekleştirilmesi doğrulanmıştır.

(Daldaban ve Ustkoyuncu, 2007) tarafından yapılan çalışmada, disk tipi anahtarlama relüktans motorların klasik anahtarlama relüktans motorları ile moment üretimi ve gürültü seviyesi noktasında karşılaştırılması yapılmıştır. Temelde doğrusal relüktans motorlara benzeyen disk tipi anahtarlama relüktans motorların daha yüksek moment ürettiği ve daha düşük gürültü seviyesine sahip olduğu ortaya konmuştur.

(Daldaban ve Ustkoyuncu, 2008) tarafından yapılan çalışmada, çok katmanlı anahtarlama relüktans motorlarında moment dalgalılığı durumu incelenmiştir. Çalışma bu tür motorlarda daha yüksek kalkış momenti ve daha düşük gürültü seviyesi olduğu sonucu elde edilmiştir.

(Hudson ve ark., 2008) tarafından yapılan çalışmada ARM'nin akım ve/veya gerilim sinyallerini kullanarak rotor konumunu tahmin edecek gizli katman nöron sayısının az kullanıldığı bir YSA tasarlamışlardır.

(Salvatore ve ark., 2008) tarafından yapılan çalışmada sensörsüz asenkron motor sürücülerinin gerçekleştirilmesinde yeni bir indirgenmiş gecikmeli-durum Kalman filtresi tabanlı bir algoritmanın kovaryans matrislerini elde etmek için diferansiyel gelişim algoritmasının kullanılması önerilmiştir. Önerilen kontrol şemasında PI denetleyici olmaksızın tork ve stator akısına ait kapalı döngüler bulunduğu belirtilen bu çalışmanın avantajları arasında ayarlanması gereken parametrelerin azlığı vurgulanmıştır. Önerilen optimizasyon problemi üzerinde farklı ayarlarla diferansiyel gelişim ve genetik algoritma arasında yapılan karşılaştırmada diferansiyel gelişimin genetik algorithmadan daha iyi olduğu belirtilmiştir.

(Caponio ve ark., 2008) tarafından yapılan çalışmada, kalıcı mıknatıslı senkron motorun kontrol sisteminin en iyi tasarımını elde etmek amacıyla evrimsel yapı olarak diferansiyel gelişimi kullanan memetik algoritmaların uygulanması önerilmiştir. İki memetik diferansiyel gelişim yapısının ele alındığı bu çalışmada aynı problemin çözümü için standart diferansiyel gelişim, standart genetik algoritma ve literatürde sunulan memetik algoritma kıyaslanmıştır. Tüm algoritmalar bütün bir sistem olarak simülasyonlar ile test edilmiştir. Sayısal sonuçlara göre diferansiyel gelişim yapılarının yakınsama hızı açısından çok umut verici görüldüğü ve gerçek problemler için tespit edilen nihai çözüm açısından oldukça iyi bir performansa sahip olduğu belirtilmiştir.

(Cai ve ark., 2009) tarafından yapılan çalışmada elektrik motoru sisteminin doğrusal olmayan denklemlerin çözümü için geliştirilmiş bir diferansiyel gelişim algoritması araştırılmıştır. Söz konusu algoritma denklemleri optimizasyon problemi haline dönüştürmektedir. Arama verimliliğini artırabildiği vurgulanan algoritmanın popülasyon örtüşmesi için gerçek zamanlı gözetlemeyi uygulayabildiği belirtilmiştir. Küresel optimizasyon yeteneğini daha fazla geliştirmek için bireysel örtüşen kaos arama stratejisi kullanılmıştır. Asenkron motor hareket parametreleri analiz sonuçları, geliştirilmiş diferansiyel gelişim algoritmasının yüksek verimlilik ve güçlü bir global optimizasyon arama yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.

(Xue ve ark., 2009) tarafından yapılan çalışmada tork dalgalanmalarını minimize etmek için iki tane tork paylaşım fonksiyonu sunmuşlardır. Çalışmalarında genetik algorithmadan da faydalanan yazarlar belirlenen bir tork için devreyi açma ve kapama açısının hız aralığı, maksimum hız, bakır kaybı ve verim üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermişlerdir.

(Liang ve Ding, 2009) tarafından yapılan çalışmada radyal tabanlı fonksiyon ağ tabanlı uyarlamalı bulanık sistemi (RBFN-AFS) olarak adlandırılan yeni bir bulanık sinir sistemi ile ARM'nin modelini ve sürücü sistemi içerisindeki dinamik performansının tahminini gerçekleştirmişlerdir.

(Bal G. ve D., 2010a) tarafından yapılan çalışmada 5 fazlı U tipli Segmental rotorlu yeni bir ARM tasarlanmış ve tasarlanan ARM'nin klasik ARM'ye oranla daha fazla tork ürettiği belirtilmiştir.

(Bal G. ve D., 2010b) tarafından yapılan çalışmada yüksek tork ve düzgün çıkış güç için ARM içerisindeki rotor ve stator diş genişlikleri arasındaki oranın belirlenmesi üzerine bir çalışma daha yapılmıştır.

(Zhang ve ark., 2010a) tarafından yapılan çalışmada ARM'nin endüktans değişimini ve dolaylı olarak manyetik karakteristiği modelleyerek yüksek kontrol performansı elde etmişlerdir.

(Zhang ve ark., 2010b) tarafından yapılan çalışmada ARM torkunu kullanan bir kontrol modeli ele alınmıştır. Motor tork kontrolünü başarmak için, tork değişimine göre, stator voltaj vektörü ve stator akısının dönme hızı kontrol edilerek stator akısı bağlantısının ortalama dönme hızı değiştirilmiştir. Simülasyon analizinde doğrudan tork kontrolü ve akım kesici kontrolü şeklinde iki farklı kontrol modu ARM üzerinde uygulanarak test edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, çalışma torkunun doğrudan tork kontrol modunda daha hassas ve daha az bir tork dalgalanması sağlayacak şekilde kısıtlanabileceği ifade edilmektedir.

(Zaimeddine ve Undeland, 2010) tarafından yapılan çalışmada doğrudan tork kontrolüne dayalı anahtarlama tablosu (ST-DTC) endüstride güç sürücülerine uygulanabilen önerilen bir kontrol tekniği olarak ifade edilmiştir. Ancak, ST-DTC sabit olmayan anahtarlama frekansı ve yüksek tork dalgalanmaları gibi bazı mahsurlar sunmaktadır. Bu çalışmada, uzay vektör modülasyon tekniği uygulanarak azaltılmış tork dalgalanmalı ve sabit anahtarlama frekanslı, nötr nokta kenetli topolojisi (NPC) ve üç seviyeli voltaj kaynak invertörü tarafından beslenen bir indüksiyon motoru için bir DTC şeması önerilmiştir. Bu metotlarda sürücünün referans voltaj vektörü farklı yollarda üretilmekte ve hareketsiz düzlemde üç en yakın vektör kullanılarak her bir örnekleme periyodu sentezlenmiştir. Sunulan simülasyon sonuçlarından önerilen teknikler kullanılarak anahtarlama frekansı sabitlenmekte ve sürücü performansı iyileştirilmeden

ve sürücü davranışının kalitesi azaltılmadan örnekleme frekansı düşürülebileceği ifade edilmiştir.

(Pavlitov ve ark., 2010) tarafından yapılan çalışmada ARM tork dalgalanma azaltması araştırılmıştır. Doğrudan tork geri beslemesinin, diğer yöntemlerin oldukça kabul edilemez fiyatlarından dolayı bu durumlar için en iyi çözüm olduğu ifade edilmiştir. Sinir ağı tork tahminli geri besleme, açık sistemlerle karşılaştırıldığında 2.5 kata kadar tork dalgalanmasını azaltmıştır. Bu çalışmada oldukça kararlı çalışan paralel sinir ağı motor modeli önerilmiştir. Bu model ARM'nin davranışını kopyalayıp, dinamik tork içeren farklı durum parametrelerinin gözlenmesinde kullanabilmekte ve modelin uygulanmasıyla düzenli açık sistemlerle karşılaştırıldığında 10 kat tork dalgalanmalarını azaltabilmektedir. Aslında, bu adaptif referans modeli orta ölçekli FPGA'da gömülü paralel algoritma vasıtasıyla tam olarak kullanılabilmiştir.

(Chang ve ark., 2010) tarafından yapılan çalışmada kompakt bir güç devresi için 3 fazlı akıllı güç modülleri inşa etmişlerdir. ARM sargı endüktans değişimleri tahmin ederek sargı akımları ve anahtarlama açıları kontrol edilmiştir. Geniş çalışma koşulları altında, yüksek hızlarda tatmin edici bir sürme performansı ve geliştirilmiş maksimum enerji dönüşüm verimi elde etmişlerdir.

(Chai ve Liaw, 2010) tarafından yapılan çalışmada akıllı akım profili yaklaşımı ile bir anahtarlama mod doğrultucu ile beslenen geri beslemeli relüktans motor sürücüsü kullanılarak hız dalgalanmaları ve titreşim azaltılmıştır.

(Ha ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada konum tahmini sadece aktif faz akım ve gerilimi kullanılarak yapılmış ve yüksek doğrulukta bir kontrol gerçekleştirilmiştir. Akı tahmininde bu çalışma sonunda %3 ortalama hata, maksimum %18'lik mutlak fark olduğu görülmüştür.

(Henriques ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada sensörsüz Anahtarlama Relüktans Motor kontrolü yapılmıştır. Bu çalışmada basit YSA kullanılmıştır. Bu çalışmada akım ve gerilim değeri filtreli olarak YSA'da giriş olarak kullanılmıştır. YSA için parametre değerleri değiştirilerek yeni bir çalışma konusu olabileceği ifade edilmiştir.

(Cai ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada optimal kontrol stratejilerinin tasarım ve analizi için 3D sonlu elemanlar analizi ile akı bağıntıları çift skaler manyetik potansiyeli yöntemi (DSMP) önerilmiştir. Bu çalışmada lineer olmayan modellemenin doğruluğunu artırmak için sınır değerlerinin sınırlandırıldığı (BVC-RBF) yeni bir radyal

tabanlı sinir ağı (RBF) kullanılmıştır. Simülasyon Matlab programında Simulinkte yapılmıştır ve deneysel uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda kullanılan yöntemin iyi bir sonuç verdiği görülmüştür.

(Wang ve Liu, 2011) tarafından yapılan çalışmada ARM için 2 tane modifiye PI-Fuzzy kullanılarak sürücü uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada PI kontrolörün kazancı ve üyelik fonksiyonları (MSF) Fuzzy'nin set sayısı azaltılarak kontrol programının karmaşıklığı basitleştirilmiştir. Bu çalışmada uygulama DSP kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fuzzy'nin kural tabanları, ARM'nin dinamik davranışı ve pratik deneyim bilgisine göre oluşturulmuştur. Önerilen yöntem kullanılarak ortalama aşım ve set zamanı üzerinden inceleme yapılmıştır. Çıkış performansları değerlendirilmiş ve oluşturulan bulanık mantık ile daha iyi bir sonuç elde edildiği görülmüştür.

(Chang ve Liaw, 2011) tarafından yapılan çalışmada elektrikli araçlar için 3 fazlı akıllı güç modülleri (IPMS) kullanılarak araçlar için entegre bir araç şarj ve sürme devresi geliştirilmiştir. Anahtarlamalı Relüktans Motoru sürmek için modifiye edilmiş Miller Sürücü kullanılmıştır. Bu yöntemde işlemler ve kontrol düzeneği dijital sinyallerle yapılmıştır. Kullanılan akım ve hız kontrolü şeması yöntemiyle tatmin edici bir sürüş performansı elde edilmiştir.

(Chen ve Jing, 2011) tarafından yapılan çalışmada ARM'deki kaçak akıyı belirlemek için bir kenetleme cihazı veya bir arama bobini kullanmaya gerek duymayan bir yöntem önermişlerdir. Kaçak akı, ARM'nin kararlı durum çalışmasındaki rotor konumu, faz gerilimi ve akımı ölçülerek hesaplanmıştır. Bu çalışmada önerilen yöntem geleneksel gerilim darbe enjeksiyon yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan yöntem sonucunda hızdaki dalgalanmaların düşük olduğu görülmüştür.

(Geldhof ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada ARM'de rotorun konumu, pozisyona bağlı faz voltaj rezonanslarının ölçümünden tahmin edilmiştir. Rotor sabit bir açısız konumda tutulsa bile ARM'nin manyetik nüvesinin histerezisi nedeniyle tetiklenen rezonanslar farklı rezonans dalga şekillerini sergilemektedir. Bu özellik kullanılarak rotor konumunun belirlenmesi sağlanmıştır.

(Dehkordi ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada akıllı denetleyicilere dayalı bir beyin duygusal öğrenme (BELBIC) yöntemi kullanılarak Anahtarlamalı Relüktans Motorun hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. BELBIC doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü ve serbest model için uygundur. Bu çalışmada ARM içinde motor

parametre değerleri, çalışma noktası değişikliği, ölçüm gürültüsü, bir faz açık devre hatası, asimetrik fazlar simüle edilmiştir. Bu çalışmada BELBIC'in üstün performansı ve sağlamlığı gösterilmiştir. Simülasyon olarak BELBIC ile Bulanık Mantık Denetleyici (FLC) karşılaştırılmış ve rotor konumu da tahmin edilmiştir. Ayarlanabilir Yapay Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) esas alınmıştır. Dört fazın akı bağlantıları ANFIS'e giriş olarak uygulanmıştır. Farklı yükler ve hızlarda doğru rotor konumu tahmin edildiği ispatlanmıştır.

(Ding ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada çift kanallı Anahtarlama Relüktans Motor için manyetik devre eşdeğerinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Çift kanallı ARM bağımsız iki güç elektroniği devresi tarafından tahrik edilen makinelerdir. Bu çalışmada hava aralığı manyetik iletkenliğinin, stator ve rotor kutup ve boyunduruk manyetik iletkenliği formülasyonu tarafından faz sargılarının statik öz ve karşılıklı akı bağlantıları ve bunların birbirini karşılıklı etkilerinin yanı sıra manyetik doyumun da dikkate alındığı bir modelleme yapılmıştır. Yapılan deneysel ve simülasyon çalışması sonucunda iyi bir sonuç alındığı görülmüştür.

(Wang ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada radyal kuvveti artırmak için yeni bir hibrit Anahtarlama Relüktans Motor tasarlanmıştır.

(Hannoun ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada manyetik doyumun hesaplanabilmesi için rotor konumu ve akımına bağlı değişken kazançlı bir PI şeması önerilmiştir. Endüktanstaki değişime bağlı olarak değişen bir PI hesaplaması yöntemi kullanılmıştır. Sabit PID ile karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

(Rajasekhar ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada, diferansiyel gelişim ile yapay arı kolonisi algoritmalarının bir birleşimi olan melez diferansiyel yapay arı kolonisi algoritması önerilmiştir. Bu algoritma, yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motor sürücüsündeki kesirli dereceli PI denetleyici tasarımı için kullanılmıştır. Kesirli dereceli PI denetleyicinin parametreleri orantı sabiti, integral sabiti ve integral derecesini içerdiği için, tasarımının olağan PI denetleyicilere göre daha karmaşık olduğu ifade edilmiştir. Yapılan kıyaslama ve simülasyon sonuçları, düzgün tasarlanmış ve uygulanmış kesirli dereceli PI denetleyicinin geleneksel tamsayı dereceli PI denetleyiciden daha iyi sonuç sağladığını ortaya koymuştur.

(Moron ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada lineer manyetik model kullanılarak ani tork kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tork kontrolünde komütasyon açısı

belirlenerek tork kontrolü gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarında torktaki salınımların azaltıldığı görülmüştür.

(Wang ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada ayarlanabilir fuzzy serebellar model bitişirme kontrolü (AFCMAC) kullanılarak hız regülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon ve deneysel olarak AFCMAC, ACMAC ve PID kontrol yöntemleri kullanılmış ve karşılaştırılma yapılmıştır. AFCMAC'nin diğer yöntemlere göre bozucu etkilere tepkisi ve parametrelerin değişim kapasitelerini izleme performansının daha iyi olduğu görülmüştür.

(Zhong ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada Anahtarlama Relüktans motorun rotor konumunu belirlemek için YSA modeli kullanmışlardır. Geleneksel YSA, geliştirilmiş YSA ve geliştirilmiş YSA ile eğri uydurmanın birlikte kullanıldığı 3 yöntem karşılaştırılmıştır. YSA modelleri akım, manyetik akı ve endüktans değerleri ile 3 girişli, rotor konumu da çıkış olmak üzere tasarlanmıştır. Geliştirilmiş YSA modeli 1 gizli katmana göre, geleneksel YSA modelinde 2 gizli katmana göre tasarlanmıştır. Geliştirilmiş YSA ve eğri uydurma yöntemiyle %24.56 oranında geleneksel YSA 'ya göre tahmin süresini azalttığı görülmüştür.

(Gameiro ve Cardoso, 2012) tarafından yapılan çalışmada Anahtarlama Relüktans Motor sürücüleri için uygulanan yeni bir arıza teşhisi sunulmuştur. Normal çalışma koşullarında güç kaynağının akımının genlik değeri, referans akımının genlik değeri ile karşılaştırılarak arıza teşhisi yapılmıştır. Arıza olarak açık ve kısa devre hataları belirlenmiştir. Sürücü yapısı olarak asimetrik köprü kullanılmıştır.

(Cai ve Deng, 2012) tarafından yapılan çalışmada rotor konumu tahmini yapılmıştır. Rotor konumunu belirlemek için faz endüktansları vektörel büyüklük olarak tanımlanmış ve ortogonal ayrışması kullanılmıştır.

(Tseng ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada Takagi-Sugeno-Kang (TSK) Fuzzy kontrolör yöntemi kullanılarak Anahtarlama Relüktans Motorun hızı kontrol edilmiştir. Lyapunov kararlılık teorisi kullanılarak yöntemin kararlılığı ispatlanmıştır. Ayarlanabilir TSK fuzzy kontrolör, fuzzy kontrolör ve PID kontrol yöntemleri ARM hız kontrolünde kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda ayarlanabilir TSK fuzzy kontrolörün diğer 2 metoda göre daha iyi sonuç verdiği ispatlanmıştır.

(Vujičić, 2012) tarafından yapılan çalışmada tork paylaşım fonksiyonu (TSF) olarak adlandırılan yöntem kullanılarak torktaki dalgalanmalar minimize edilmiştir. Bu yöntemde referans tork değeri direkt olarak analitik yöntemle referans analitik dalga

şekline çevrilmiştir. Bu yöntem kullanılarak tetikleme açıları ayarlanarak yapılan bir çalışmadır. Bu çalışma sonucunda bakır kayıplarını azaltmak veya sürücü performansı maksimizasyonu yapmak için TSF'nin optimizasyon kriterleri kullanılmıştır. Lineer ve sinüsoidal TSF yöntemi kullanılmış ve karşılaştırılmış, torktaki salınımlar minimize edilmiştir.

(Sahoo ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada ARM için Lyapunov fonksiyonu tabanlı kararlılık ile direkt tork kontrolü önerilmiştir. ARM'nin mıknatıslama özellikleri (tork, faz akımları ve rotor pozisyonunun karmaşık bir pozisyonu olduğundan) doğrusal olmayan bir yapıdadır. Bu çalışmada önerilen yöntem ile tork dalgalanmaları minimize edilmiştir.

(Rafiq ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada Anahtarlama Relüktans Motorun hız kontrol uygulamaları için yeni kararlı bir teknik geliştirilmiştir. Geliştirilen bu teknik ARM'nin kullanılan matematiksel modeli ikinci derece kayma mod kontrolü (SOSMC) ile süper döndürme algoritma şeması kullanılmıştır. Önerilen kontrol yöntemle herhangi bir aşım olmadan hızlı dinamik tepki veren ve neredeyse sıfır kararlı hal hatası ile çalışan bir kontrol gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sadece simülasyon olarak gerçekleştirilmiştir.

(Wang, 2012) tarafından yapılan çalışmada ARM'nin mıknatıslama özelliklerini belirlemek için sargı akım ve rotor konumları otomatik olarak ölçüldüğü bir sistem geliştirilmiştir. Önerilen sistemde ARM'nin karakteristiği ve doğrusal olmayan manyetik ve statik demir kayıpları dikkate alınmıştır. Bu çalışmada grafik ara yüzü tasarlanmış ve ölçümler görüntülenmiştir. 4 fazlı ARM üzerinde teorik hassasiyetler elde edilmiş, hata kaynakları ve ölçüm belirsizlikleri de analiz edilerek iyi bir sonuç elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılarak sistemin doğruluğu ve uygulanabilirliği ispatlanmıştır.

(Hasanien ve Mueen, 2012) tarafından yapılan çalışmada adaptive YSA kontrolör kullanılarak değişken hızlı rüzgar türbünü tarafından sürülen şebekeye bağlı anahtarlama relüktans generatörünün hız kontrolü yapılmıştır.

(Vandana ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada torku artırmak amacıyla 5 fazlı Segmental tip bir ARM tasarlanmıştır. Torku daha da artırmak için ayrıca bipolar sürme stratejisi kullanılmıştır. Geleneksel tam köprü sürücü kullanılmıştır. Bipolar sürme yöntemi sonucunda daha yüksek tork çıkışı gerçekleştirilmiştir.

(Tomczewski ve Wrobel, 2012) tarafından yapılan çalışmada ARM için yeni bir güç sürücü devresi oluşturulmuştur. Sürme devresinin temel özelliği komütasyonun kısa zamanda yapılması, özellikle yüksek dönme hızı ile çalışma aralığında motorun ortalama torkunu artırır. Yeni sürücü ile yarım dalga köprü karşılaştırılmıştır. Uygulama mekaniki gücün 2 katına kadar sabit tork ile gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan yeni sürücüde sargıların paralel bağlanması tasarlanmıştır. Sargıların paralel bağlanmasında eğer bobinlerin parametreleri aynı değilse veya akım limitleri asimetrik ise paralel bağlı sargılar farklı akım değerlerine sebep olabilir, bu da manyetik çekme kuvvetinde dengesizlik oluşabilmesine neden olacağından tasarlanan sürücünün dezavantajı olarak görülmüştür. ARM'ler için kullanılan sürücülerin başlıca kayıplarını komütasyon kayıpları oluşturur. Bu yeni sürücüde bu kayıplar yüksek gerilimli uygulamalar için uygun değerdedir. Tasarlanan sürücünün alçak gerilimlerde iletim kayıpları dikkate alındığında diğer sürücülere oranla performansı kötüdür.

(Hasegawa ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada ARM'nin stator boyunduruğuna yardımcı sargılar ve kalıcı mıknatıs yerleştirilerek yeni bir ARM tasarlanmıştır. Asimetrik yarım köprü ile geleneksel ARM ve yeni tasarlanan ARM test edilmiştir. Yeni ARM'de mıknatıs ve yardımcı sargı sebebiyle performansının klasik ARM'ye göre geliştirildiği görülmüştür.

(Chen ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada sabit ısı transferi altında güç sürücülerinin termal modeli önerilmiştir. Modelleme sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda soğutucu geometri optimizasyonu da gerçekleştirilmiştir.

(Takeno ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada Hibrit elektrikli araçlar için 50 kW'lık ARM dizayn edilmiştir (Toyota Prius 2003). Tasarlanan ARM, sabit mıknatıslı senkron motorla karşılaştırılmıştır. Tasarlanan yeni ARM'nin veriminin %95 olduğu, hedeflenen torka da %85 oranında ulaşıldığı görülmüştür.

(Torkaman ve Afjei, 2013) tarafından yapılan çalışmada anahtarlamalı relüktans motor çalışmazken arıza teşhisi için bir yöntem oluşturulmuştur. Motor sargılarına uygulanan yüksek frekanslı tanımlama darbelerinden kaynaklanan diferansiyel akımların işlenmesi ile hata tanımlanmıştır. Deneysel sonuçlar ve 3D sonlu elemanlar yöntemiyle uygulanmış ve arızalı fazın tespiti gerçekleştirilmiştir.

(Chen ve Lu, 2013) tarafından yapılan çalışmada güç transistörlerinin 4 tip arızası olduğu açıklanmıştır. Bu arızalardan 2 tanesi için online arıza teşhisi yöntemi

önerilmiştir. Belirli konumlarda gerçek zamanlı akım durumu tespit edilmiş ve daha sonra mantıksal yargı kullanılarak hata durumu belirlenmiştir.

(Sholahuddin ve ark., 2013) tarafından yapılan çalışmada ARM sürücüler yüksek hız, geniş bir aralık içinde sabit güç yeteneği, sağlamlık ve hata toleransı gerektiren otomotiv uygulamaları üzerine yapılan araştırmalarda yoğun ilgi gördüğü ifade edilmiştir. Bu çalışmada COMSOL yazılımı kullanılarak ARM'nin modellenmesine ve simülasyonuna odaklanılmıştır. ARM'nin iki boyutlu sonlu eleman modelleri geliştirilmiş ve kurulmuştur. Elde edilen sonuçlar ARM torkunun ve akısının doğru analizi için kurulan modellerin uygun olduğunu göstermiştir. Basit yapısı, kontrolcü için gerekli elektroniklerin maliyetinin düşük olmasından dolayı, 6/4 ARM yapısı seçilmiştir. Geliştirilen modelin prototip testi için bir ARM tasarlamak ve oluşturmak için kullanılacağı ifade edilmiştir.

(Syed ve Abido, 2013) tarafından yapılan çalışmada, kalıcı mıknatıslı dc motor hız regülasyon sisteminin denetleyici optimizasyonu için diferansiyel gelişim algoritması tasarlanmıştır. Bu algoritma denetleyici parametrelerini sistem üzerinde optimize etmek için uygulanmıştır. Optimal denetleyici performansı simülasyonlarla incelenerek algoritmanın performansı ve sağlamlığı analiz edilmiştir. Tork dalgalanması üzerine herhangi bir analiz yapılmamıştır.

(Vishal ve ark., 2014) tarafından yapılan çalışmada, dc motorun hız kontrolü için 4 farklı optimizasyon algoritması üzerinde durulmuştur. Bunlar genetik algoritma, hızlandırılmış parçacık sürü optimizasyonu, diferansiyel gelişim ve guguk arama olarak sıralanmıştır. Matlab'da yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlara göre guguk arama algoritması kullanıldığında elde edilen performansın, diğer 3 algoritmadan daha iyi sonuç ortaya koyduğu ifade edilmiştir.

(Piña ve Xu, 2014) tarafından yapılan çalışmada, değişken hız uygulamalarında kullanılacak 55kW'lık bir asenkron motor tasarlamak amacıyla diferansiyel gelişim tabanlı yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Son tasarım performansı sonlu eleman yöntemi ile doğrulanmıştır. Dolaylı alan yönlendirmeli akım kontrol yöntemine ilişkin simülasyonlar sayesinde farklı hız ve yük koşullarındaki davranışları doğrulanmıştır. Hem sınırlamalar hem de maliyet fonksiyonları uygun olarak tanımlanarak tork yoğunluğunun maksimum değerlere ulaştığı, memnuniyet verici geometriler elde edilmiştir. Bunun bir sonucu olarak diferansiyel gelişim tabanlı algoritma, önde gelen

asenكرون motor geometrisinin kapasitesine sahiptir. Öyle ki motor, değişken gerilim ve frekansla kontrol edildiğinde beklenen davranış sergilemiştir.

(Makino ve ark., 2015) tarafından yapılan çalışmada ARM'de tork dalgalanma azaltması için kontrol stratejisi üzerine bir çalışma sunulmuştur. Bu çalışma, anlık akım profili oluşturma tekniğinin ARM'deki tork dalgalanmasını bastırmak için en etkin çözümlerden biri olduğunu ortaya çıkarmıştır. Önerilen kontrol, ideal referans akım profili üretmekten oluşmaktadır. Gerçek akımın kumanda edilenlerden birini doğru olarak takip ettiği varsayılarak, tork titreşimlerinin tork-rotor pozisyon-akım karakteristiği ve mıknatıslanma eğrilerinin modellerinde kullanılan parametrelere kuvvetli olarak bağı olduğu, 12/8 kutuplu 3 fazlı ARM kullanılarak analitik incelemelere dayalı deneysel çalışmalar ve iki boyutlu sonlu eleman analiziyle doğrulanmıştır.

(Sanches ve Santisteban, 2015) tarafından yapılan çalışmada tork üzerine karşılıklı endüktansın katkısını dikkate alan, tek statorlu, 6/4 eksenel akılı bir ARM'nin performansı değerlendirilmiştir. Karşılıklı ve öz endüktansı tahmin etmek için, sonlu eleman metoduna dayalı bir hesaplama yaklaşımı kullanılmıştır. Radyal akı ARM'nin geleneksel modellerden farkı olarak, kontrol stratejisi eş zamanlı olarak enerjilenmiş iki fazı dikkate aldığında, eksenel akılı ARM'nin performansına karşılıklı endüktansın önemli derecede etkisinin olduğu görülmüştür.

(Malagoli ve Camacho, 2015) tarafından yapılan çalışmada, sincap kafesli asenكرون motor statorunun optimize edilmiş otomatik tasarımı için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Burada amaç stator malzemelerinin maliyetini ve hacmini azaltarak, diferansiyel gelişim algoritması sayesinde Gmsh yazılımında otomatik olarak tasarlamak üzere bir algoritma geliştirmektir. Bilindiği üzere stator motorun bir parçası olup ana fonksiyonu manyetik alanı üretmektir. Dolayısıyla bu çalışma elektrik motorunun üretim maliyetiyle ilişkilidir. Bunu çözmek için çok amaçlı optimize diferansiyel gelişim algoritması kullanılmıştır. Ardından baskın olmayan sınıflamalı genetik algoritma II ile kıyaslanarak önerilen tasarım yaklaşımının sınırlamaları ve avantajları tartışılmıştır.

(Saha ve ark., 2015) tarafından yapılan çalışmada, sürme esnasında motor görüntü sinyallerini çözmek için yeni bir özellik seçimi ve bulanık-sinir sınıflandırma şeması sunulmuştur. Temel bileşen analizi ile kıyaslandığında bulanık-tekrarlayan sinir ağı sınıflandırıcısı, önerilen diferansiyel gelişim seçim tekniği kullanılarak daha iyi

performans göstermiştir. Ayrıca % 95.647'lik en yüksek sınıflandırma doğruluğunu sağlamıştır. Sahte sınıflandırma oranı/yanlış sınıflandırma oranı, önerilen diferansiyel gelişim özellik seçim algoritması yerine temel bileşen analizi kullanıldığında çok daha yüksek bulunmuştur.

(Fan ve ark., 2015) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlar için kendinden yavaşlamalı, kalıcı mıknatıslı, teker içi motor teknolojisi önerilmiş ve çalışma prensibi kısaca tanıtılmıştır. Ardından motor boyutuna ilişkin parametreler diferansiyel gelişim algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Son olarak motor performanslarının daha iyi ortaya konulabilmesi için motor kayıpları ve termal dağılımı etraflıca incelenmiştir.

(Viswanathan ve Thathan, 2015) tarafından yapılan çalışmada, sinir ağı denetleyici kullanılarak sürülen bir ARM'de tork dalgalılığını minimize etmek için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşım, doğrusal olmayan koşullar altında bile daha iyi hız regülasyonu ve azaltılmış tork dalgalılığı ile sonuçlanan tork ve akı yanıtının geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Akıllı kontrol, motor torku ve hız tepkisi üzerinde yüksek kontrol sağlar, aşmanın yanı sıra yükselme süresini de azaltır. YSA tabanlı doğrudan tork kontrolü MATLAB / SIMULINK ile simüle edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde; ARM'deki tork dalgalılığı minimize edildiği zaman akı ve tork yanıtının geleneksel PWM kontrolden üstün olduğu, hızın yerleşme zamanının ise nispeten minimum olduğu görülmüştür.

ARM'nin doğru ve hassas bir modeli makine performansını da beraberinde getirir. İki katlı çıkıntılı yapısı nedeniyle model oldukça doğrusal olmayan ve karmaşıktır. (Kumar ve Jayakumar, 2016) tarafından yapılan çalışmada, ARM'nin tork parametreleri için parametrik olmayan geri çekilme modeli geliştirilmiştir. Bu işlemde öğrenme tabanlı çekirdek kavramını uygulayarak en küçük kare destek vektör makinesi (LSSVM) kullanılmıştır. LSSVM'nin hiper parametreleri modelin doğruluğunu ve genelleme yeteneğini geliştirir. Hiper parametrelerin optimal değerleri diferansiyel gelişim kullanılarak elde edilmiş ve yüksek doğruluk gözlenmiştir. Geri çekilme (regresyon) modeli iki boyutlu sonlu eleman yöntemleri sayesinde ARM'nin manyetik karakteristikleri kullanılarak geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu gibi diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılmıştır.

(Patil ve ark., 2016) tarafından yapılan çalışmada, yüksek hızlı ve yüksek güçlü ARM sürücüleri için iki farklı sürücü topolojisi önerilmiştir. Bunlardan birincisi beş

seviyeli asimetrik nötr noktası sabitlenmiş sürücü, diğeri ise asimetrik modüler çok seviyeli sürücüdür. Çok yüksek hızlarda zıt emk çok yüksek düzeylere çıkar. Bu nedenle giriş gerilimi, akımı sargıya zorlamak için zıt emk'dan daha büyük olmalıdır. Çok seviyeli sürücü geniş bir yüksek hız aralığı boyunca, değişken giriş gerilimi uygulayabilir. Ayrıca, yüksek frekans tork dalgalanmasını azaltmak için birden fazla DC gerilim seviyesi ile kolayca faz akımını şekillendirebilir. Önerilen sürücünün çalışması Matlab/Simulink kullanılarak doğrulanmış ve tork dalgalanması ile verimlilik açısından performans kıyaslaması değerlendirilmiştir. 15000 d/dk için elde edilen simülasyon sonuçlarında tork dalgalanması kıyaslandığında nötr noktalıdaki dalgalanma 820Nm olurken diğerinde bu değer 980Nm olarak ölçülmüştür. İlave olarak sürücü performansı, farklı DC bara gerilimi seviyeleri için araştırılmış ve verimlilik üzerindeki etkisi incelenmiştir.

(Muthulakshmi ve Dhanasekaran, 2016a) tarafından yapılan çalışmada, yeni bir ARM sürücüsü tanıtılmıştır. Bu topolojide geleneksel sürücülere ilave olarak bir yükseltme kondansatörü ve iki diyot bulunmaktadır. Yükseltme kondansatörü sargılara yüksek mıknatıslanma ve manyetikliği yok etme gerilimi verir. Tork dalgalanması oldukça fazla olup akım izleme etkisi asimetrik sürücüler için çok iyi değildir. Önerilen sürücü mıknatıslanma süresi boyunca daha hızlı bir uyarım akımı, manyetikliği yok etme süresince de hızlı bir manyetikliği yok etme akımı sağlamaktadır.

(Muthulakshmi ve Dhanasekaran, 2016b) tarafından yapılan çalışmada, ARM hızının kontrolü için bulanık mantık denetleyici kullanan bir sürücü tanıtılmış ve bu sürücü devresinin çalışma modları tartışılmıştır. Hızlı uyarım ve manyetikliğin yok edilmesi nedeniyle, önerilen sürücü devresinin geleneksel sürücülere kıyasla tork dalgalanmasını oldukça azalttığı vurgulanmıştır. Ancak bu kıyaslamaya ilişkin sayısal bir veriye rastlanmamıştır.

(Pratapgiri, 2016) tarafından yapılan çalışmada torktaki dalgalanmanın doğrudan anlık tork kontrolü isimli gelişmiş bir teknikle azaltılabileceği ifade edilmiştir. Geleneksel histerisiz akım kontrol ve doğrudan anlık tork kontrol teknikleri torktaki dalgalanma açısından kıyaslanmıştır. İki kontrol yöntemine ait Matlab/Simulink'de yapılan benzetim sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan doğrudan anlık tork kontrol tekniği ile yapılan kontroldeki tork dalgalanmasının histerisiz kontrole kıyasla %80 daha az olduğu ifade edilmiştir.

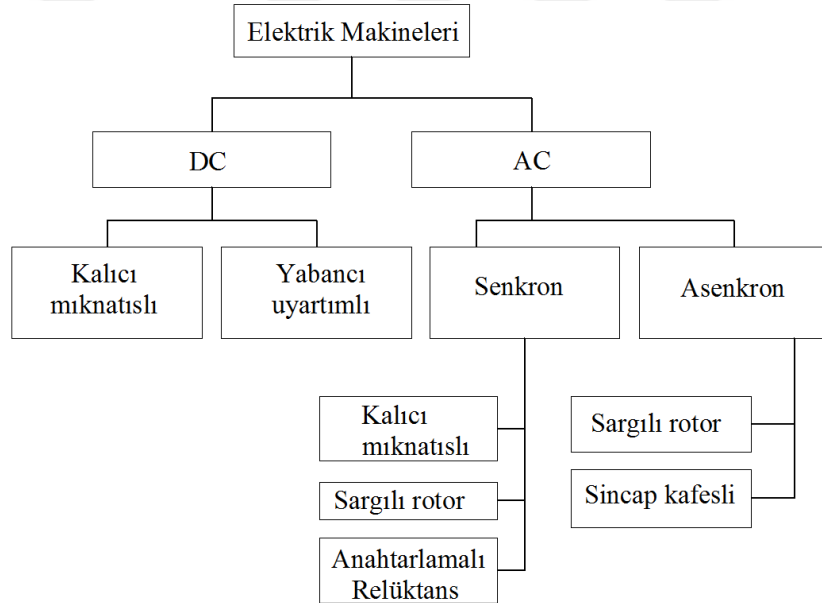
(Prasad ve Ram, 2016) tarafından yapılan çalışmada, ARM'lerdeki tork dalgalılığını minimize etmek için arı kolonisi tabanlı optimize edilmiş PID denetleyici geliştirilmiştir. Bu denetleyicilerden birisi hız hatasının diğeri ise akım hatasının regülasyonu için kullanılmıştır. Önerilen kontrol algoritması yüksek tork dalgalanmasını minimize etmek için komütasyon açılarını optimize etmektedir. Doğru kazanç ve açıların ayarlanması için çok amaçlı fonksiyonlar geliştirilmiştir. Önerilen algoritmanın etkinliğini görmek için Matlab/Simulink'de simülasyon yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına bakılarak bu yöntemin kullanılması sayesinde tork dalgalanmasının azaltılabileceği vurgulanmış, ancak ne kadar azaltıldığı veya azaltılabileceği sayısal bir veriyle sunulmamıştır.

(Congkun ve ark., 2016) tarafından yapılan çalışmada, ARM'de hız kontrolünün etkisi analiz edilerek bulanık kesir dereceli PID algoritması simüle edilmiştir. Geleneksel PID denetleyici algoritması ile kesirli PID algoritması kıyaslandığında hız kalitesinin oldukça geliştiği, daha hızlı bir ayarlama süresi, daha küçük aşma, daha küçük tork dalgalanması olduğu belirtilmiştir. Simülasyon sonuçlarına dayandırılarak bulanık kesir dereceli kontrol algoritmasında tork dalgalanma katsayısının daha küçük olduğu, değişimin ise 29.0477 Nm olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte geleneksel PID algoritma varyansının 38.8742 Nm, kesirli PID algoritma varyansının 32.4876 Nm olduğu ifade edilmiştir.

(Namazi ve ark., 2016) tarafından yapılan çalışmada, 4 fazlı 4kW'lık 8/6 bir ARM'nin hız kontrolü için adaptif bir kayan kipli denetim geliştirilmiştir. Sistem; yapılandırılmış belirsizlikler, bilinmeyen parametreler ve dış etkenlerden kaynaklı karmaşıklıklar altında iken denetleyicinin zorlamasıyla tork dalgalanmasını minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla yapılan simülasyon çalışmalarında 200 d/dk'lık bir referans hızda öncelikle 10 Nm'lik bir yük motor yüklenmiş, ardından yük değeri 15 Nm'ye çıkartılmıştır. Bu noktada motorun yükteki artışa rağmen referans hızı çok kısa bir sürede tekrar takip etmeye devam ettiği vurgulanmış ancak her iki yük değeri için torktaki dalgalanmaya dair herhangi bir sayısal veri sunulmamıştır.

3. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLAR

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makinelerine elektrik motoru adı verilir. Faraday, 1822 yılında “içerisinden akım geçen bir iletken manyetik alan dışına itilir” prensibini bularak elektrik makinelerinin temelini oluşturmuştur. Bu prensipten yararlanarak 1824 yılında Barlov, Barlov tekerleği olarak bilinen ilk elektrik motorunu yapmıştır. Barlov’un ürettiği ilk elektrik makinesinden günümüze kadar teknolojik gelişmelere paralel olarak elektrik makinelerinde çok büyük gelişmeler gerçekleştirilmiştir. Elektrik makineleri temel olarak Şekil 3.1’de görüldüğü gibi DC ve AC elektrik makineleri olmak üzere temel olarak 2 gruba ayrılabilir.



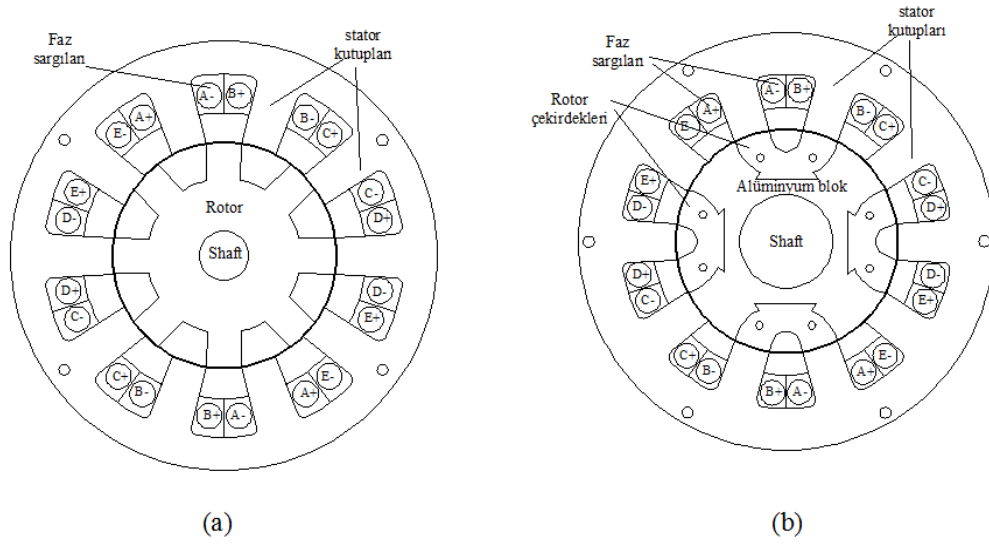
Şekil 3.1. Elektrik makinelerinin sınıflandırılması(Guzzella ve Sciarretta, 2013)

Bu tez çalışmasında kullanılan Anahtarlamaalı Relüktans Motorlar Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, AC elektrik makineleri grubu içerisindeki senkron makineler grubunda yer almaktadır. ARM’lerin stator ve rotorları çıkık kutuplu bir yapıya sahiptir. ARM’lerin statorlarındaki sargılar DC makinelerin sargılarına benzerlik gösterirken, rotorlarında herhangi bir sargı ve mıknatıs bulunmamaktadır. ARM’lerin bu özellikleri dikkate alındığında diğer elektrik makinelerinden ayrılmakta ve çalışma prensipleri de bu açıdan diğer makinelere göre değişiklik göstermektedir.

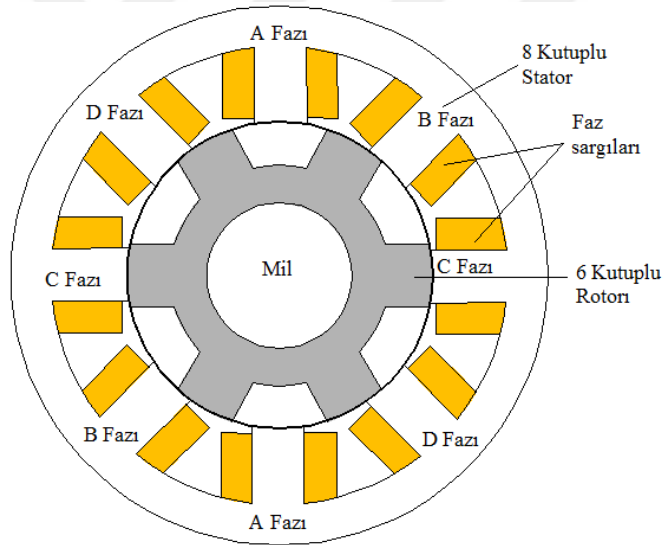
Elektrik makineleri ayrıca tork üretim mekanizmalarına göre genel olarak elektromanyetik ve değişen relüktans olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir (Mutlu Ü., 2006). Elektromanyetik olarak tork üretiminin olduğu elektrik makinelerinde, hareket stator ve rotor tarafından oluşturulan iki manyetik alanın etkileşimi prensibine göre manyetik torku oluşturmaktadır. DC, indüksiyon ve daimi mıknatıslı motorlar bu prensiple çalışmaktadır. Değişken relüktans ile tork üretimi yapan makinelerde, hareket, rotor ve stator arasındaki hava aralığındaki değişken relüktansın sonucu olarak üretilir. Relüktans, manyetik devrede akıya karşı gösterilen zorluk olarak tanımlanabilir. Bu durumda bir stator sargısına enerji verildiği zaman, bu enerji tek bir manyetik alan üreterek, rotoru minimum relüktans konumuna hareket ettirecektir. Dolayısıyla ARM'lerde mekanik enerji relüktans kuvveti ile gerçekleşmektedir. Relüktans kuvveti döndürme momentini oluşturmakta ve rotor kutbunun stator kutbuna göre konumu izlenerek faz sargılarının sırasıyla uyarılması ile sürekli döndürme momenti sağlanmaktadır (Diril O., 1999). Anahtarlama Relüktans Motorlar tork üretimi bakımından da değişken relüktanslı elektrik makineleri grubunda yer almaktadır.

3.1. Anahtarlama Relüktans Motorun Yapısı ve Temel Özellikleri

Değişken relüktanslı özel elektrik makinelerinden olan ARM'ler dayanıklı ve basit bir yapıya sahiptirler. ARM'ler senkron ve asenkron makinelerin yapısından faydalanılarak tasarlanmışlardır (Gücüyetmez M., 2005). ARM'ler yapı olarak stator ve rotor olmak üzere 2 ana parçadan oluşmaktadır. Statorunda elektriksel olarak birbirlerine bağlı olmayan her bir kutup için ayrı ayrı basit sargılar bulunmaktadır ve bu sargılara dışardan Doğru Akım (DA) uygulanır. Bundan dolayı ARM'ler yapı olarak adım motorlarına benzemektedirler. Bir faz sargısı stator sargılarının karşılıklı olarak birbirleriyle seri bağlanması ile elde edilir. Bundan dolayı ARM'lerde motorun faz sayısı stator kutup sayısının yarısı olarak ifade edilir (Bizkevelci E., 2008). ARM'lerin rotorları ise çıkıntılı kutuplardan yapılırlar. Rotor yapılarında herhangi bir sargı ve mıknatıs bulunmamaktadır. ARM'lerin rotorları tek parça klasik yapıda ya da segmental (parçalı) tipli yapıda tasarlanmaktadır (Uygun D., 2012). Şekil 3.2'de klasik ve segmental tip ARM'nin kesitleri görülmektedir (Uygun D., 2012). ARM'lerde stator ve rotor gövdeleri demir kayıplarını azaltmak için ince lamine sac paketlerinden oluşmaktadır.



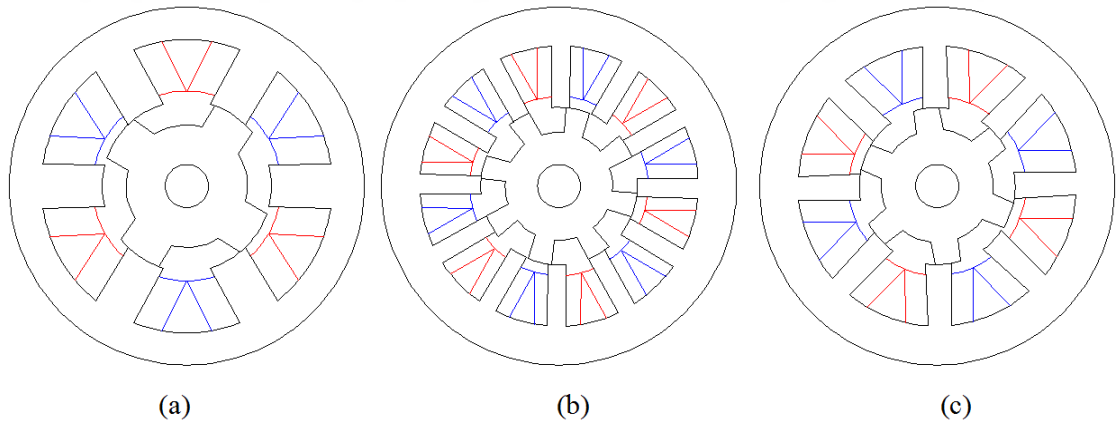
Şekil 3.2. Klasik (a) ve Segmental Tip (b) ARM kesitleri



Şekil 3.3. ARM'nin bölümleri (Uygun D., 2012)

ARM'lerin özellikleri belirlenirken stator ve rotor kutup sayıları ile ifade edilirler. Stator ve rotor kutup sayıları daima çift sayı olarak ifade edilirler. Şekil 3.3'de 8/6 yapıdaki bir ARM'ye ait kesit ve ARM'nin bölümleri görülmektedir. ARM'ler tasarlanırken genellikle stator kutup sayısı rotor kutup sayısından daha fazla olarak tasarlanırlar. ARM'lerde faz sayısı arttıkça moment salınımlarında azalmalar gözlenir. Faz sayısının artması sürücü devresinde kullanılan malzeme sayısında artışa neden olacaktır. Uygulamalarda yüksek hıza ihtiyaç duyulduğunda stator kutup sayısı rotor kutup sayısından yüksek seçilirken, sistemler yüksek momente ihtiyaç duyduğunda

rotor kutup sayısı stator kutup sayısına mümkün olduğunca yakın seçilmektedir. ARM'ler tasarım olarak bir fazlı (2/2, 4/4 6/6, 8/8 gibi), iki fazlı (4/2, 8/4, 4/6, 8/6 gibi), üç fazlı (6/4, 6/8, 12/8, 18/12, 24/16 gibi), olarak tasarlanabilirler (Durak ve ark.). Burada birinci sayı stator kutup sayısını ikinci sayı ise rotor kutup sayısını ifade etmektedir. ARM'nin tipi stator sayısı/ rotor sayısı şeklinde ifade edilmektedir. ARM'lerin kendi kendine kalkınabilmeleri için en az iki fazlı tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca ARM'nin kalkınabilmesi için mutlaka stator ile rotor kutup sayılarının birbirinden farklı olması gerekmektedir. ARM'nin tek fazlı 2/2 ve iki fazlı 4/2, 8/4, 4/6, 8/6 dizilim yapısına sahip olanlar teorikte düşünülebilir olmasına karşın yeterli kalkınma torkunu en iyi konumda dahi üretmek mümkün olmadığından pratikte hiçbir anlam ifade etmemektedir (Güvenç U., 2005). ARM'ler dönüş yönü değiştirilmesi gereken uygulamalarda kullanılacak olursa, motorun en az 3 fazlı olması gerekmektedir. Örneğin 8/6, 8 stator kutup sayısını ve 6 rotor kutup sayısına sahip bir ARM'yi temsil ederken, 6/4, 6 stator kutup sayısına ve 4 rotor kutup sayısına sahip bir ARM'yi temsil etmektedir. Şekil 3.4'de çok yaygın olarak kullanılan ARM'lerin tasarımları görülmektedir (Civelek B., 2012).



Şekil 3.4. En yaygın kullanılan ARM tasarımları
(a) 6/4 ARM (b) 12/8 ARM (c) 8/6 ARM

Günümüzde üretim maliyeti düşük, performansı yüksek ve kolay denetlenebilen ARM'lerin kullanımı ön plana çıkmaktadır. ARM'lerin basit ve dayanıklı yapısı, ucuz maliyeti, düşük ataleti, yüksek hızı ve verimi ile günümüzde kullanımı giderek artmaya başlamıştır. ARM'lerin günümüzde önem kazanmasına neden olan avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Statorunda sargılar bulunması,

- Rotorunun sadece laminasyon çeliğinden üretilmiş olması ve herhangi bir sargı veya mıknatıs bulunmaması,
- Rotorlarında sargı ve fırça bulunmamasından dolayı çok yüksek hızlarda çalıştırılabilmesi ve bakıma çok az ihtiyaç duymaları,
- Stator ve rotorun basit yapılarından dolayı diğer motorlardan daha kolay ve ucuz üretililebilmeleri,
- Stator sargılarının kontrolünün her bir sargı için seri bağlı ayrı güç anahtarları ile yapılmasından dolayı motorun kısa devre tehlikesinin bulunmaması ve fazlardan birinde bir arıza meydana geldiğinde motorun diğer fazlarla çalışmaya devam edebilmesi (hata toleranslarının yüksek olması),
- Sadece statorunda sargıların bulunması nedeniyle ısının yoğunluğunun bu alanlarda oluşması, sadece stator yüzeyinin soğutulmasının gerekmesi,
- Özel elektrik makinelerinden aynı güçteki kalıcı mıknatıslı motorlara göre boyutlarının küçük olması ve hafif olmaları,
- Eylemsizlik momentinin düşük, kalkış momentinin yüksek olması,

ARM'lerin yukarıda bahsedilen birçok avantajlarına rağmen, kullanım alanlarını sınırlayan çok önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- ARM'nin kontrol devresinde uygun fazların enerjilendirilebilmesi için motorun rotor konumunun bilinmesi ya da tahmin edilmesi gerekmektedir. Rotor konumunun belirlenmesi için pozisyon sensörlerine (hall effect sensör, encoder v.b.) ya da sezgisel algoritmalar ile konum tahminine ihtiyaç duyulması,
- ARM'lerin çalışabilmesi için sürücüye ihtiyaç duymaları,
- ARM'lerin çalışmasında fazların sırayla enerjilendirilmesinden dolayı motorun torkunda meydana gelen salınımlar ya da çökmelerin fazla olması,
- Torkta meydana gelen salınımların akustik gürültüye sebep olması,

Anahtarlama Relüktans Motorların bu dezavantajlarından en önemlisi torklarında meydana gelen dalgalanmalardır. Bugüne kadar yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda bu problem, motorun fiziksel yapısı, sürme devresi ya da kontrol devresi üzerinden çözülmeye çalışılmıştır.

ARM'lerin avantaj ve dezavantajları açısından diğer motorlarla karşılaştırılması Çizelge 3.1'de verilmiştir (Emire A., 2010). ARM'lerin diğer motorlara göre en büyük dezavantajının sürücüye ihtiyaç duyması ve sürücü maliyeti olduğu Tablo 3.1'de görülmektedir.

Çizelge 3.1. ARM'lerin farklı motorlarla karşılaştırılması

	Asenkron Motor	Senkron Motor	DA Motor	Fırçasız DAM	Adım Motoru	ARM
Besleme Şekli	Alternatif Gerilim	Alternatif Gerilim	Doğru Gerilim	Doğru Gerilim	Doğru Gerilim	Doğru Gerilim
Uyarma Durumu	Uyarma Gerekmez	Doğru Gerilimde Uyarma	Doğru Gerilimde Uyarma	Uyarma Gerekmez	Uyarma Gerekmez	Uyarma Gerekmez
Sürtücü	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Daima Gerekir	Daima Gerekir	Daima Gerekir
İşletme ve Bakım Masraf	Yok Denebilir	Kısmen Bakım Gerekir	Bakım Gerekir	Yok Denebilir	Yok Denebilir	Yok Denebilir
Motor Maliyet	Ucuz	Pahalı	Pahalı	Pahalı	Orta	Ucuz
Sürtücü Maliyeti	Pahalı	Pahalı	Orta	Pahalı	Orta	Pahalı
Verim	Orta	Orta	Orta	İyi	Orta	İyi
Çalışma Ortamı	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır	Patlayıcı Ortamlarda Kullanılmaz	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır
Stabilite	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi

3.2. Anahtarlama Relüktans Motorun Çalışma Prensibi

Günümüzde ARM'ler üzerinde en çok çalışma yapılan elektrik makinelerinden birisi konumundadır. Bunun en önemli sebebi diğer motorlara nazaran önemli avantajlara sahip olmalarıdır. ARM'lerin çalışma prensibi değişken relüktans kuvvetine dayanmaktadır.

3.2.1. Değişken relüktans

Relüktans, elektrik devresindeki rezistansın manyetik devredeki karşılığı şeklinde düşünülebilir. Bir manyetik devrede relüktans, rotor ve stator arasındaki hava aralığının manyetik direncidir. Elektrik devresinde rezistans elektrik akımına karşı zorluk gösterirken, manyetik devredeki relüktans manyetik akının dolaşımına zorluk

gösterir. Ancak relüktans manyetik devre içerisinde sürekli değişkendir ve her pozisyonda aynı değerde değildir.

ARM'lerde rotor konumuna göre halkalanma akılarının izlediği yol değişmekte ve bu da manyetik devredeki relüktansın değişimine neden olmaktadır. Herhangi bir manyetik devrenin relüktans ifadesi Denklem 3.1 ile verilebilir.

$$\mathfrak{R} = \frac{F}{\phi} = \frac{H l}{BS} = \frac{l}{\mu S} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1 ifadesinde yer alan $\mathfrak{R}$ gösterimi relüktansı, F magneto motor kuvvetini (mmk), ϕ akıyı, H hava aralığındaki manyetik alan şiddetini, l manyetik yolun uzunluğunu, B akı yoğunluğunu, S manyetik yolun kesit alanını ve μ ise manyetik malzemenin manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.

ARM'de özellikle l , μ ve S parametreleri rotorun açısal değişimi ile birlikte manyetik devre relüktansının değişimine neden olmaktadır. Öyle ki stator ve rotor kutupları karşılıklı pozisyona gelmeden önceki ortalananmış pozisyonda manyetik geçirgenlik değeri μ , boş uzayın geçirgenliği olan μ_0 değerine eşittir ve bu değer de malzemenin geçirgenliği ile karşılaştırıldığında çok küçük bir değerde olmaktadır. Dolayısıyla ortalananmış konumda relüktans değeri maksimum değerini almaktadır. Ancak rotor ve stator kutuplarının karşılıklı pozisyon konumuna yaklaşmaları durumunda artan örtüşüm alanıyla birlikte geçirgenlik değeri de hızlı bir şekilde artacak ve dolayısıyla relüktans değeri azalacaktır. Rotor ve stator kutupları tamamen karşılıklı konuma geldiklerinde ise örtüşüm alanı maksimum olacak ve dolayısıyla da manyetik geçirgenlik maksimum değerine ulaşacaktır. Bir başka deyişle manyetik devrenin relüktansı minimum değerini alacaktır (Emire A., 2010).

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

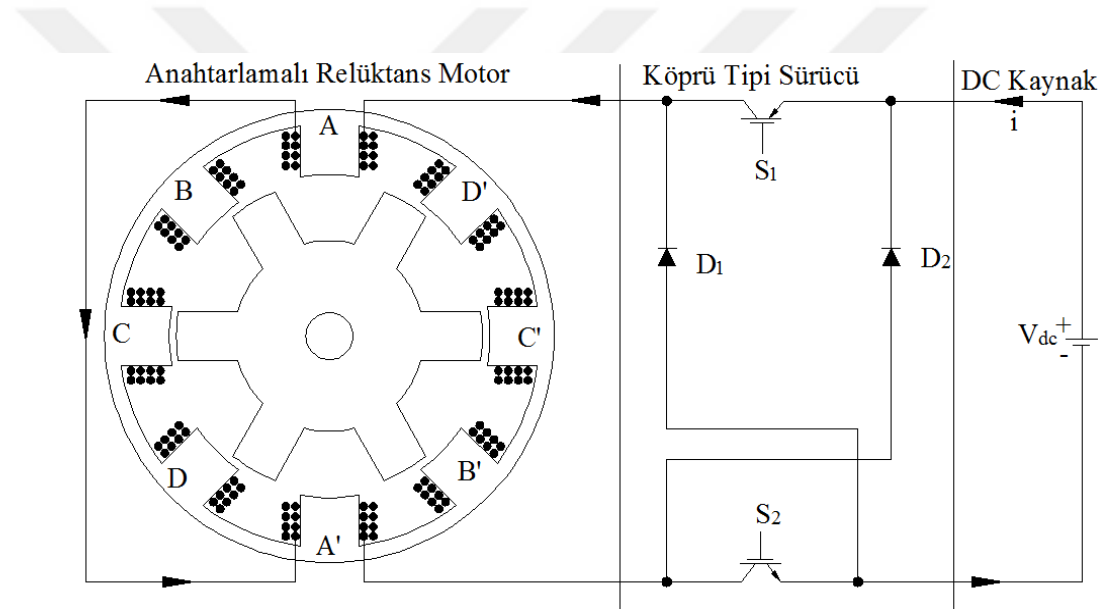
Genellikle ARM'lerde relüktans yerine daha çok kullanılan kriter endüktans değeri olup bu iki değer arasındaki ilişki Denklem 3.2' deki gibi ifade edilebilir

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de λ halkalanma akısı değerini, i faz akımını ve N ise faza ilişkin sarım sayısını göstermektedir.

3.2.2. ARM motorun çalışması

ARM çalışma prensibini anlatmak amacıyla Şekil 3.5’de 8/6 kutuplu bir ARM ve bir faz için köprü tipi sürücü şeması gösterilmiştir (Güvenç U., 2005).

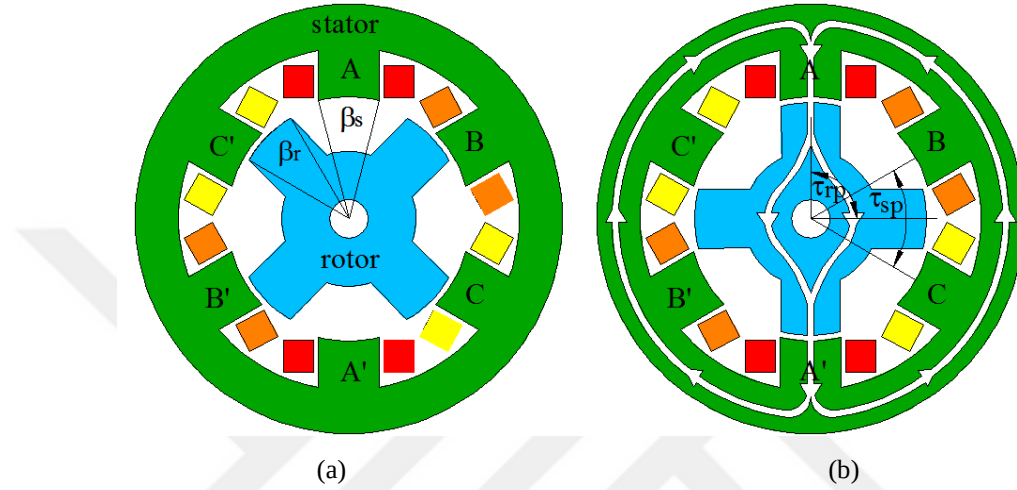


Şekil 3.5. ARM bir faz için uyarım devresi

Şekil 3.5’de görüldüğü gibi A-A’, B-B’, C-C’ ve D-D’ stator kutup sargıları karşılıklı birbirine seri bağlanarak fazları oluşturmaktadır. S_1 ve S_2 anahtarları tetiklendiğinde stator fazlarından akım geçerek enerjili olan faz en yakın olan çıkıntılı rotor kutuplarını kendisine çekecektir. Bu durumda stator ve rotor arasındaki hava aralığında meydana gelecek manyetik alan ile rotorda bir elektromanyetik kuvvet oluşacaktır.

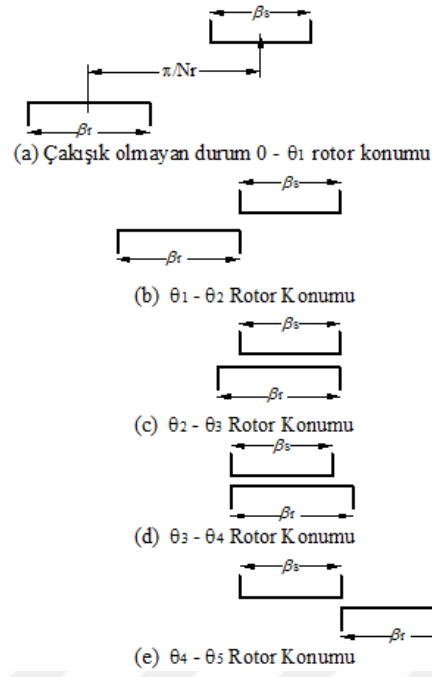
Böylece stator-rotor manyetik yolunun manyetik direnci (relüktans) en aza indirilmiş olmaktadır. Bu pozisyon, en büyük endüktans en küçük relüktans pozisyonudur. Stator ve rotorun bu konumuna hizalı konum denir. Manyetik direncin maksimum olduğu konuma ise ayırık konum denir. Şekil 3.6’da 6/4 kutuplu bir ARM

için kutupların ayırık ve hizalı durumları görülmektedir. Şekil 3.6'da A fazına göre düşünüldüğünde Şekil 3.6 (a)'da ayırık konumu, A fazı enerjilendirildiğinde A fazına en yakın çıkıntılı rotor faza doğru hareket ederek Şekil 3.6 (b) hizalı konumu oluşturmaktadır. Şekil 3.6'da görülen β_r rotor kutup açısını, β_s ise stator kutup açısını ifade etmektedir (De Doncker ve ark., 2010).

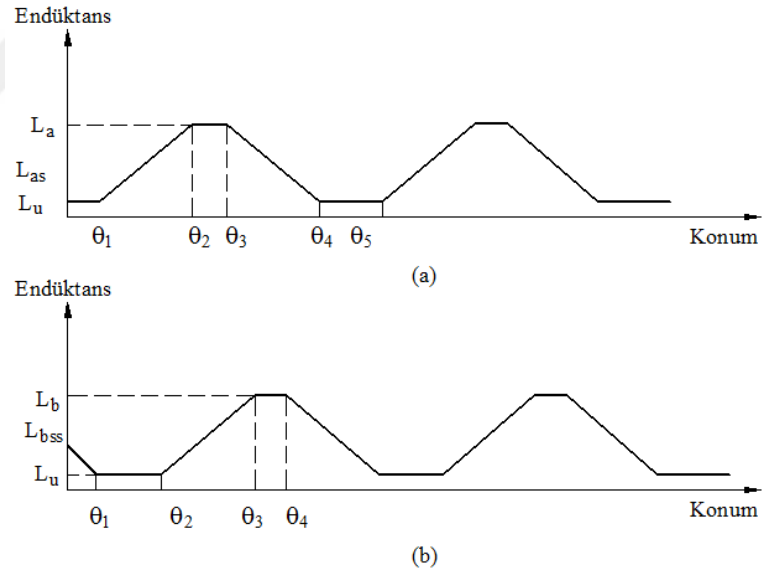


Şekil 3.6. ARM'de kutupların ayırık(a) ve hizalı(b) durumları

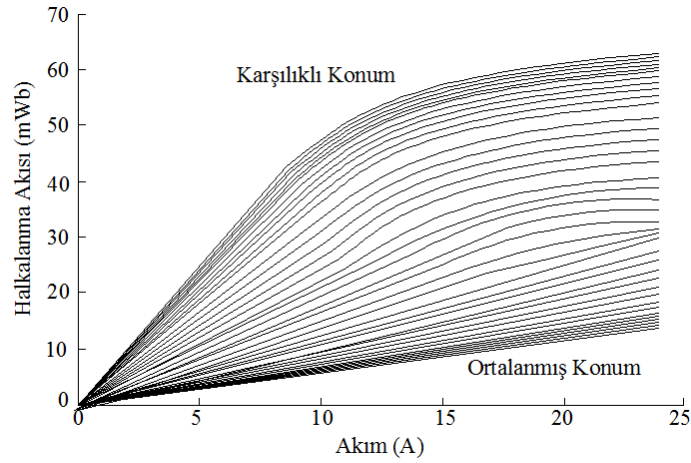
Şekil 3.7'de rotorun farklı hareketleri gösterilmiştir. ARM Şekil 3.7'de 0 konumundan başlayarak θ_5 'e kadar 5 konumda hareket ettirilmiştir. Burada Rotorun hareketi sonucunda Şekil 3.8'de iki faza ait değişen endüktans eğrileri görülmektedir. Şekil 3.8'den de görüldüğü gibi rotorun konumuna göre endüktans değerleri değişmektedir. Bundan dolayı bu motorların çalıştırılmasında ve modellenmesinde endüktans değişimi en önemli özelliklerden birisidir (Ahmad, 2010). Endüktanstaki değişime bağlı olarak motora ait akım ve halkalanma akıları arasındaki doğrusal olmayan ilişki Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Şekil 3.9'da verilen endüktans değişimi doyumsuz durum içindir. Normal çalışmada ise motorun doğrusal olmayan yapısından dolayı doğrusal olmayan bir endüktans değişimi gözlenecektir.



Şekil 3.7. Farklı konumlarda rotorun hareket ettirilmesi

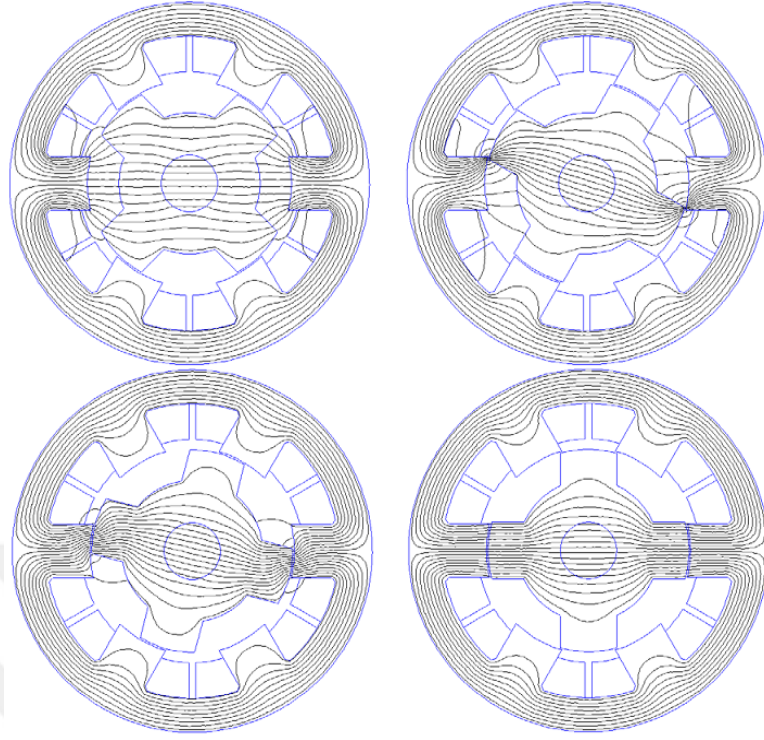


Şekil 3.8. Rotorun farklı konumlarda hareket ettirilmesi sonucunda değişen endüktans eğrileri (Emire A., 2010)

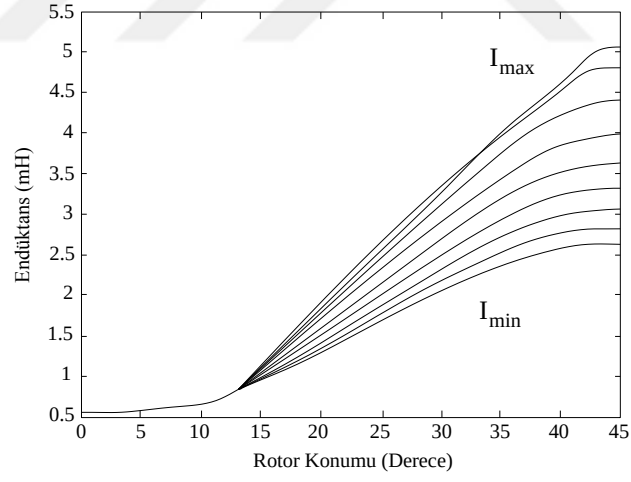


Şekil 3.9. Akım ve halkalanma akısı arasındaki doğrusal olmayan ilişki (Emire A., 2010)

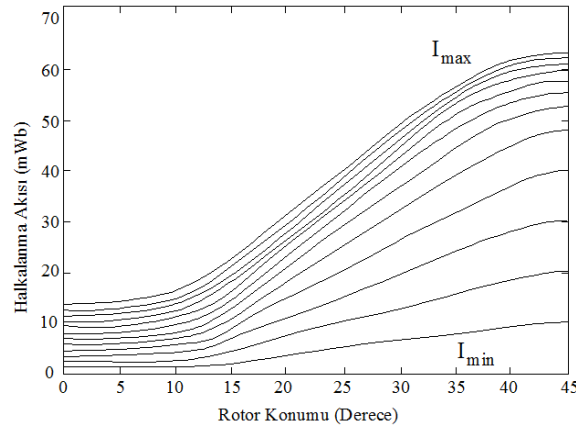
ARM çalışma prensibinin relüktans kuvveti ile olduğu ve rotorun bulunduğu manyetik devre içerisindeki akının, en kolay yolu izleyerek en küçük relüktans konumuna kadar çekilmesiyle gerçekleştiği Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere 15’er derecelik aralıklarla verilmiş olan ve ortalanmış konumdan karşılıklı konuma kadar olan rotor konumu pozisyonlarında halkalanma akıları bulabildikleri en kolay yol üzerinden dönüşlerini tamamlamakta ve oluşan kuvvet ile rotoru da dönüş yönleri doğrultusunda döndürmektedirler. Dolayısıyla bu esnada relüktans değişimi maksimum değerden minimum değere doğru giderken, endüktans değişimi bunun tersi olarak minimum değerden maksimuma doğru gerçekleşmektedir. Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de çeşitli rotor konumlarında değişik akım değerlerinde elde edilen endüktans ve halkalanma akısı değerlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 3.10. Çeşitli Konumlar için Halkalanma Akılarının Durumları (Emire A., 2010)



Şekil 3.11. Çeşitli Akım değerlerinde rotor konumuna göre elde edilen endüktans değişimi (Emire A., 2010)

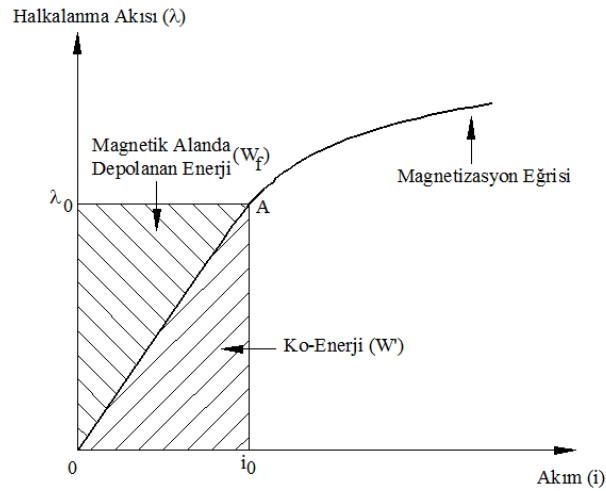


Şekil 3.12. Çeşitli akım değerlerinde rotor konumuna göre elde edilen halkalanma akılarının değişimi (Emire A., 2010)

3.2.3. ARM'ler de Enerji Dönüşümü ve Tork Üretimi

ARM'lerin normal çalışmaları esnasında relüktansın rotor konumu ve doyum sebebi ile değişiminden dolayı statora ait faz sargıları tarafından üretilen manyetik alanın basit bir matematiksel eşitliği yoktur. Dolayısı ile ARM'lere ait enerji dönüşümü, genel enerji dönüşümü vasıtasıyla incelenecektir (Miller, 1993).

Şekil 3.13'de karşılıklı ve ortalananmış konum arasındaki herhangi bir rotor açısında kilitlenmiş olan ARM' ye ait manyetizasyon eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Manyetizasyon Eğrisi ve Enerji İlişkisi

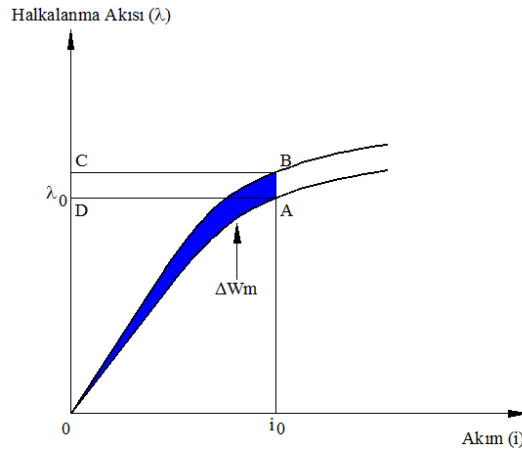
Şekil 3.12'den de açıkça görüleceği üzere manyetizasyon eğrisi üzerindeki herhangi bir A noktası için depolanan manyetik alan enerji ve ko-enerji ifadeleri sırasıyla Denklem 3.3 ve Denklem 3.4'deki gibi yazılabilir:

$$W_f = \int_0^{\lambda_0} i \, d\lambda(\theta, i) \quad (3.3)$$

$$W' = \int_0^{i_0} i \, d\lambda(\theta, i) \, di \quad (3.4)$$

Eğer rotor serbest bırakılırsa karşılıklı pozisyona doğru hareket etmeye başlayacaktır. $\Delta\theta$ kadarlık bir rotor pozisyonu değişiminde faz akımının sabit tutulduğu varsayılırsa akı yörüngesi Şekil 3.14'den de gösterildiği üzere A noktasından B noktasına kayacaktır.

Bakır ve çekirdek kayıpları ihmal edilecek olursa, enerjinin korunumu prensibi sebebiyle rotorun $\Delta\theta$ kadarlık konum değişimi esnasında alan enerjisinde meydana gelen değişim Şekil 3.14'den de görüleceği üzere Denklem 3.5'deki ΔW_m mekanik işine eşit olacaktır.



Şekil 3.14. Alan Enerjisi, Ko-Enerji ve Mekanik İş

$$\Delta W_m = \Delta W' = \int_0^{i_0} \lambda(\theta_B, i) \, di - \int_0^{i_0} \lambda(\theta_A, i) \, di \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'den mekanik iş Denklem 3.6 gibi ifade edilebilir.

$$\Delta W_m = T(\Delta\theta) \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'dan ani tork ifadesi çekilecek olursa Denklem 3.7'deki tork ifadesi elde edilir.

$$T = \frac{\Delta W_m}{\Delta\theta} = \frac{\int_0^{i_0} \lambda(\theta_B, i) di - \int_0^{i_0} \lambda(\theta_A, i) di}{\Delta\theta} \quad (3.7)$$

Herhangi bir i akımı için $0 \rightarrow \Delta\theta$ ile limit alınacak olursa ARM'ye ait anlık tork Denklem 3.8'deki gibi elde edilir.

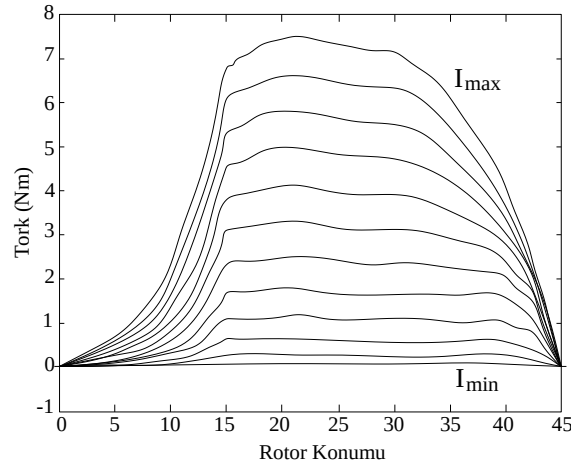
$$T = \frac{\partial}{\partial\theta} \int_0^i \lambda(\theta, i') di' \quad (3.8)$$

Doğrusal akı modeli için $\lambda(\theta, i) = L(\theta)i$ yazılabileceğinden Denklem 3.9 elde edilir.

$$T = \int_0^i \frac{\partial \lambda(\theta, i')}{\partial\theta} di' = \int_0^i \frac{dL}{d\theta} i' di' = \frac{dL}{d\theta} \int_0^i i' di' = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9, ARM'ye ait torkun faz akımının yönünden bağımsız, ancak rotor konumuna göre motora ait endüktans ($\frac{dL}{d\theta}$) değişiminin yönüne bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Denklem 3.9'dan da görüleceği üzere motor tarafından üretilen tork değeri o andaki akım değerine, rotorun konumuna ve endüktans değişimine bağlı olduğundan tork değişimi de Şekil 3.15'de gösterildiği gibi olacaktır.



Şekil 3.15. Çeşitli Akım değerlerinde rotor konumuna göre elde edilen tork değişimi (Emire A., 2010)

Denklem 3.9'dan şu sonuçlar çıkarılabilir (Bal, 2011):

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

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

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

4. Endüktans eğrisinin negatif kısmında akımın değişimi ile negatif tork üretimi mümkündür (Şekil 3.16).

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

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

7. Tork ve hız kontrolü sürücü kontrolü ile yapılabilir.

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

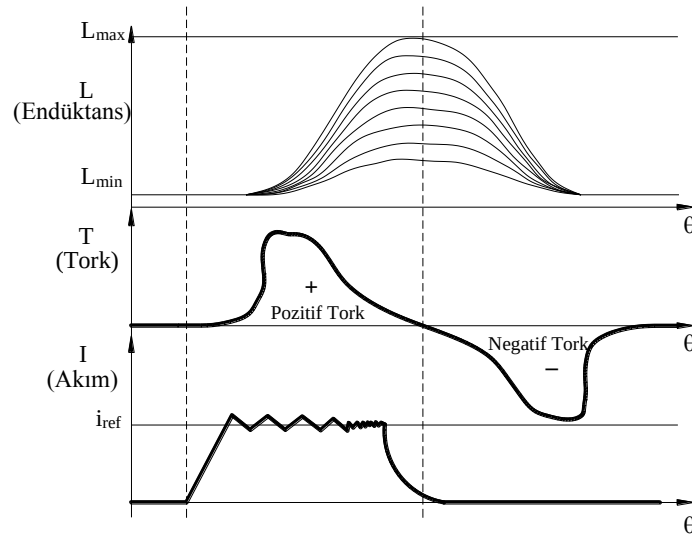
9. Çalışması için sürücü devreye bağımlı olmasından dolayı, motorun sürücüsü kendi yapısından gelen değişken hızlı sürücü sistemine sahiptir.

10. ARM'de makine faz sarımları arasında çok küçük bir ortak endüktans vardır ve neredeyse tüm pratik uygulamalarda bu etki ihmal edilmektedir. Ortak kuplaj olmamasından dolayı, her bir faz diğer fazlardan elektriksel olarak bağımsızdır. Bu özellik sadece anahtarlama relüktans motorlara has bir özelliktir. Bu özellik sayesinde herhangi bir fazdaki kısa devre hatasından diğer fazlar etkilenmez. Bir fazda oluşabilecek hatalardan diğer fazların etkilenmemesi özelliği, özellikle havacılık uygulamaları, soğutucu pompaları ve elektrik cihazlarında önemlidir.

ARM'lerde stator fazlarının sıralı olarak enerjilendirilmesi ile her iki yönde sabit ortalama tork üretmek mümkün olmaktadır. Motorun stator yapısı simetrik çıkıntılara sahip olduğundan ve devrenin mıknatıslılığı manyetik akının yönünden bağımsız olduğundan, üretilen tork stator kutbundaki akımın yönünden bağımsız olmaktadır.

ARM'lerin döndürme momenti akımın genliğine bağlı olarak değişir, akımın yönü momentin değerini değiştirmez bundan dolayı sürücü devresindeki yarı iletken sayısı diğer sürücülerle karşılaştırıldığında daha azdır. Bunun yanında tork değeri endüktansın değişimine göre de değişmektedir. ARM'lerde akım, endüktansın artma yönünde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olurken, akımın endüktansı azaltma yönünde olması durumunda ise negatif olacaktır. Şekil 3.16'daki tork eğrisi bunu ifade etmektedir. ARM'de bir faz için, pozitif tork üretmesi için faz sargısından geçen akım, endüktans değişimi de Şekil 3.16'da gösterilmiştir (Güvenç U., 2005).

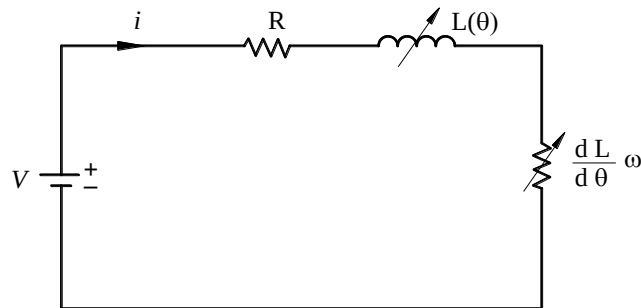
Tork, endüktansın maksimum olduğu noktaya kadar rotoru hareket ettirir. Nüvede artık mıknatısiyet yok ise akımın yönü önemli değildir. Rotorun yönü daima en yakın hizalı konuma doğru olur. Dolayısı ile pozitif tork, sadece rotor ayırık konum ile ileri yönde bir sonraki hizalı konum arasında iken üretilir. Diğer bir deyimle pozitif tork sadece yükselen endüktans bölgesinde üretilir (Güvenç U., 2005).



Şekil 3.16. Bir faz için endüktans, tork ve akım eğrileri

3.3. ARM'lerin Eşdeğer Devre Modeli ve Dinamik Denklemleri

ARM'ler değişken relüktans kuvvetine göre çalışan makinelerdir. Motorun çalışması, stator sargılarına enerji verildiğinde relüktans kuvvetinin etkisiyle çıkık kutuplu rotorun relüktansın en küçük olduğu yere kadar hareket etmesi ile gerçekleşir. Bundan dolayı ARM'lerin endüktansı rotorun konumuna göre değişkenlik göstermektedir. Ayrıca akımın değerinin de endüktans değerini etkilediği bilinmektedir. Endüktansın değişken olması ARM'lerin eşdeğer devresinin modellenmesini zorlaştırır. ARM'lerin faz sayısına göre eşdeğer devre sayıları değişir, fakat sadece bir faz için eşdeğer devrenin belirlenmesi yeterlidir. Bir faz için ARM'nin eşdeğer devresi Şekil 3.17'de verilmiştir (Polat K., 2010).



Şekil 3.17. ARM'nin bir faz eşdeğer devresi

Şekil 3.17'deki eşdeğer devreden ARM'de bir faz için gerilim Denklem 3.10'daki gibi ifade edilmektedir.

$$V = R.i + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} - M(\theta) \frac{di'}{dt} \quad (3.10)$$

Burada; V DA kaynak gerilimini, R stator sargı direncini, ψ manyetik akıyı, i faz akımını, $M(\theta)$ karşılıklı endüktansı, θ rotor pozisyon açısı, i' ise bir önceki uyarılan sargı akımını ifade etmektedir.

Doyum ihmal edildiğinde manyetik akı $\psi = L(\theta, i).i$ olduğundan Denklem 3.10'da yerine yazılacak olursa Denklem 3.11 elde edilir.

$$V = R.i + \frac{d(L(\theta, i).i)}{dt} - M(\theta) \frac{di'}{dt} \quad (3.11)$$

Burada, $L(\theta, i)$, faz endüktansını göstermektedir. Denklem 3.11'deki türevsel ifade faz endüktansı ve akıma göre ayrıştırıldığında Denklem 3.12 elde edilir.

$$V = R.i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} - M(\theta) \frac{di'}{dt} \quad (3.12)$$

Karşılıklı endüktans değeri minimum endüktans değerinden daha küçük olduğundan dolayı ihmal edilebilir. Karşılıklı endüktans değeri ihmal edildiğinde Denklem 3.12'deki ifade Denklem 3.13'deki gibi yazılabilir.

$$V = R.i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (3.13)$$

Denklem 3.12'deki türevsel ifadeler sırasıyla Denklem 3.13 ve Denklem 3.14'e eşittir. Bu denklemler motorun kararlı çalışma durumunda geçerli olan denklemlerdir.

$$\frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \omega \quad (3.14)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{di}{d\theta} \omega \quad (3.15)$$

Burada, ω , açısal hızdır. Denklem 3.14 ve Denklem 3.15'deki ifadeler Denklem 3.13'de yerine yazılacak olursa Denklem 3.16 elde edilir.

$$V = R.i + L(\theta, i) \frac{di}{d\theta} . \omega + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} . \omega \quad (3.16)$$

ARM'ler de giriş gücü Denklem 3.17'deki gibi ifade edilebilir.

$$P_i = V . i \quad (3.17)$$

Denklem 3.13'deki gerilim formülü Denklem 3.17'de yerine yazılırsa Denklem 3.18 elde edilir.

$$P_i = R i^2 + L(\theta, i) \frac{di}{dt} i + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'deki ifade Denklem 3.19'daki ifade ile düzenlediğinde Denklem 3.20 elde edilir.

$$\frac{di}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (3.19)$$

$$P_i = R i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (3.20)$$

Denklem 3.20'deki giriş gücü formülü, sargının kayıp gücü ($R i^2$), alan enerjisinin değişim oranı $\left(\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) \right)$ ve hava aralığı gücünün $\left(\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \right)$ toplamından oluşmaktadır.

Hava aralığındaki gücün ifadesinde zaman yerine Denklem 3.21'deki ifade yazılacak olursa Denklem 3.22 ve Denklem 3.23 elde edilir.

$$t = \frac{\theta}{\omega_m} \quad (3.21)$$

$$P_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3.22)$$

$$P_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m \quad (3.23)$$

Elektromanyetik tork, hava aralığındaki güç ve hızla bağıntılı olduğunda Denklem 3.24 ile ifade edilebilir.

$$P_{ag} = T_e \omega_m \quad (3.24)$$

Denklem 3.23'deki ifade Denklem 3.24'de yerine yazılırsa ve Denklem 3.25'deki tork ifadesi elde edilir (Krishnan, 2001).

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (3.25)$$

Eşdeğer devre kullanılarak elde edilen Denklem 3.25'deki tork denklemi ile enerji dönüşümü kullanılarak elde edilen Denklem 3.9'daki ifadelerin aynı olduğu görülmektedir.

Denklem 3.25'deki tork denklemi motorun ürettiği elektriksel torku ifade etmektedir. Bu değer motorun Denklem 3.26'daki ifade ile mekanik bir değer olan hıza dönüşür.

$$T_e = J \frac{d\theta^2}{d^2t} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (3.26)$$

Denklem 3.26'daki ifadesinden de rotor konumunun türevi alınır, açısal hıza bağlı tork ifadesi Denklem 3.27'deki gibi elde edilir.

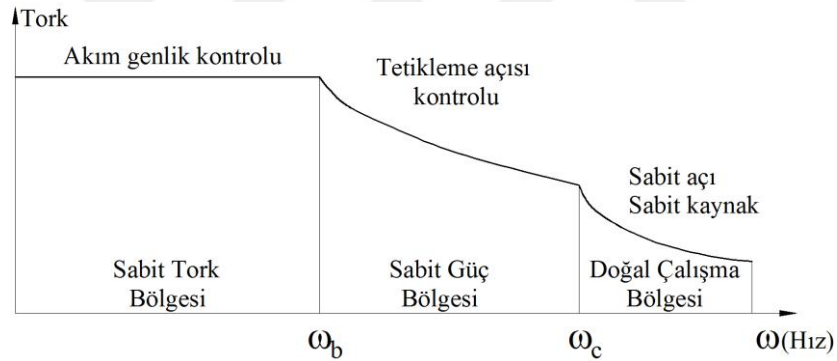
$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (3.27)$$

Denklem 3.27’de T_e motor torkunu, J toplam atalet moment katsayısını, B sürtünme katsayısını ve T_L ise yük torkunu ifade eder.

Bu denklemlerin doğrululuğu ARM’lerin endüktansının ne kadar doğru şekilde modellendiğine bağlıdır (Elmas, 1993).

3.4. ARM’de Tork-Hız Karakteristiği

ARM’lerin üretici firmaları, denetim şekline göre geniş oranda değişiklik gösteren tork-hız eğrilerinden dolayı motorların tork-hız eğrilerini belirlememişlerdir (Güvenç U., 2005). ARM’ler çalışma şartlarına göre Şekil 3.18’de de görüldüğü gibi motor hızı dikkate alındığında sabit tork bölgesi, sabit güç bölgesi ve doğal çalışma bölgesi olarak üç farklı bölgeye ayrılmaktadır.



Şekil 3.18. ARM’nin tork hız karakteristiği

Sabit Tork Bölgesinde, taban hız ω_b ’nin altındaki hızlar için, sürücü tetikleme açısı sabit bir değerde tutulmakta ve böylece motor torku en az dalgalanma ile en büyük değere çıkarılmaktadır. Motor faz akımları ayarlanarak motor ortalama torku denetlenmektedir. Motor stator fazları sıralı bir şekilde enerjilendirilmektedir ve böylece bir anda sadece bir faz aktif olmaktadır. İki fazın da geçici olarak aktif olduğu komütasyon periyotları bunun dışındadır. Tork denetimli çalışmada, aktif fazdaki akım bir akım regülatörü tarafından kontrol edilmektedir (Güvenç U., 2005).

Sabit Güç Bölgesi, taban hız ω_b ’nin üzerindeki hızlar için geçerlidir ve bu bölgede akım regülatörü etkili olmamaktadır. Çünkü bu çalışma bölgesinde zıt emk yükselmekte ve zorlama voltajı sabit akım sağlamak için yeterli olmamaktadır. Sürücü

tetikleme açısı, hızın bir fonksiyonu olarak artırılarak, motor hızı artırılabilmekte ve böylece $\omega.T$ değeri sabit hale getirilebilmektedir (Güvenç U., 2005).

Doğal Çalışma Bölgesinde, motor hızı ω_c hızından büyük olduğu zaman, sürücü tetikleme açısı en büyük değerine getirilebilmektedir. ARM böylece doğal tork-hız karakteristiği ile çalışabilmektedir. Yani $T.\omega^2$ değeri seri DA motordaki gibi yaklaşık sabit olmaktadır (Güvenç U., 2005).

3.5. ARM’lerde Kullanılan Sürücü Devrelerin Temel Özellikleri

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

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

ARM’lerde üretilen tork, akımın yönünden bağımsız olduğundan ARM sürücüleri, diğer motorlar için kullanılan sürücülere göre birtakım avantajlara sahiptir. Bunlardan birkaçı şu şekilde sıralanabilir:

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

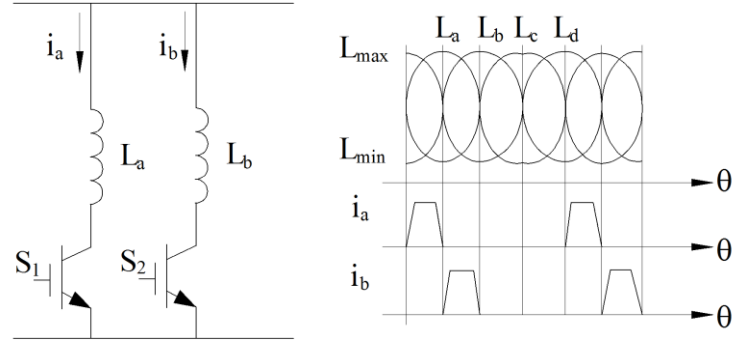
3.6. ARM' lerde Kullanılan Sürücü Devreler

ARM'ler sürücüsüz çalışmayan elektrik makinelerindendir. Bundan dolayı ARM'ler için en uygun sürücünün seçilmesi ve tasarlanması gerekir. ARM'lerde DA ile çalışan sürücü devresi kullanılacak olması, alternatif akım (AA) ile çalışan aynı sürücü devrelerine göre histerisiz kayıplarının azalması gibi bir takım avantajlar kazandırır. Bununla birlikte ARM sürücü devrelerinin tasarımında motor stator faz akımlarının komütasyonunda gerekli olan yüksek seviyeli enerjinin kontrolü ve motor stator faz akımlarının denetimindeki zorluk en önemli sorunları oluşturmaktadır. Bu sorunlar motor endüktanslarının yüksek olması ve bu değerlerin rotor pozisyonu ile geniş bir aralıkta değişmesinden kaynaklanmaktadır (Bay Ö. F., 1996).

İdeal durumda, düşük dalgalanmalı tork üretmek için sürücünün motor sargılarına kare dalga akım uygulanması gerekmektedir. Bu durum bir sargıdan diğerine hızlı bir komütasyonu gerektirmekte ve akımın iletim periyodu boyunca regüle edilmesini zorunlu kılmaktadır. Motor sargılarında depolanan enerji seviyesi yüksek olduğu zaman, komütasyon zamanını düşürmek için güç anahtarları üzerindeki gerilim baskısının artırılması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, yüksek değerli ve değişken endüktanstan dolayı motor sargılarındaki akımın regülasyonunda bazı problemler meydana gelmektedir. Akım regülatörünün yüksek hızlarda motor sargı endüktansındaki hızlı değişmeye cevap vermesi için yeteri kadar hızlı olması gerekmektedir. Aynı zamanda, sistem parametreleri değişken olduğu için sabit parametrelili denetleyiciler uygun olmayabilmektedir. Bu yüzden motor faz akımlarının kontrolü bir adaptif denetleyiciyi gerektirmektedir (Güvenç U., 2005).

3.7. ARM'de Komütasyon İşlemi

ARM'de bir sargıdan diğerine komütasyon işlemi, depo edilmiş ve boşaltılması gereken yüksek seviye enerjili bir akım komütasyonudur. Şekil 3.19'da A fazından B fazına komütasyon işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.19. ARM'de komütasyon işlemi ve dalga şekilleri

Pozitif tork üretmek için, A sargısı fazı, endüktansının yükselmeye başladığı zaman enerjilendirilmektedir. S_1 anahtarı θ_{on} konumunda ilettime geçirilmekte ve θ_{off} konumunda kesime götürülmektedir. Bu anda, S_2 anahtarı B sargısına enerji sağlamak için ilettime geçirilmektedir. θ_{off} anında S_1 anahtarı kesime getirildiği zaman, A sargısındaki faz akımı i_0 ve endüktansı ise L_{max} ya da L_{max} 'a yakın olmaktadır. A sargısında depo edilen enerji Denklem 3.29'daki gibi olmaktadır.

$$W = \frac{1}{2} L_{max} i_0^2 \quad (3.29)$$

Negatif tork üretmekten kaçınmak için akım düşme zamanını azaltmak gerekmektedir. Bunun içinde depo edilen bu enerjinin hızlı bir şekilde boşaltılması veya yok edilmesi gerekmektedir. Bu işlem için birçok çözüm şekli önerilmekte olup, bunlar üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Gücüyetmez M., 2005).

- Pozitif toparlama: Depolanmış enerji bir direnç veya zener diyotta yok edilmektedir (Güvenç U., 2005).
- Aktif toparlama: C-dump devresinde olduğu gibi depolanmış enerji güç kaynağına geri döndürülmekte veya yüksek gerilim kaynağı devresinde saklanmaktadır (Güvenç U., 2005).
- Depolanmış enerji geçici olarak bir kapasitörde saklanmakta ve takip eden faz sargısına gönderilmektedir (Güvenç U., 2005).
- Akım beslemeli sürücüde, depolanmış enerji komütasyon kondansatöründe saklanmaktadır (Güvenç U., 2005).

3.8. ARM için sürücü devreleri ve özellikleri

ARM’lerde kullanılacak sürücüler iki temel özelliği karşılamalıdır.

1. ARM’de her faz diğerinden bağımsız olarak iletme geçmelidir.
2. ARM motor olarak çalışırken, generatör çalışma bölgesine geçmemelidir.

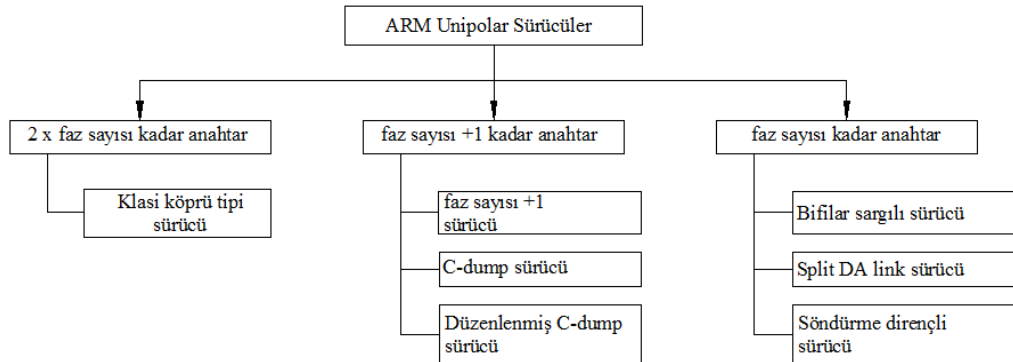
Bunların yanı sıra ARM’nin toplam performansını arttırmak için kullanılacak olan sürücü ek olarak aşağıdaki özellikleri de sağlamalıdır.

- Fazlardan biri tamamen kesime gitmeden diğer faz iletime geçirilmeli
- Sürücü, kesime götürülen faz sargısında depo edilen enerjiyi kaynağa ya da iletime geçirilecek bir sonraki faza aktarabilmeli
- Komütasyon süresini kısa tutabilmeli
- Kısıyıcı olarak çalışma esnasında anahtarlama serbest dolaşım sağlayabilmelidir.

ARM’lerin kontrolünde kullanılan sürücü devreler, faz sargılarından tek yönlü akımın geçirildiği (unipolar) sürücüler ve iki yönlü akımın geçirildiği (bipolar) sürücüler olarak gruplandırılabilir.

3.8.1. Unipolar (Tek yönlü akım sağlayan) sürücüler

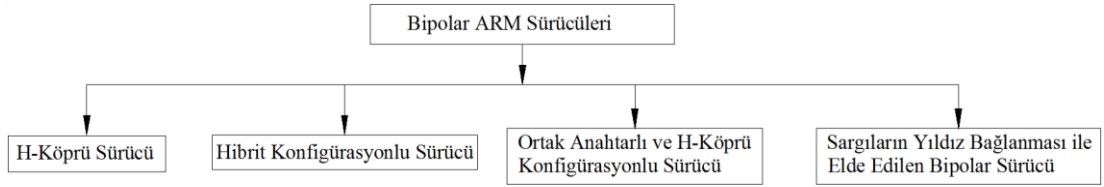
Bu sürücüler, ARM’lerin faz sargılarından sadece tek yönde akım geçirilen sürücülerdir. ARM’ler için kullanılan bu sürücü devreler, genelde ARM’nin sahip olduğu faz sayısına karşılık içerdikleri anahtarlama elemanları ve serbest diyot elemanlarının sayılarına göre çeşitli topolojilere ayrılmaktadır. ARM’lerde kullanılan sürücü devreleri kullanılan anahtar sayısına göre Şekil 3.20’de görüldüğü gibi sınıflandırılabilir (Yiğit T., 2005). Bu tez çalışmasında unipolar sürücüler kullanılmadığı için burada sadece isimleri verilmiştir.



Şekil 3.20. ARM’lerde kullanılan unipolar sürücülerin anahtar sayısına göre sınıflandırılması

3.8.2. Bipolar (Çift yönlü akım sağlayan) sürücüler

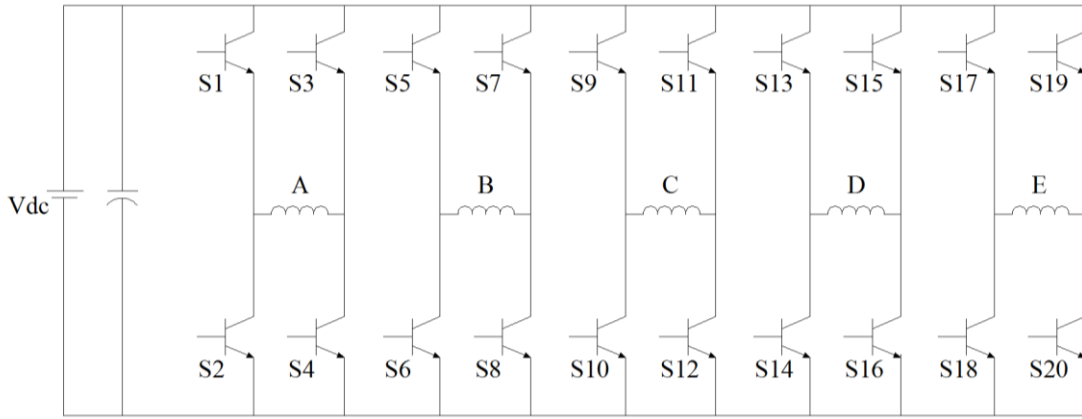
ARM tasarımındaki ve bunun yanında sürücü teknolojisindeki gelişmelerin ışığında yapılan çalışmalar; ARM'lerin tek yönlü akım sağlayan sürücüler kullanılarak çalıştırılması yerine bitişik iki fazın kısa akı yolları oluşturacak şekilde uyarılması temeline dayanan bipolar sürme tekniği ile daha verimli çalışabileceğini ortaya koymuştur (Uygun D., 2012). Bundan dolayı bu tez çalışmasında bipolar sürücü devresi kullanılmıştır. Şekil 3.21'de görüldüğü gibi bipolar sürücüler 4 çeşitle sınıflandırılabilirler.



Şekil 3.21. Bipolar sürücülerin sınıflandırılması

H-Köprü Bipolar Sürücü Topolojisi

H-köprü sürücü devreleri bir sargıdan iki yönlü akım geçirilmesi gereken uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan sürücü topolojisidir. H-köprünün en basit devre şeması Şekil 3.22'de görülmektedir. Şekil 3.22'de 5 fazlı bir ARM için basit H-köprü devresi verilmiştir. Bu devrede görüldüğü gibi bir fazın akımını kontrol etmek için 4 adet güç anahtarına ihtiyaç vardır dolayısıyla burada 20 adet güç anahtarı kullanılmıştır. Bipolar sürücü devreleri içerisinde en fazla güç anahtarı kullanılması gereken devre H-köprü devresidir. Faz sayısının 4 katı kadar güç anahtarına ihtiyaç duymaktadırlar. Örneğin 3 fazlı bir ARM için 12 adet, 4 fazlı bir ARM için ise 16 adet güç anahtarı kullanılması gerekir. Güç anahtarının fazla kullanılması bir dezavantaj olarak görünse de H-köprü sürücü devreleri sistemlerin çalışmasında maksimum esnekliğe ve farklı sürme tekniklerine imkan vermesi gibi avantajlarından dolayı en çok kullanılan bipolar sürücülerdir.

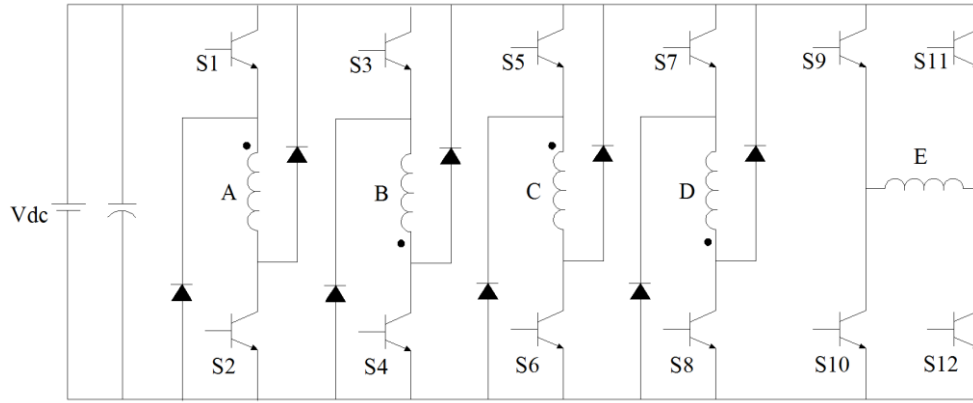


Şekil 3.22. H-köprü bipolar sürücü topolojisi

H-köprü ile çalışan bir devrede fazların herhangi birinde güç anhatarı ya da bobinden kaynaklı bir hata oluşsa bile diğer fazlar bağımsız olarak kontrol edilebildiği için hatalar izole edilebilir. Bu hata tolerans topolojisi özelliği ile otomobil ve asansör uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilirler.

Hibrit Konfigürasyonlu (Asimetrik ve H-Köprü) Bipolar Sürücü Topolojisi

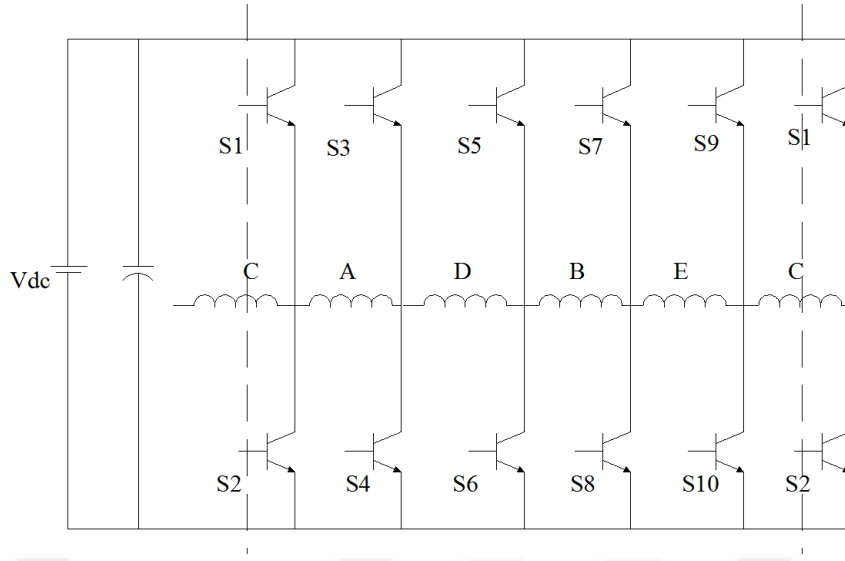
Bir sargıdan iki yönlü akım geçmesini sağlamak için kullanılan hibrit konfigürasyonlu (asimetrik ve H-köprü) bipolar sürücü devresinin ARM'nin sargı yönleri değiştirilerek kısa akı yolları oluşturacak şekilde konfigüre edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.23'de asimetrik köprü konvertör ile H-köprü sürücünün bir kombinasyonunun 5 fazlı bir ARM için devresi görülmektedir. Şekil 3.23'de ARM'nin ilk dört fazının sargı yönleri değiştirilerek konfigüre edilmiştir ve beşinci faz sargısı (E fazı) dört anahtar ile kontrol edilmektedir. Burada ilk 4 faz asimetrik sürücü devresine benzediği, beşinci faz ise H-köprü devresi olduğundan dolayı bu devre hibrit olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.23. Asimetrik köprü ile H-köprü sürücünün kombinasyonu

Ortak Anahtarlı ve H-Köprü Konfigürasyonlu Sürücü Topolojisi

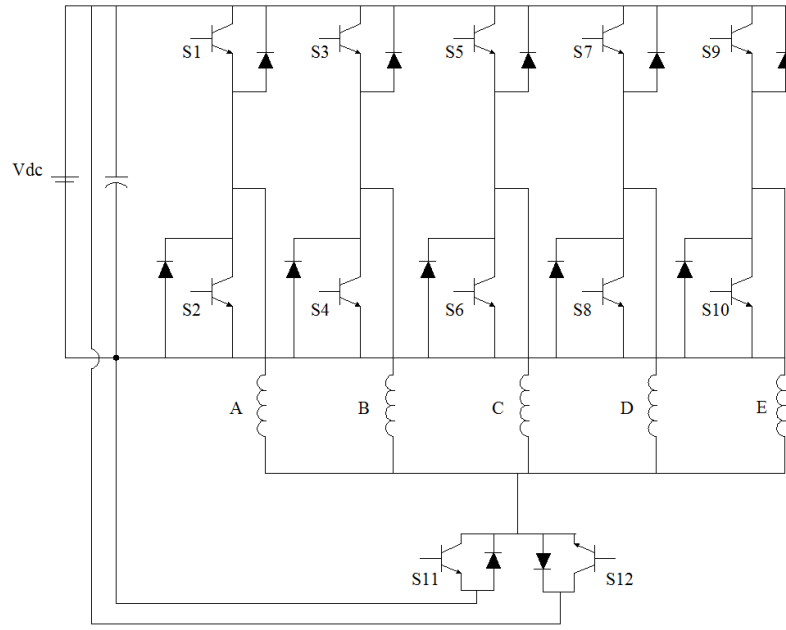
H-köprü sürücü devresi en esnek kontrol edilebilme özelliğine sahip devre olmakla birlikte en fazla güç anahtarı kullanılan devredir. Bunun üzerine H-köprü gibi çalışan fakat güç anahtar sayısının azaltılması üzerine yapılan çalışmalar sonucunda ortak anahtarlı-H-köprü konfigürasyonlu sürücü topolojisi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sürücü H-köprü gibi esnek bir özelliğe sahip değildir. Şekil 3.24’de 5 fazlı bir ARM için ortak anahtarlı-H-köprü konfigürasyonlu sürücü devresi görülmektedir. Şekil 3.24’den de görüldüğü gibi H-köprüyü oluşturan güç anahtarlarıyla sadece bir fazın kontrolü değil, iki fazın birden kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bundan dolayı bu sürücüdeki güç anahtar sayısı H-köprü sürücüsüne göre yarı yarıya düşmüştür. Ayrıca bu devrede ARM’nin çalışması için gerekli olan faz sırasına göre bir bağlantı yapılması gerekmektedir. Bu da sürücülerin kontrol esnekliğini ortadan kaldırmaktadır. Sürücü çalıştırıldığında Şekil 3.24’den de görüldüğü gibi aynı anda S1, S4, S6 ve S7 anahtarlarının kapatıldığı düşünülürse, akım A ve B fazlarından geçecektir. Bu durumda D fazının her iki düğüm noktasının potansiyellerinin birbirine eşit olacaktır, dolayısı ile üzerinden herhangi bir akım geçişi olmayacaktır. Benzer olarak B-E ve C-A arası potansiyeller de birbirine eşit olduğundan E ve C fazlarından da akım geçişi olmayacaktır.



Şekil 3.24. Ortak anahtarlı ve H-köprü konfigürasyonlu sürücü

Sargıların Yıldız Bağlanması ile elde edilen bipolar sürücü devresi

En yeni bipolar sürücü topolojisi olarak göze çarpmaktadır (Bieńkowski ve ark.). Sürücünün kullanılabilmesi için kendi içerisinde faz sayısına bağlı olarak seri olarak bağlanmış olan motor sargılarının diğer sargı grupları ile mutlak suretle yıldız (star) bağlanması gerekmektedir. Bundan dolayı bu sürücü devresine sargıların yıldız bağlanması ile elde edilen bipolar sürücü devresi adı verilir. Bu sürücüye ait devre Şekil 3.25’de verilmiştir. Sargıların yıldız bağlanmasına ek olarak yeni topolojide iki adet ek güç anahtarı bulunmaktadır. Bu anahtarlar; tüm fazların akımlarının toplamı sıfıra eşit olmadığı sürece sürekli ilettime girip çıkarlar. Topolojide 5 faz için toplam 12 güç anahtarı kullanılmıştır. Kısaca bu topoloji için fazlara göre kullanılabilir anahtar sayısı $(2q+2)$ olarak ifade edilebilir.



Şekil 3.25. Sargıları yıldız bağlı ARM'lerde kullanılan bipolar sürücü topolojisi

3.9. Sürücü Devrelerin Avantaj ve Dezavantajları

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

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

Sayılan bu avantajları yanında, ARM çeviricilerinin sahip olduğu dezavantajların başında her bir anahtar elemanı için ayrı bir serbest geri dönüşüm diyotuna gereksinim duyulması yer almaktadır. Bu durum tüm çevirici topolojileri için

geçerlidir ve dolayısıyla da bu durum çeviricilere ait maliyeti artırmaktadır (Güvenç U., 2005; Uygun D., 2012).

3.10. ARM'lerin Uygulama Alanları

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

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

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

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

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

güçlerine sahip sürücüler sunmaktadır. Her iki sürücü de on iki adet stator ve sekiz adet rotor kutup sayısına sahiptir.

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

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

- Tıbbi Uygulamalarda Santrifüj: Beckman Instruments şirketi 30000 dev/dak hıza ulaşabilen, 2.5kW'lık altı adet stator ve dört adet rotor kutbuna sahip bir santrifüj sürücü sistemi satışa sunmuştur.
- Uzay Uygulamaları: ARM'ler hava cihazları için oldukça uygundurlar. Motor haricinde bu alanda jeneratör olarak da kullanılabilirler. Örneğin ARM'ler jet motorları çalıştırıldıktan sonra jeneratör olarak devreye alındıklarında hava cihazına elektriksel bir geri dönüşüm sağlarlar ve 27000 ile 50000 devir arasında işletilebilirler. Bunun yanında yine uzay çalışmalarında gaz tribünü motoru olarak da kullanılabilirler (Güvenç U., 2005; Uygun D., 2012).

Örneklerden de anlaşılacağı gibi sahip oldukları avantajlardan dolayı anahtarlamalı relüktans motorların kullanım alanları oldukça geniştir. Henüz endüstride her alanda uygulama alanı bulamamış olsalar da birtakım problemler ortadan kaldırıldığında gelecekte birçok alanda kullanılacağı bir gerçektir.

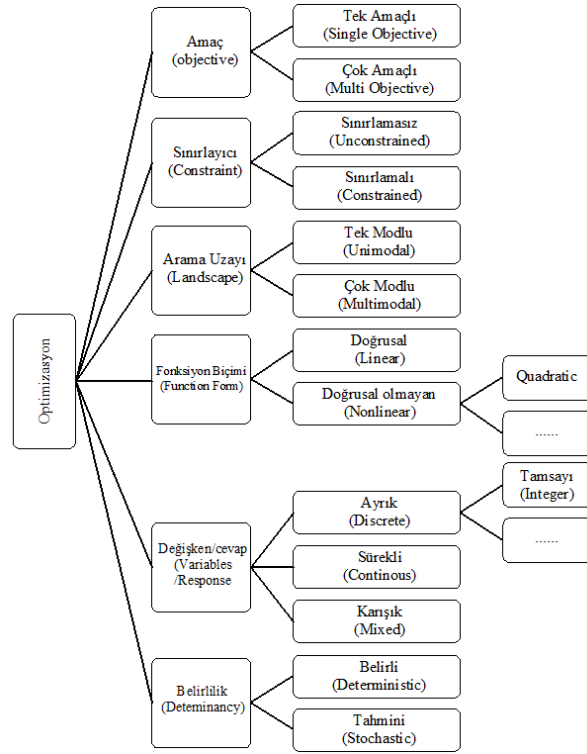
4. SEZGİSEL ALGORİTMALAR

Günümüzde teknolojik gelişmeler, karmaşık sistemleri ve devreleri beraberinde getirmektedir. Sistemlerdeki karmaşıklık modelleme ve tasarımlardaki zorluğu da ortaya çıkartmaktadır. Bu durum son yıllarda en iyi sonucun, en hızlı ve kolay şekilde elde edilebileceği optimizasyon yazılımları üzerindeki çalışmaların artmasında neden olmuştur.

Optimizasyon; bir problemin amacına uygun, belirli bir çözüm aralığı içerisinde en iyi sonuca en kısa zamanda ulaşmak için problemi inceleme ve çözme işlemleridir (Yaşar, 2014). Optimizasyon matematiksel programlama olarak da adlandırılmaktadır (Ortakçı, 2011).

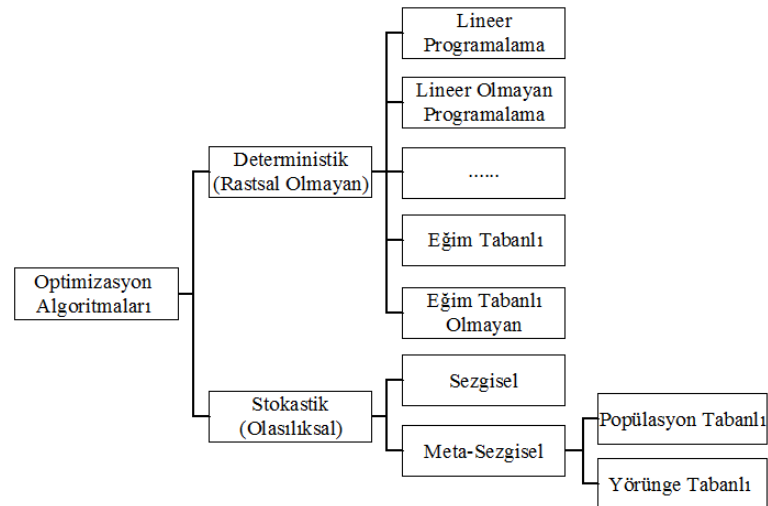
Günlük hayatta veya teknik alanda karşılaşılan bir probleme ait değişkenlerin etkilendiği değişkenlere parametre denilmektedir. Bilinmeyen parametre değerlerinin bulunması esnasında belirli sınırları içeren bir problem “optimizasyon problemi” olarak tanımlanabilir (Akkaya, 2012). Optimizasyon problemlerinden ilk olarak uygunluk fonksiyonu olarak tanımlanan problemin matematiksel formülünün çıkartılması gerekir. Uygunluk fonksiyonu gerçeğe yakınlığı optimizasyonun sonucunu doğrudan etkileyen en önemli terimdir. Uygunluk fonksiyonu tanımlandıktan sonra değişkenlerin, parametrelerin sınırlarının belirlenmesi gerekir. Tüm bu ifadeler belirlendiğinde sistemin modellenmesi gerçekleştirilmiş olmaktadır (Ortakçı, 2011). Sistemin modelindeki değişken ve kısıtlamaların artması, modellemeyi daha kompleks bir yapı haline getirecektir. Bu durumda optimizasyon işlemini elle yapmak zorlaşacak ve bilgisayar yazılımlarına ihtiyaç duyulacaktır. Bilgisayar yazılımlarıyla gerçekleştirilen optimizasyonlar hatayı minimize edecek, en hızlı zamanda çözümün üretilmesini sağlayacaklardır.

Optimizasyon teknikleri günümüzde oldukça fazladır ve her optimizasyon tekniğinin kendine özgü algoritmaları bulunmaktadır. Problemin türüne göre, en uygun ve en hızlı optimizasyon çeşitleri seçilmelidir. Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması (Eldem, 2014)

Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan algoritmalar Şekil 4.2’de görüldüğü gibi 2 grupta ifade edilebilir.



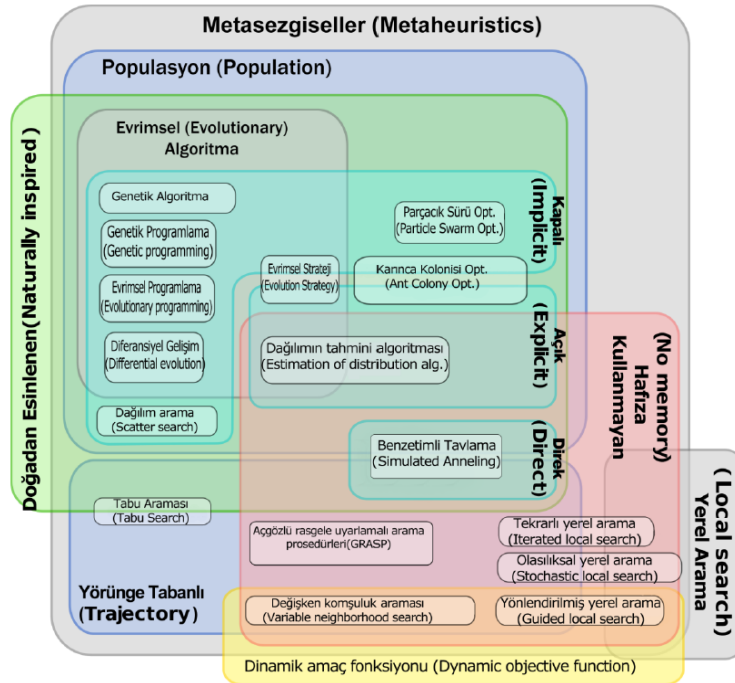
Şekil 4.2. Optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması (Eldem, 2014)

Deterministik algoritmalar belirli bir prosedürü takip eden, takip edilen yolun tasarım değişkenleri ve fonksiyon değerlerinin tekrarlanabildiği algoritmalarlardır. Bu

algoritmalar da aynı sınırlar ve parametreler için her zaman aynı sonucu üretirler. Olasılıksal algoritmalar ise belirlenen kurallar içerisinde rastgele çalışan, ürettiği sonuçlar farklılık gösterebilen algoritmalar dır (Eldem, 2014).

Bir optimizasyon probleminin doğrusal olmadığı durumlarda çözüme ulaşabilmek için determinist ya da sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Sezgisel algoritmalar son zamanlarda birçok alanda uygulanan problem çözme tekniğidir. Modellemedeki kolaylık ve hızlı sonuca ulaşabilme özelliğinden dolayı sezgisel algoritmalar, deterministik yöntemlere göre günümüzde daha fazla kullanılmaya başlanmıştır (Akkaya, 2012; Yılmaz, 2014).

Sezgisel algoritmada kullanılan algoritmalar yakınsama özelliğine sahip olan, her zaman optimum çözümü garanti edememekte fakat optimum sonuca yakın sonuçlar üretebilmektedir (Eldem, 2014). Genetik Algoritmalar (GA), Tabu Arama, Tavlama Benzetim, Karınca Kolonileri, Sinir Ağları, Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) en çok çalışma yapılmış olan sezgisel yöntemlerdir (Terzi, 2009). Bazı çalışmalarda Sezgisel yöntem olarak adlandırılan bu algoritmalar Şekil 4.3’de görüldüğü gibi sezgisel algoritmaların daha gelişmiş i olarak ifade edilen metasezgisel algoritmalar olarak da değerlendirilmiştir (Eldem, 2014).



Şekil 4.3. Metasezgisel algoritmaların cinslere göre sınıflandırılması (Wikipedia,2014)

4.1. Matematiksel Modelleme Yöntemi

Bir problemin çözümlenebilmesi için o problemin matematiksel denklemlerle ifade edilebilmesi ve eşitlikler sisteminin sağlanması gerekmektedir. Problemin çözümü için birden fazla değişken gerekebilir ve bu değişkenler $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ile temsil edilir. Uygunluk fonksiyonu değişkenlerden oluşan amaç fonksiyonu $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ olarak tanımlanır. Burada değişkenlerin $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sınırları belirlenmelidir. Sınırların doğru belirlenmesi problem çözümünde sonuçlara hızlı bir şekilde ulaşılmasını, hatalı sonuçlardan uzaklaşılmasını ve en iyi çözümün bulunmasını sağlayacaktır (Yaşar, 2014).

Örneğin belirlenen sınırlar içerisinde en ucuz maliyetli karışımın bulunması için n adet ürün kullanılacaktır. Bu n adet ürün için m adet sınırlama yapılacağına göre, amaç sınırları belirlenen en uygun değişken değerlerini bulmaktır. Burada n adet değişkenden oluşan f fonksiyonu amaç fonksiyonu olarak tanımlanmış ve Denklem 4.1’de verilmiştir.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’deki amaç fonksiyonuna ait kısıtlamalar ve $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ değişkenlerinin sınırları Denklem 4.2-4.5’deki gibi belirlendiği düşünülürse;

$$k_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq a_1 \quad (4.2)$$

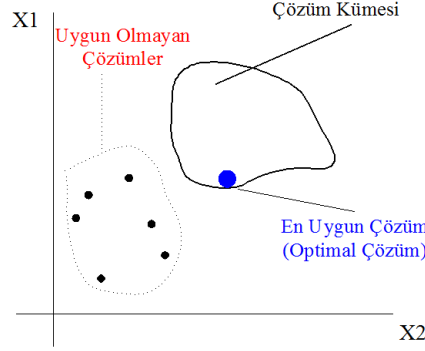
$$k_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq a_2 \quad (4.3)$$

$$k_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq a_m \quad (4.4)$$

$$x_1 \geq 3, x_2 \geq 2, x_3 \geq 6, \dots, x_n \geq 0, \quad (4.5)$$

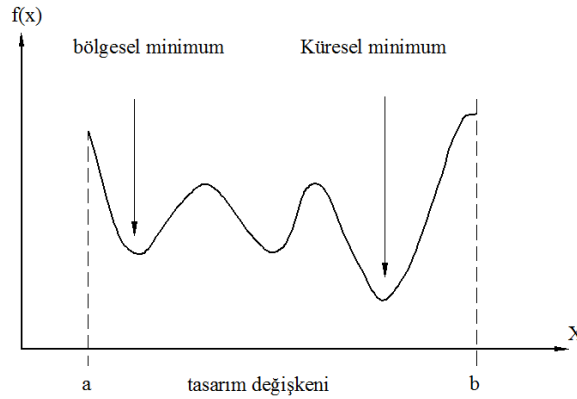
Burada amaç en uygun $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ değişkenlerinin belirlenen sınırlar içerisinde bulunmasıdır. Bu sınırlar içerisindeki çözümlerin oluşturduğu alana çözüm kümesi adı verilmektedir. Optimizasyonun amacı bu çözüm kümesi içerisindeki en

uygun değişken değerlerinin bulunmasıdır. Şekil 4.4’de bu problem için uygun olan veya uygun olmayan çözüm kümeleri gösterilmiştir (Yaşar, 2014).



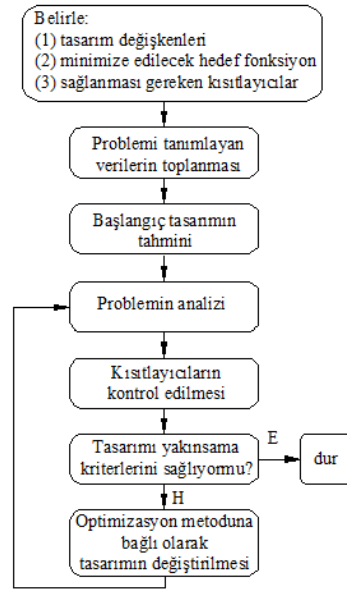
Şekil 4.4. Uygun olan veya olmayan çözüm kümesi

Optimizasyon işleminde en ucuz değer bulunmak istendiğinde çözüm kümesi içerisinde amaç fonksiyonunu minimum yapan farklı değişken değerleri olabilir. Sınırlar içerisinde belirli bir bölgedeki minimum yapan değere bölgesel minimum, çözüm kümesi içerisindeki minimum değere ise küresel (global) minimum adı verilir. Bölgesel ve küresel minimum değerleri Şekil 4.5’de verilmiştir (Akkaya, 2012).



Şekil 4.5. Fonksiyona ait bölgesel ve küresel minimum noktalar

Optimizasyon teknikleri, çözüm kümesindeki en iyi sonuç veren değişken değerlerini belirlemek için kullanılırlar. Burada kullanılan her optimizasyon tekniğinin farklı algoritması bulunmasına rağmen bir tasarım optimizasyonuna ait temel genel bir akış diyagramı Şekil 4.6’da verilmiştir (Cantaş, 2014).



Şekil 4.6. Bir tasarım optimizasyon akış şeması

Bu tez çalışmasında sezgisel algoritmalarından Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmıştır. Bu iki algoritma da Şekil 4.3'den de görüldüğü gibi doğadan esinlenerek geliştirilen algoritmalar.

4.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

PSO, 1995'de James Kennedy ve Russell Eberhart'in geliştirdiği sezgisel bir algoritmadır (Akbulut, 2009). Bu algoritmada doğadaki bütün canlılarda bulunan sosyal zeka temeline dayanan sezgisel bir algoritmadır. İnsanların bilgiyi konuşarak paylaşması, kuşların yön tayininde birbirlerinden yararlanmaları, balık sürülerinin hareketlerini ortak bir kararla almaları sosyal bir varlığın kanıtıdır. PSO'lar kuşların yön tayininde birbirlerinden faydalanmalarından ve balık sürülerinin hep birlikte hareket etmesinden esinlenerek geliştirilmiştir (Eldem, 2014). PSO, GA gibi evrimsel optimizasyon teknikleri ile benzerlik gösterir fakat evrimsel operatörler (çaprazlama ve mutasyon gibi) bulunmamaktadır. PSO'da parçacık olarak adlandırılan çözümler, çözüm içerisindeki en iyi sonuçları takip ederek problem uzayında gezinirler.

PSO, GA ile karşılaştırıldığında gerçekleştirilmesi daha kolaydır ve ayarlanması gereken parametre sayısı çok azdır. Bundan dolayı PSO'lar günümüzde uygulama olarak bir çok alanda kullanılmaktadır (Eldem, 2014).

4.2.1. PSO Algoritmasının temel adımları

PSO'nun temel mantığını bir kuş sürüsünde, kuşların bulduğu yiyecek kaynağını diğer kuşlara bildirmesi ve kuşların bu kaynaklardan en iyi olanına doğru hareket ederek arama yapmasıdır. Bu arama da neredeyse bütün arama uzayı araştırılarak en iyi çözüme yakın bir çözüme ulaşılabilir. Sürüde bulunan kuşların kendi hafızaları bulunmakta ve ayrıca en iyi yiyecek kaynağının yerini de bilmektedirler (Demirci, 2011). PSO'ların en büyük avantajı olan parametre sayısının az olmasıdır. PSO'ların çalışmasında kullanılan bazı ifadelerin açıklanması, algoritmanın daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. PSO'da kullanılan bazı ifadeler aşağıda verilmiştir (Terzi, 2009).

Parçacık sayısı: PSO'da kuşu ifade eden değişkendir. Algoritmada bu değer 20 ile 40 arasında olabilir fakat birçok uygulamada 10 parçacık kullanmak yeter olmaktadır. PSO'nun uygulanacağı problem karmaşık ve özel ise parçacık sayısı 100-200 olarak belirlenebilir.

Parçacık boyutu: PSO ile optimize edilecek probleme göre değişen bir parametredir.

Parçacık aralığı: PSO ile optimize edilecek probleme göre değişen bir parametredir ayrıca farklı boyutlarda ve aralıklarda parçacıklar tanımlanabilir.

Vmax: Bir iterasyonda, parçacıkta oluşacak maksimum hızı belirlemek için kullanılan bir parametredir. Parçacık aralığına göre belirlenen bu değer örneğin x_n parçacığı (-30,30) aralığında ise $V_{max}=60$ olarak hesaplanabilir.

Öğrenme Faktörleri: c_1 ve c_2 değerleri çözüm uzayında optimizasyonun gbest ve pbest değerlerine yaklaşımlarını sağlayan parametrelerdir. Bu değişkenler uygulamalarda genel olarak 2 seçilir. Fakat c_1 , c_2 ye eşit ve [0, 4] aralığında da seçildiği uygulamalar bulunmaktadır.

Atalet ağırlığı: Atalet ağırlığı parçacığın bir önceki hızının yeni hıza etkisini belirleyen bir parametredir. Bu parametre parçacıkların hız değerlerinde ani değişme olmamasını, parçacıkların bir önceki hızlarına bağlı kalarak hız güncellemesi yapmasını sağlayarak çözüm uzayında parçacıkların ani hız değişimlerini engelleyerek uygun arama yapabilmesini sağlamaktadır. Atalet değerinin büyük olması parçacığın çözüm uzayında global aramalar yapmasına, küçük olması ise bölgesel aramalar yapmasını sağlamaktadır. Genellikle [0,4-0,9] aralığında alınarak, algoritmanın işleyişi süresince değişmeyerek kullanılabilen ya da her bir iterasyonda azaltılarak dinamik olarak

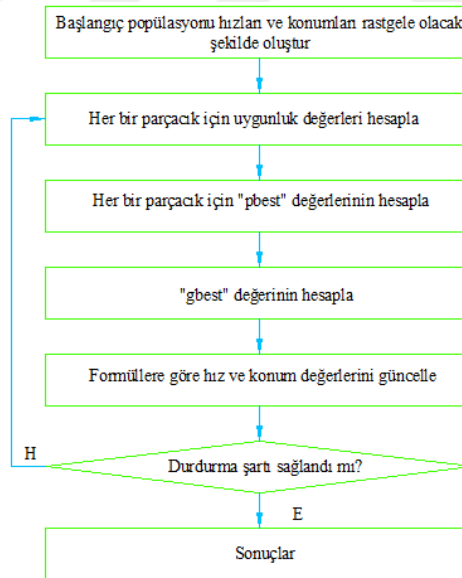
kullanılabilen parametredir. Dinamik olarak azaltılan atalet değeri için uygulamalarda $w_{\max}= 0,9$, $w_{\min}= 0,4$ olarak alınarak Denklem 4.6'daki ifade ile her iterasyonda lineer olarak azaltılabilmektedir.

$$w_i = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{Toplam iterasyon}} k \quad (4.6)$$

$k = \text{Mevcut iterasyon}$

Durma Koşulu: Algoritmanın ne zaman sonlanacağını belirleyen kriterlerdir. Algoritma belirlenen iterasyon sayısına ulaştığında, fonksiyonun uygunluk değeri belirlenen hata sınırları içerisinde ya da belirlenen değere ulaştığında ayrıca belirlenen zaman gerçekleştiğinde algoritma durdurulabilir. Burada durdurma kriteri belirlenirken algoritmanın erken yakınsamasına sebep vermemeli ve durdurma şartı hesaplama süresini çok uzatmamasına dikkat edilmelidir.

PSO algoritmasının genel adımları Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. PSO akış şeması

PSO algoritmasının genel adımları aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Demirci, 2011);

1. Popülasyon oluşturulur. Her parçacığın başlangıç değeri ve hızı rastgele atanır.
2. Her bir parçacığın uygunluk değeri amaç fonksiyonuna göre hesaplanır.

3. Parçacığın en iyi değeri bulunur. Bir önceki adımda hesaplanan uygunluk değeri parçacığın hafızasında bulunan en iyi kişisel değer (pbest) ile karşılaştırılır. Eğer bir önceki adımda bulunan sonuç mevcut “pbest” değerinden daha iyi sonuç ise yeni değer “pbest” olarak değiştirilir.
4. Küresel en iyi parçacık bulunur. İkinci adımda her parçacık için hesaplanan uygunluk değeri programın hafızasında tutulan küresel en iyi çözüm “gbest” ile karşılaştırılır. Eğer daha iyi bir sonuç varsa bu sonuç “gbest” ile değiştirilir.
5. Her parçacığın hızı ve konumu Denklem 4.7’deki formüle göre parçacığın hız değişkeni, Denklem 4.8’e göre de parçacığın konumu ayarlanır. r_1 ve r_2 [0,1] aralığında rasgele üretilen sayılardır.

$$v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 r_1 (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (gbest^k - x_i^k) \quad (4.7)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (4.8)$$

6. Durdurma şartı veya şartları sağlanıncaya kadar 2-5 adımları arasındaki işlemler tekrarlanır.

Denklem 4.7’deki ifade 3 parçadan oluşmaktadır. Birinci kısım hız değerinin **atalet ağırlığı** göstermektedir. Parçacıkların hız değerlerinde ani değişiklikler olmamalı, parçacıklar bir önceki hızlarına bağlı kalarak hız güncellemesi yapmalıdırlar. Aksi takdirde parçacıklar çözüm uzayında ani yön değişiklikleri yaparak uygun bir arama gerçekleştiremeyeceklerdir. İkinci kısım ise **kışisel hafıza** kısmı: Bu kısım vasıtasıyla parçacıkların konumlarını geçmişte elde ettikleri en iyi konuma (pbest) doğru çekilirler. Bu kısımda elde edilen değer $c_1 r_1$ değeri ile ölçeklenmiştir. Üçüncü kısım ise **sosyal hafıza** kısmı: Bu kısımda parçacıklar sürünün en iyi konum değerine (gbest) doğru çekilirler. Bu kısımda da elde edilen değer $c_2 r_2$ değeri ile ölçeklenmiştir (Ortakçı, 2011).

PSO algoritmasının yazılımında bazı durumlar dikkate alınmalıdır.

Pozisyon değerleri: Parçacıkların alabileceği değerler (pozisyonları) herhangi bir çözüm aralığında sınırların dışına çıkarsa pozisyon Denklem 4.9’daki gibi düzenlenir.

$$\begin{aligned} x_i > x_{\max} & \text{ ise } x_i = x_{\max} \\ x_i < x_{\min} & \text{ ise } x_i = x_{\min} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Hız değerleri: PSO algoritmasında hız değerleri pozitif ve negatif değerler olarak çok yönlü hareket sağlanabilmektedir. Parçacığın çözüm uzayı dışına çıkması durumunda hız değerlerinin kontrolü Denklem 4.10'daki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{aligned} v_{\min} &= -v_{\max} \\ v_i > v_{\max} & \text{ ise } v_i = v_{\max} \\ v_i < v_{\min} & \text{ ise } v_i = v_{\min} \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.3. Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA)

DGA, Storn ve Price tarafından 1997 yılında geliştirilmiş popülasyon temelli sezgisel bir algoritmadır (Storn ve Price, 1997). Çözüm uzayının çok geniş olduğu durumlarda veya matematiksel yöntemlerin çok uzun zamanda çözüm bulabildiği problemlerde uygulanması daha uygundur (Yaşar, 2014). DGA, GA'ya dayanan popülasyon temelli sezgisel bir algoritma olmakla birlikte DGA değişkenler gerçek değerleriyle kullanılırlar (Hrstka ve Kučerová, 2004). DGA'lar da GA olduğu gibi mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri kullanılmıştır fakat GA'dan farklı olarak her bir operatör tüm popülasyona uygulanmıştır. DGA'nın diğer sezgisel algoritmalarından önemli bir üstünlüğü de kodlamasının kolayca yapılabilmesidir (Mayer ve ark., 2005).

Evrimsel algoritma tek bir bireyle değil bireylerin popülasyonu ile ilgilenir. Her birey mevcut problem için muhtemel bir çözümü temsil eder ve bir veri yapısı olarak tanımlanır. Her birey uygunluk ölçüt değerini belirlemek amacıyla değerlendirilir ve daha uygun bireyleri seçmek suretiyle yeni popülasyon oluşturulur (Arslan, 2010). Evrimsel hesaplama teknikleri arasında oldukça benzerlikler olmasına rağmen birçok farklılıklar da mevcuttur. Örneğin çözümlerin temsili için farklı veri yapıları kullanılırlar ve dolayısıyla kullanılan genetik operatörler de farklı olabilir. Örneğin DGA'da bireylerin seçimi için kullanılabilecek çok sayıda seçme metodu bulunmaktadır (Karaboğa, 2014). DGA basit ama güçlü popülasyon tabanlı bir algoritmadır (Price, 1996). DGA'lar tanımlanan fonksiyonların en uygun değerlerini gerçek değerlerle

global olarak optimize edebilen araştırma algoritmalarıdır. Optimizasyonun gerçek parametrelerle yapılması DGA'nın mühendislik, bilim gibi birçok alanda kullanılmasını sağlamıştır. Günümüzde gerçek uygulamalarda kullanılan problemlerin birçoğu karmaşık ve zor çözüm gerektiren fonksiyonlardan oluşmaktadır. Bu tür problemlerin optimizasyonunda çözüm olarak ilk uygulanan yöntem sezgisel yaklaşım teknikleridir. Sezgisel tekniklerle birde uzmanın bilgi ve deneyimleri de optimizasyonda kullanılmasına imkan sağlayan algoritmalar genel tekniklerin kullanıldığı algoritmalarla karşılaştırıldığında oldukça üstün başarı gösterdiği görülmüştür (Karaboğa, 2014).

DGA'lar temel olarak üç avantaja sahiptirler (Yılmaz, 2014). Bunlar;

- Başlangıç parametrelerine bağlı olmaksızın gerçek global minimumun bulunması,
- Bölgesel minimuma hızlı yakınsaması
- Az sayıda kontrol parametresi kullanılması,

4.3.1. DGA'nın temel adımları

Sezgisel algoritmalarından olan DGA, kullanım kolaylığı, iyi yakınsama özelliği, doğrusal olmayan problemlerin çözümünde paralelleştirilebilmesi gibi özelliklerinden dolayı başarılı bir gelişim algoritması olarak görülmektedir (Akkaya, 2012). DGA basit olarak temel basamakları aşağıdaki gibidir (Karaboğa, 2014).

Başlangıç popülasyonunun oluşturulması

Değerlendirme

TEKRARLA

Mutasyon

Yeniden Birleştirme

Değerlendirme

Seçme

DURDURMA KRİTERİ SAĞLANINCAYA KADAR

DGA'nın temel adımları açık bir şekilde aşağıda verilmektedir. Çoğu açıdan bu algoritma tipik bir gelişim algoritmasıdır. Adım 2'de görüleceği üzere algoritma başlangıçta, NP (Number of Population – Popülasyon Büyüklüğü) tane D (Dimensiyon-Boyut) boyutlu amaç değişken vektörlerinin x_{jiG} rastgele dağıtılmış başlangıç popülasyonunu (P_0) üretir. Randj [0.1] terimi 1 ile 0 arasında uniform şekilde dağılmış

rastgele değişkeni temsil etmektedir. j indisi j 'nin her bir değeri için yeni rastgele sayı üretildiğini göstermektedir. i indisi ise rastgele değer her bir değeri için yeni bir rastgele sayı üretildiğini göstermektedir. h_i ve l_0 indisleri üst ve alt başlangıç parametre sınırlarını temsil etmektedir. Oluşturulan bu popülasyon $G_{\max}$ jenerasyonu (Maximum Generation-Maksimum Jenerasyon, İterasyon) boyunca mutasyon, çaprazlama ve seleksiyon operatörleri uygulanarak başarılı bir şekilde geliştirilir. DGA en önemli özelliği deneme vektörünün üretilme şeklidir.

Adım 1. Kontrol parametrelerinin

$D, G_{\max}, NP \geq 4, F \in (0,1+), CR \in [0,1]$, değerlerini ve parametre sınırlarını $x^{-(lo)}, x^{-(hi)}$ atanır.

Adım 2. Başlangıç popülasyonunu Denklem 4.10'daki ifade ile oluşturulur.

$$\forall i \leq NP \wedge \forall J D: x_{j,i,G=0} = x_j^{(lo)} + rand_j [0,1] \cdot (x_j^{(hi)} - x_j^{(lo)}) \quad (4.10)$$

$$i = (1, 2, \dots, NP), J = (1, 2, \dots, D), G = 0, rand_j [0,1] \in [0,1]$$

Belirli bir durdurma kriteri sağlanıncaya kadar aşağıdaki adımları tekrarla

Adım 3. Mutasyon ve rekombinasyon işlemi Denklem 4.11'deki matematiksel ifade ile gerçekleştirilebilir.

$$r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}, r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i \text{ (rastgele seçilmiş)}$$

$$J_{rand} \in \{1, 2, \dots, D\}, \text{ (rastgele seçilmiş)}$$

$$\forall j \leq D, u_{j,i,G+1} = \begin{cases} x_{j,i,G} + K \cdot (x_{j,i,G} - x_{j,i,G}) + F \cdot (x_{j,i,G} - x_{j,i,G}) & \text{eğer } (rand_j [0,1] < CR \vee j = J_{rand}) \\ x_{j,i,G} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.11)$$

Adım 4. Seleksiyon işlemi Denklem 4.12'deki ifade ile gerçekleştirilir.

$$\bar{x}_{i,G+1} = \begin{cases} \bar{u}_{i,G+1} & \text{eğer } f(\bar{x}_{i,G+1}) \leq f(\bar{x}_{i,G}) \\ \bar{x}_{i,G} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.12)$$

DGA, bir ebeveyn vektöründen x_{jiG} , bir deneme vektörü u_{jiG+1} üretmek için mutasyon ve rekombinasyon işlemlerinin her ikisini birlikte kullanmaktadır. r_1, r_2, r_3 indisleri, i indisinden farklı olan ve aynı zamanda birbirlerinden farklı rastgele seçilmiş popülasyon indisleridir. Burada i mevcut amaç vektörünü (Ebeveyn) temsil etmektedir. Dolayısıyla Adım 1'de belirtildiği gibi popülasyon büyüklüğü NP her zaman 3'ten büyük olmalıdır. Hem CR (Crossover Rate-Çaprazlama Oranı) hem de F değerleri kullanıcı tarafından belirlenecek olan kontrol parametreleridir. CR olasılığı temsil ettiği için 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. F (Fitness Scaling-Uygunluk Ölçekleme) ise bir ölçekleme faktörüdür. Rand_j CR'den küçükse veya $j=j_{\text{rand}}$ olduğunda yeni (Child, Çocuk) parametre, rastgele seçilmiş üç tane vektörün doğrusal kombinasyonu olacaktır. Değilse, yeni parametre doğrudan kendi ebeveyninden alınacaktır. $V_j = j_{\text{rand}}$ şartı, yeni vektörlerin en az bir parametrede de olsa ebeveyn vektörlerin farklı olmasını garanti etmek amacıyla kullanılmaktadır.

Adım 4'te görüldüğü gibi her yeni vektör, amaç fonksiyonu vasıtasıyla değerlendirildikten sonra maliyeti ebeveyninin maliyeti ile karşılaştırılır. Şayet yeni vektör eşit veya daha düşük bir maliyete sahip olursa yeni vektör popülasyondaki ebeveyn vektörü ile yer değiştirir. Yoksa ebeveyn vektörü ile yer değiştirmeyip popülasyonda muhafaza edilir. Bir sonraki jenerasyonun üyeleri bu seleksiyon işlemiyle seçildikten sonra gelişim çevrimi ya problem çözülene kadar ya da tüm vektörler bir noktaya yakınsayana kadar tekrar etmektedir. Algoritmanın şematik diyagramı Şekil 4.8'de ve Şekil 4.9'da verilmektedir. Diyagram algoritmanın işleyişini daha rahat anlamak için alternatif bir yöntemdir.

DGA algoritmasının çalışması kısaca 5 adım olarak anlatılmıştır. Her adımda yapılan işlemler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Kodlama

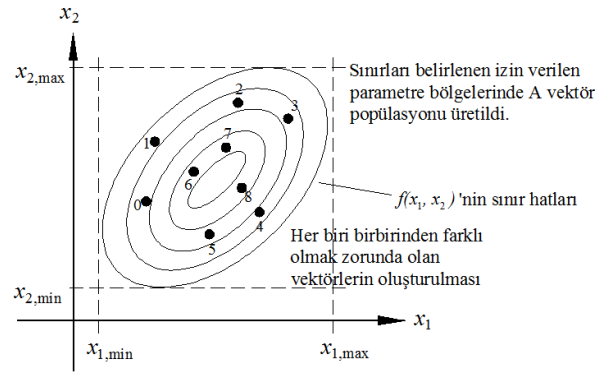
Nümerik optimizasyon amaçlayan gelişim algoritmalarında bulunmak istenen parametrelerin değerleri algoritma içerisinde ikilik tam sayılara dönüştürülmektedir. Algoritmada değişkenler ikilik tamsayı değerleri ile işlenmektedir. Fakat tamsayı şeklinde ifade edilen değişkenlerin geniş dinamik sahasını en doğru şekilde temsil edilmesi mümkün olmamaktadır. Bunun için değişkenler farklı şekillerde ve kodlamalarla ifade edilmeye çalışılmıştır yine de yapılan çalışmalar ve denenen farklı bu kodlamalar geniş bir dinamik sahanın temsil edilmesine yetmemiştir. Bundan dolayı kayan-noktalı sayılar kullanarak kodlanan amaç vektörleri tercih edilerek diğer yöntemlerden daha geniş bir dinamik saha oluşturulabilmektedir. DGA, gerçek parametreleri bilinen kayan-noktalı sayılar kullanarak kodlamakta ve bu parametreler arasındaki işlemleri, standart kayan-noktalı aritmetik mantığına göre gerçekleştirmektedir.

Popülasyon Yapısı ve Parametre Sınırları

DGA'da algoritma tanımlanırken ilk olarak NPxD kayan-noktalı dizi şeklinde sabit büyüklükte bir popülasyon oluşturmaktadır. DGA algoritması paralel formda çalışırken, amaç vektörlerinin birinci dizisi mevcut ebeveyn popülasyonu için ikinci dizisi ise yeni bireylerin oluşturulması için hafıza da saklanır. Başlangıçta oluşturulan amaç vektörleri sınırlamaları belirlenen uniform dağılımlı rastgele elemanlar seçilerek oluşturulur. Uygulamalarda sınırlar modellenen sistemin fiziksel özelliklerine ya da çalışma şartlarına göre belirlenir. Fiziksel olarak ifade edilmeyen uygulamalarda ise sınırlar küresel optimizasyonu içeren bölgeleri kapsayacak şekilde büyük seçilmelidir. Belirlenen alt ve üst parametre sınırları istenirse sadece başlangıç parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır. Daha sonraki algoritmanın adımlarında bu sınırlar kullanılmayarak sınırların dışında da arama yapmaya imkan sağlayacak şekilde yazılım gerçekleştirilebilir. Bu durumda değişkenlerin değerlerinin sonsuza gitmesi ihtimali de düşünülmelidir. Sınırlar değişkenlerin sonsuza gitmesini engelleyen parametreler olarak

da kullanılır. Sınırları belirlenen değişken, algoritma içerisinde sınırların dışında bir değer alırsa bu değer sınırlar içerisinde kalması için çeşitli yöntemler kullanılır. Bunlardan bir tanesi de değişkenin değeri, sınırı aşan değere göre alt ya da üst sınıra eşitlenmesidir.

Başlangıçta problemin iyi bir çözümü mevcut ya da tespit edilmiş olabilir. Bu durumda algoritma araştırmalarını başlangıçta belirlenen çözümün etrafında dağılmış amaç vektörlerinden oluşan popülasyonla gerçekleştirebilir. Fakat belirli bir bölgede araştırma yapılacağından ve asıl araştırmayı yönlendiren amaç vektörleri arasındaki fark olduğundan bu durum pek tavsiye edilmez. Şekil 4.10'da belirli bir çözüm uzayında rastgele belirlenen başlangıç popülasyon değerleri görülmektedir.



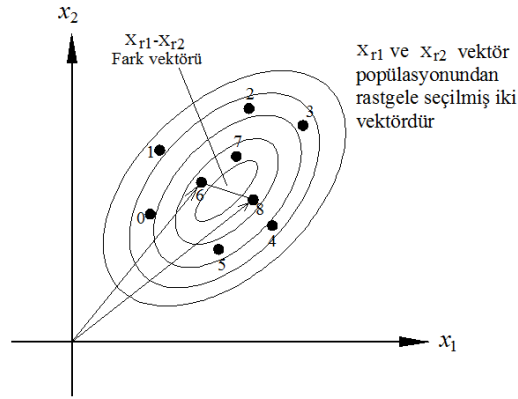
Şekil 4.10. DGA'da başlangıç popülasyonunun belirlenmesi (Kiranyaz ve ark., 2014)

Mutasyon

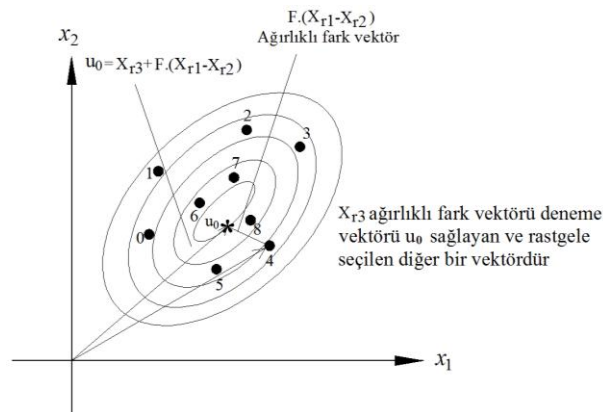
Parametre optimizasyonu açısından mutasyon işlemi, var olan bir amaç vektörünün bir veya daha fazla parametreleri üzerine, rastgele üretilmiş bir artışın ilave edilmesi işlemine karşılık gelir. İyi bir mutasyon işleminin amacı, var olan amaç vektörlerini doğru zamanla doğru miktar ile doğru yönde hareket ettirecek artışları başka bir ifadeyle adımları üretmektedir. Bu hedefi başarmak esas olarak adımları üretecek dağılımın karakteristiklerine bağlıdır.

DGA, mutasyon işlemi için 3 adet rastgele amaç vektörü seçilir. Bunlardan bir tanesi mutasyona uğrayacak amaç vektörü diğer iki tanesi ise Şekil 4.11'de görüldüğü gibi ağırlıklaştırılmış fark vektörünün oluşturulmasını sağlayan amaç vektörleridir. Mutasyon işleminde Şekil 4.12'de görüldüğü gibi ağırlıklaştırılmış fark vektörü ile

mutasyona uğramak için seçilen vektör toplanarak gerçekleştirilir. Algoritmanın basit mutasyon işlemi sık sık aritmetik çaprazlama işlemiyle karıştırılır. Aritmetik çaprazlama, iki vektörün genel doğrusal kombinasyonu iken mutasyon üç vektörün doğrusal kombinasyonunun özel bir halidir. Her iki durumda da mevcut amaç vektörlerinin doğrusal kombinasyonu olan yeni vektörler üretilmektedir. Aritmetik çaprazlama ile mutasyon birbirlerine rağmen amaç vektörleri uzayını oldukça farklı şekilde araştırırlar. Örneğin aritmetik çaprazlama, mevcut vektörü popülasyondaki diğer bir vektöre daha çok benzetmeye çalışırken işlem vektörleri herhangi bir referans vektör (mevcut vektör) ihtiva etmemektedir. Referans vektörü yerine, araştırma eksenlerinin sayısını artıran ikinci rastgele seçilmiş bir amaç vektörü kullanmaktadır.



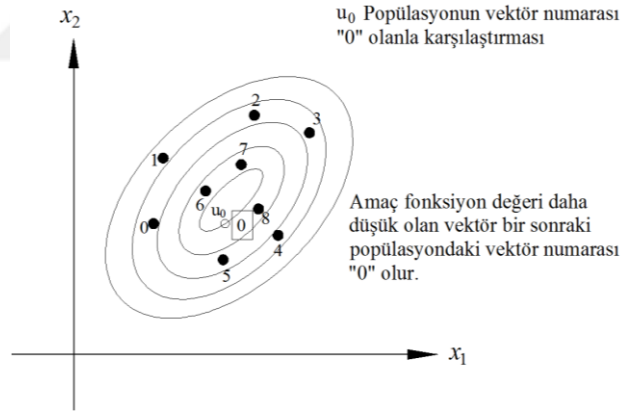
Şekil 4.11. Rastgele seçilen amaç vektörünün farkının alınması (Kiranyaz ve ark., 2014)



Şekil 4.12. Mutasyon işlemi (Kiranyaz ve ark., 2014)

Seleksiyon

Seleksiyon işlemi, yeni üretilen vektörlerin hangi şartlar altında popülasyona girebileceğini tanımlayan bir kriterdir. Örneğin, turnuva seleksiyon işlemi rastgele seçilmiş vektör çiftleri arasında bir dizi yarışma gerçekleştirmek suretiyle yeni jenerasyonun üyesini belirlemektedir. Tipik olarak yarışan vektörler ebeveyn-aday popülasyonundan seçilir ve en fazla kazanan vektörlerin gelişmesine müsaade edilir. Gelişim stratejisi, alternatif olarak birleştirilmiş ebeveyn-çocuk popülasyonunun en iyi başarımlar gösteren üyelerinin gelişimine müsaade edildiği deterministik bir seleksiyon işlemi kullanılmaktadır. Her iki seleksiyon işleminin dezavantajı, her jenerasyon sonunda popülasyonun kalite değerlerine göre sıraya dizilme maliyetidir. DGA'nın seleksiyon işleminde, yeni üretilen vektör ebeveynine göre daha gelişmiş veya en azından aynı gelişme seviyesinde değilse ebeveyn vektör en az bir jenerasyon daha popülasyonda kalmaya devam etmekte ve başka bir vektörle yer değiştirmektedir. Şekil 4.13'de seleksiyon işlemi görülmektedir.

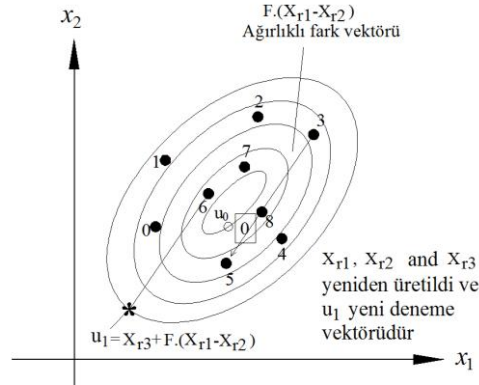


Şekil 4.13. Seleksiyon (Kiranyaz ve ark., 2014)

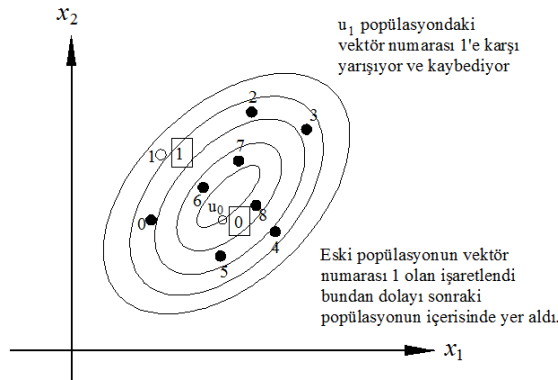
Rekombinasyon

Mutasyon işlemi, temel olarak bir popülasyonu güçlü yapmaktan ve yeni araştırma bölgelerinin araştırılmasından sorumludur. Rekombinasyon veya çaprazlama işlemi ise tamamlayıcı bir işlemdir. Şekil 4.14'de görüldüğü gibi rekombinasyon işleminin amacı mevcut olan amaç vektör parametrelerinden yararlanarak araştırmanın başarılı olabilmesi için yeni vektörleri oluşturmaktır. Rekombinasyonun algoritma

üzerindeki etkisiyle ilgili ciddi çalışmalar ve araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen kesin sonuçlardan birisi, DGA’larda uniform rekombinasyon işleminin uygulanması araştırmının hızlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlamakta fakat hesaplama maliyetini önemli miktarda artırmaktadır.



Şekil 4.14. Yeni popülasyon vektörünün oluşturulması (Kiranyaz ve ark., 2014)

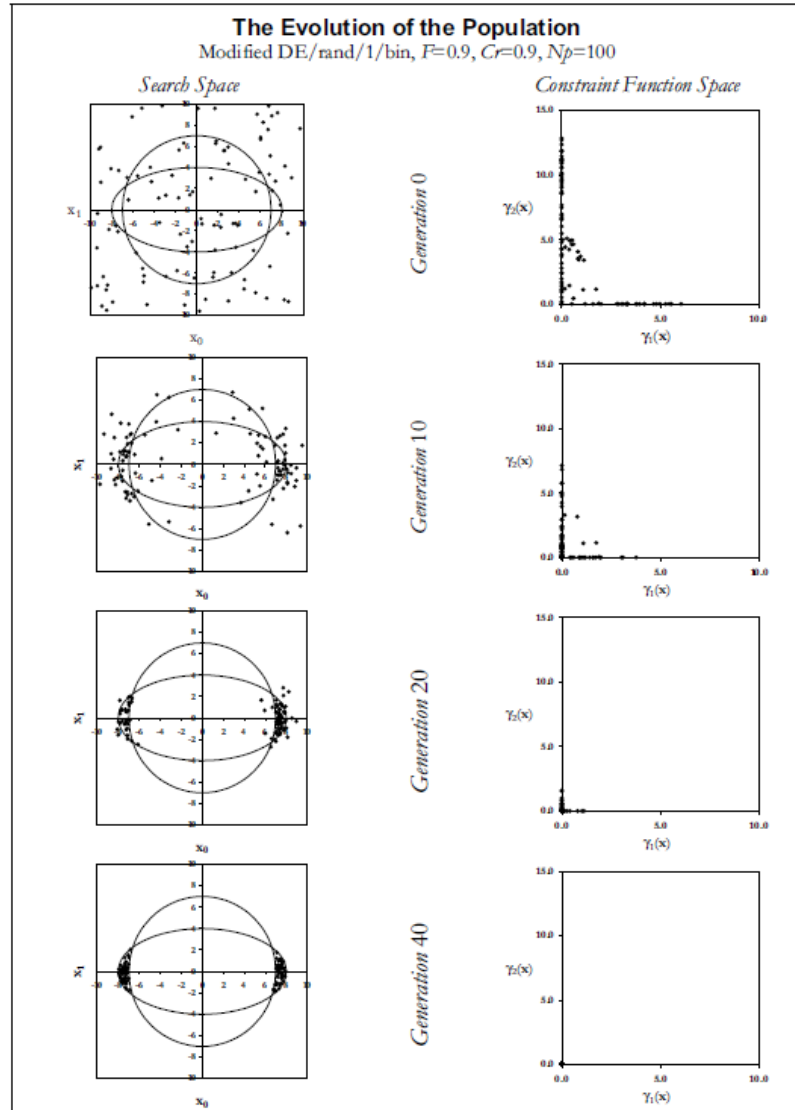


Şekil 4.15. Seçim (Kiranyaz ve ark., 2014)

DGA’nın ilk versiyonları özel uniform olmayan ayırık rekombinasyon işlemi kullanmıştır. Bu işlemde, ebeveynle değiştirilme ihtimali olan yeni çözüm oluştururken çözümüm bazı elemanları ebeveynden bazıları ise mutasyona tabii tutulmuş vektörden alınmaktadır. Yeni aday çözümün oluşumunda, hangi vektörden daha çok elemanın alınacağını belirleyen frekansı kontrol etmek amacıyla hem üstel hem de binomial işlemler kullanılmıştır. Bu iki işlem, kullanıcı tanımlı, optimizasyon işlemi boyunca sabit tutulan ve çaprazlama oranı (CR) olarak adlandırılan kontrol parametresi aracılığıyla ayarlanır. Binomial uygulamada, 0 ve 1 arasında rastgele üretilen bir sayının CR’den küçük olması durumlarında elemanlar mutasyona uğramış çözümünden, değilse

ebeveynden alınmaktadır. Bunun tersine üstel uygulamada ise 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir sayının CR'den küçük olması anına kadar elemanlar ebeveynden, büyük olduğu andan itibaren de mutasyona uğramış çözümden alınmaktadır. Her iki durumda da yeni üretilen vektörün en az bir parametresinin ebeveynden farklı olması sağlanmaktadır.

Şekil 4.16'de DGA'nın çalıştırıldığında farklı iterasyonlardaki arama uzayı ve optimize edilen fonksiyonun değişimi görülmektedir. Şekil 4.16'da görüldüğü gibi ilk olarak rastgele seçilen popülasyon araştırma uzayında dağınık bir durumda iken fonksiyonun uygunluk değeri 15'ler civarındadır. DGA'daki iterasyon sayısı arttıkça araştırma uzayının bir noktaya doğru toplandığını, uygunluk değerinin de giderek en iyi sonuca yaklaştığı görülmektedir.



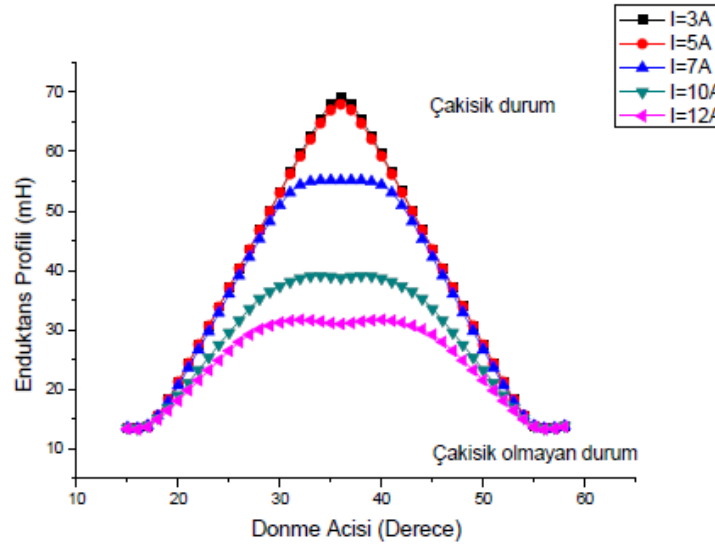
Şekil 4.16. DGA'nın çalışmasında örnek bir uygulama (Kiranyaz ve ark., 2014)

5. MATERİYAL VE METOD

ARM'lerin en önemli dezavantajlarından bir tanesi torklarındaki salınım ve bunun sonucunda oluşan gürültüdür. Bu tez çalışmasında, 5 fazlı U Tipli Segmental Rotorlu 10/8 Anahtarlama Relüktans Motorun (ST-ARM) tork salınımlarının azaltılması amaçlanmıştır. ST-ARM'leri, ARM'den ayıran özellikleri rotor yapılarının parçalı olarak tasarlanmasıdır. Bu tezde ST-ARM'lerin sürücü devrelerinin kontrol sinyallerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. ARM'lerde tork değeri Denklem 5.1'deki (Denklem 4.26) gibi ifade edilebilir.

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (5.1)$$

Denklem 5.1'de görüldüğü gibi ARM'lerde üretilen tork akım ile endüktans değerine göre değişmektedir. ARM'lerde endüktans değeri akıma ve rotor konumuna göre değişmektedir. Şekil 5.1'de ARM'lerin bir fazına ait örnek bir endüktans eğrisi görülmektedir (Uygun D., 2012).

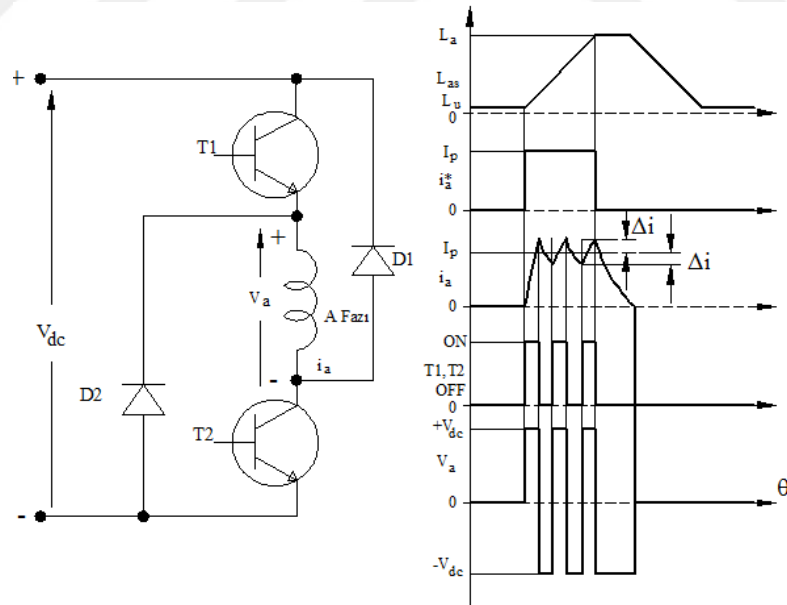


Şekil 5.1. Endüktansın konum ve akıma göre değişimi

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi akımın sabit olduğu varsayılırsa endüktans motorun fiziksel yapısına bağlı olarak değişen bir değer durumundadır. Bundan dolayı motorun

torkunu etkileyen en önemli faktör akımın değeridir. ARM'lerde endüktans değerinin değişken olması akım değerini de etkilediğinden akımın değerini sabit tutmak oldukça zordur. Akımın sürekli geçmesini sağlamak akımın çok yüksek seviyelere çıkmasına neden olacağından akımı belirli sınırlar içerisinde tutmak için gerilim ARM'lere kontrol devresiyle Şekil 5.2'de görüldüğü gibi parçalı olarak uygulanır.

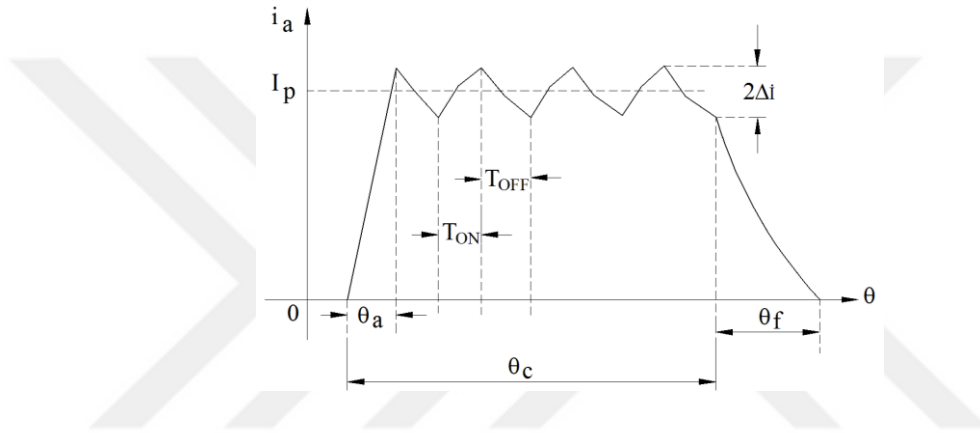
Şekil 5.2'de ARM'nin bir faz sargısının örnek sürücü devresi verilmiştir. Bu sürücü devresinin kontrol sinyalleri ve bu kontrol sinyalleriyle çalıştırıldığında elde edilen akımın eğrisi de aynı şekilde verilmiştir. Akımın belirlenen referans akım I_p değerinde kalabilmesi için Şekil 5.2'de görüldüğü gibi bir fazın kesikli olarak kontrol edilmesi gerekir. Bu durumda ARM'nin akımı I_p değerimden Δi kadar aşağıda ve yukarıda bir salınıma sebep olmaktadır. Bu da akımın $I_p \pm \Delta i$ olarak değerler alması demektir. Şekil 5.2'de dikkat edilmesi gereken bir diğer noktada ARM'nin kontrol sinyalinin endüktansın en yüksek noktasına ulaştığında kesilmiş olmasıdır. Şayet ARM'nin enerjisi kesilmezse ARM ters yönde bir tork üretecektir. Bu durum ARM kontrol devrelerinde dikkate alınması gereken çok önemli bir durumdur.



Şekil 5.2. ARM'nin bir fazının kontrolü ve akım gerilim eğrileri

Şekil 5.2'deki akımın değişimini daha ayrıntılı inceleyebilmek için Şekil 5.3'de akımın eğrisi ayrıntılı olarak çizilmiştir. Şekil 5.2'deki kontrol sinyallerinin uygulandığı T1 ve T2 güç anahtarları belirli sürelerle ON ve OFF sinyallerini almışlardır. ON

sinyalini aldığı süre T_{on} , OFF sinyalini aldığı süre ise T_{off} olarak adlandırılmıştır. Şekil 5.3'den de görüldüğü gibi akımın değeri T_{on} süresince yükselirken, T_{off} süresince düşmektedir. Bu durum kontrol sinyalinin sonuna kadar devam eder. Şekil 5.2'deki kontrol sinyalinin T_{on} ve T_{off} süreleri sabit aralıklı olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı akımın değeri sürekli olarak $I_p \pm \Delta i$ aralığında kalmıştır. Başka bir uygulamada kontrol sinyalinin T_{on} ve T_{off} süreleri değiştirilirse akımın değişimi de sinyalin süresine ve endüktanstaki değişime göre farklılık oluşturacaktır. Ayrıca motorun T_{on} ve T_{off} sürelerinin motorun hızına bağlı olarak ARM üzerindeki etkileri de farklı olacaktır.



Şekil 5.3. ARM'nin bir fazının akım eğrisi

Denklem 5.1'deki tork denklemi düşünüldüğünde akımdaki bu salınımlar direk olarak torkun salınımlarına yansıyacaktır. Ayrıca ARM'lerde stator sargıları belirli açılarla motora yerleştirilmiştir. Örneğin stator sargısı 18° 'lik bir açıyla yerleştirilmiş olsun. Bu durumda motorun 1000 d/dk hızla dönerken 18° 'yi yol alma süresi ile 3000 d/dk hızla dönerken aynı dereceyi yol alma süresi farklı olacaktır. Bu da motordaki akım değerlerinin kontrolünü zorlaştıran bir durumdur. Bundan dolayı ARM'lerde stator sargılarının başlangıç ve bitiş noktalarının belirlenmesi için motorun üzerinde konum sensörleri kullanılır. Bu sensörler enerjilendirilen sargının enerjisinin kesilmesini ve sıradaki sargının enerjilendirilmesini kontrol devresine sinyalle bildirmektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için güç anahtarlarının iletim ve kesim sinyalleri zamanla değil motora bağlanacak olan enkoderden gelen sinyaller ile gerçekleştirilebilir. Böylece motor hangi hızda dönerse dönsün kontrol devresi örneğin 2° döndüğünde sinyal verecek ve hızdan bağımsız bir kontrol geliştirilmiş olacaktır.

Bu tez çalışmasında güç anahtarlarının iletim ve kesim sinyalleri ayarlanarak torktaki salınım değerlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Burada açısız olarak hangi sinyallerin kullanılması gerektiği sezgisel algoritmalarından PSO ve DGA kullanılarak belirlenmiştir. Sezgisel algoritmalarda amaç fonksiyonunun doğru belirlenmesi algoritmanın başarısı için en önemli unsurlardan bir tanesidir.

5.1. ST-ARM'nin Matematiksel Modelinin Çıkartılması

ARM'ler bir fazının eşdeğer devresi ve akımın karesine bağlı olarak tork üretmeleri ile seri uyarımlı doğru akım motoruna benzemektedir. ARM'lerde endüktans değeri hem rotor konumuna ve hem de faz akımına bağlı olarak değiştiğinden bu motorların kontrolü de seri uyarımlı doğru akım motoruna benzemektedir. ARM'lerdeki endüktans değerindeki değişmeden dolayı bu motorların sürücü sistemi için kontrol stratejisi geliştirmek karışık olmaktadır (Omac Z. ve Kürüm H.). ARM'nin en önemli karakteristik özelliği, rotor pozisyonu ve akım genliğine bağlı olarak manyetik devresinin doğrusal olmayan bir yapıda olmasıdır. Bundan dolayı ARM'lerden yüksek performans elde edebilmek ve torktaki salınımları azaltabilmek için manyetik devre modelinin iyi çıkartılması gerekir. Bu ise ancak endüktansının doğru olarak belirlenmesi ile mümkündür (Terzioğlu H. ve ark., 2013). Anahtarlamalı Relüktans Motorlarda faz endüktansı, uyarım akımı ve rotor pozisyonunun bir fonksiyonudur. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda endüktans değişiminin modellenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmıştır (Bay Ö. F., 1996; Güvenç, 2007; Üstün, 2009; Terzioğlu H. ve ark., 2013).

ARM'nin yapısının basit olmasına rağmen makinenin manyetik akı davranışını matematiksel model kullanarak elde etmek çok zordur. Bunun için birçok yöntem vardır ve en yaygın kullanılanları ise kosinüs metodu ve sonlu elemanlar analiz yöntemidir (Cui ve ark., 2005).

5.1.1. Faz sargı endüktansının doğrusal olmayan matematiksel modeli

Faz sargı endüktansının Fourier serisi açılımı Denklem 5.2'de verilmiştir (Cui ve ark., 2005).

$$L(\theta) = L_0 + \sum_{n=1}^N [L_n \cos n(N_r \theta - \varphi_0)] \quad (5.2)$$

Denklem 5.2’de N en yüksek harmonik numarasını, N_r Rotor kutup sayısını, φ_0 endüktans eğrisinin başlangıç faz açısını ifade etmektedir.

Denklem 5.2’de N sayısının artırılması endüktans hesabının hassaslığını artırılabilir fakat çok yüksek harmonik numarası hesaplama işlemini karmaşıktırır (Cui ve ark., 2005). Bundan dolayı yapılan çalışmalarda Denklem 5.2’deki ifade $N=3$ için açılımı yapılmış ve Denklem 5.4 elde edilmiştir.

$$L(\theta) = L_0 + (L_1 + L_3) [1 - \cos(N_r \theta - \varphi_0)] + L_2 [\cos 2(N_r \theta - \varphi_0) - 1] + L_3 [\cos 3(N_r \theta - \varphi_0) - 1] \quad (5.3)$$

Denklem 5.2 ve Denklem 5.3’de endüktansın konuma göre değişiminin Fourier serisi ile matematiksel modeli verilmiştir. ARM’lerde endüktans değeri hem konumla hem de akımla değişmektedir. Bundan dolayı Denklem 5.3’deki matematiksel ifade, akımın endüktans üzerindeki etkisi de dahil edilerek Denklem 5.4’deki gibi yazılabilir (Torrey ve Lang, 1990; Cui ve ark., 2005).

$$L(\theta, i) = L_0 + \{(L_1 + L_3) [1 - \cos(N_r \theta - \varphi_0)] + L_2 [\cos 2(N_r \theta - \varphi_0) - 1] + L_3 [\cos 3(N_r \theta - \varphi_0) - 1]\} \frac{a}{a + i} \quad (5.4)$$

Denklem 5.4’de L_0 , L_1 , L_2 ve L_3 katsayıları rotor konumuyla θ ilgili sabit sayılardır. a katsayısı akımın değişimiyle ilgili sabit bir sayıdır. Doğrusal olmayan matematiksel modelleme bu 5 katsayı ile tam olarak ifade edilebilir. Bu katsayılar deneme yoluyla ya da matematiksel hesaplama ile bulunabilir (Cui ve ark., 2005).

$L_{\min}$, bir faza ait en düşük endüktans değeri, $L_{\max}$, aynı faza ait en yüksek endüktans değerini ifade etmektedir. Buna göre Denklem 5.5’deki endüktans modelinin

katsayıları $L_1 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2}$ olarak hesaplanabilir (Cui ve ark., 2005). L_2 ve L_3

katsayıları ise mutlak kutup genişliği ve sırasıyla stator-rotorla ilgili kutup genişliği katsayılarıdır.

Denklem 5.4'deki katsayıları belirlemek için ikinci bir yöntem olarak ARM'nin birkaç özel konumlardaki endüktans değerlerinin bilinmesi gerekir. Bilinmesi gereken bu değerler Denklem 5.5-5.9'da verilmiştir (Zhou ve ark., 2005; Ding ve Liang, 2008).

$$L_a(i) = L(0, i) \quad (5.5)$$

$$L_m(i) = L\left(\frac{\pi}{2N_r}, i\right) \quad (5.6)$$

$$L_u(i) = L\left(\frac{\pi}{N_r}, i\right) \quad (5.7)$$

$$L_i(i) = L\left(\frac{\pi}{3N_r}, i\right) \quad (5.8)$$

$$L_j(i) = L\left(\frac{2\pi}{3N_r}, i\right) \quad (5.9)$$

N_r rotor kutup sayısı olmak üzere Denklem 5.5-5.9'da 5 farklı rotor konumundaki endüktans değerleri ifade edilmiştir. Bu değerler bulunduktan ya da ölçüldükten sonra Denklem 5.10'dan hesaplanabilir.

$$\begin{cases} L_0(i) = \frac{1}{6}L_a(i) + \frac{1}{3}L_i + \frac{1}{3}L_j(i) + \frac{1}{6}L_u(i) \\ L_1(i) = \frac{1}{3}L_a(i) + \frac{1}{3}L_i(i) - \frac{1}{3}L_j(i) - \frac{1}{3}L_u(i) \\ L_2(i) = \frac{1}{4}L_a(i) - \frac{1}{2}L_m(i) + \frac{1}{4}L_u(i) \\ L_3(i) = \frac{1}{6}L_a(i) - \frac{1}{3}L_i(i) + \frac{1}{3}L_j(i) - \frac{1}{6}L_u(i) \\ L_4(i) = \frac{1}{12}L_a(i) - \frac{1}{3}L_i(i) + \frac{1}{2}L_m(i) - \frac{1}{3}L_j(i) + \frac{1}{12}L_u(i) \end{cases} \quad (5.10)$$

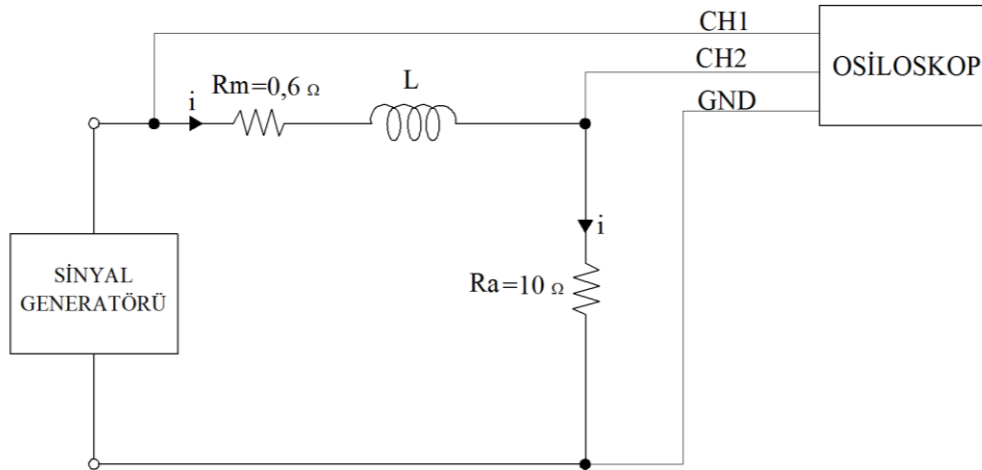
Denklem 5.10'daki matematiksel ifade Denklem 5.11'deki gibi matrissel formda ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} L_0 \\ L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/6 & 1/3 & 0 & 1/3 & 1/6 \\ 1/3 & 1/3 & 0 & -1/3 & -1/3 \\ 1/4 & 0 & -1/2 & 0 & 1/4 \\ 1/6 & -1/3 & 0 & 1/3 & -1/6 \\ 1/12 & -1/3 & 1/2 & -1/3 & 1/12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_a \\ L_i \\ L_m \\ L_j \\ L_u \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Bu çalışmada $L_0 = L_{\min}$, $L_1 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2}$ denklemlerinden faydalanılarak

ST-ARM'nin endüktans modellemesi için ilk olarak kullanılacak parametrelerin değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için bazı ölçümlerin yapılarak belirlenen konumlar için ARM'nin endüktans değerleri belirlenmelidir.

Bu çalışmada 5 fazlı U tipli Segmental Rotorlu 10/8 Segmental Tip Anahtarlama Relüktans Motorun endüktans dağılımı CHY41 LCRmetre ile belirlenmiştir. LCRmetre ile ölçülen değerleri doğrulamak için Şekil 5.4'de verilen deney düzeneği ile motorun sargılarına AC sinyal uygulanmış, akım ve gerilim değişimleri Rigol Marka DS1102E kodlu dijital osiloskop ile ölçülmüştür. Ölçülen değerler arasındaki faz farkından faydalanarak motorun o konum için endüktans değeri belirlenmiş ve LCRmetredeki değerle karşılaştırılmıştır.

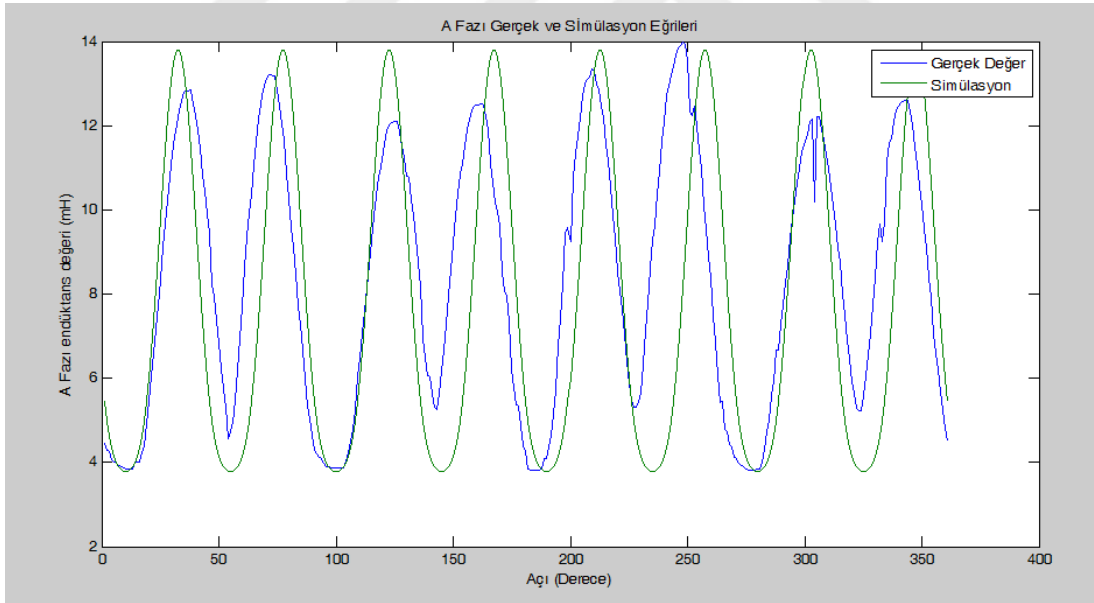


Şekil 5.4. Faz endüktansının belirlenmesi için osiloskop bağlantısı

ST-ARM'nin herhangi bir konumundaki endüktans değeri ilk olarak LCRmetre ile ölçülmüştür. Herhangi bir nokta için LCRmetreden 120 Hz'de okunan değer 2.22 mH'dir. Şekil 5.4'deki bağlantı gerçekleştirilerek akım gerilim arasındaki faz farkı

8^0 olarak osiloskopta ölçülmüştür. Sinyal jeneratöründen verilen AC sinyalin frekansı 111 Hz olarak belirlenmiştir. Motordan alınan değerlerden faydalanılarak $\tan\varphi = \frac{2\pi fL}{R} \Rightarrow 0,1405 = \frac{2\pi 111 L}{10.6} \Rightarrow L = 2.135mH$ olarak hesaplanabilir. Bu işlem birkaç farklı rotor konumunda gerçekleştirilmiş ve LCRmetre ile okunan değerleri doğrulanmıştır. LCRmetre kullanılarak bir faz için 1^0 'lik açılarla 360^0 'ye kadar endüktans değeri okunmuş ve kaydedilmiştir.

Denklem 5.4'deki ifadedeki katsayılar LCRmetre ile ölçülen değerlerden $L_0 = 3.79 mH$, $L_1 = 4.605 mH$, $L_2 = 1 mH$, $L_3 = 0 mH$ olarak belirlenmiştir. L_3 değeri çok küçük çıktığından bu çalışmada 0 olarak kabul edilmiştir. ST-ARM'nin tasarımının gerçekleştirildiği çalışmadaki endüktansın akım ve konuma göre değişimini gösteren eğriden a değeri 2.68 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.5'de bir faz için (A fazı için) 0-360⁰ LCRmetre ile ölçülen değerler ve Denklem 5.4'deki Fourier serisi kullanılarak gerçekleştirilen endüktans modellemesi verilmiştir.



Şekil 5.5. Simülasyon ve gerçek endüktans eğrileri

Modellemenin doğruluğu

Doğruluk hesaplanan değerin ölçülen değere ne kadar yakın olduğunu gösteren bir değerdir. Her bir veri değeri için ölçülen değerle hesaplanan ya da tahmin edilen değer arasındaki hata değerini belirlemek için Denklem 5.12 kullanılır.

$$\delta_i = \frac{|R_a - R_a^0|}{R_a} * 100 \quad (5.12)$$

Burada δ_i , her bir verinin hatası, R_a , tahmin sonuçları, R_a^0 , deneysel sonuçlar, i , veri numarasını ifade etmektedir.

Tüm modelin ortalama hatasını belirlemek için Denklem 5.13'deki ifade kullanılabilir (Terzioğlu H. ve ark., 2013).

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (5.13)$$

Burada Δ Modelin ortalama hatasını, n ise veri sayısını ifade etmektedir.

Şekil 5.5'deki endüktans eğrisinde fazın aktif olduğu durumdaki gerçek değerler ile simülasyon değerleri kullanılarak Denklem 5.12 ve Denklem 5.13 yardımıyla Fourier serisi ile gerçekleştirilen modellemenin %73 oranında doğru olduğu belirlenmiştir. Fakat ST-ARM'de bir faz sadece belirli açılarda enerjili olacağından, A fazının Şekil 5.1'de görüldüğü gibi enerjili kaldığı 18^0 - 36^0 arasında doğruluk oranı %89.6 olarak hesaplanmıştır. Bu oran ST-ARM'nin fabrikasyon üretim olmamasından kaynaklanmaktadır.

5.1.2. ST-ARM'nin doğrusal olmayan matematiksel modeli

Manyetik histerezis kaybı, Eddy akım kaybı ve faz sargısı ortak endüktans ihmal edilerek ARM'nin matematiksel ifadeleri Denklem 5.14 ve Denklem 5.15'da verilmiştir (Nagel ve Lorenz, 2000).

$$V_k = R_k \cdot i_k + \frac{d\psi_k(\theta, i_k)}{dt} \quad (5.14)$$

Faz sargısı ortak endüktansı ihmal edildiğinde, ψ_k yalnızca faz başına sargının rotor konumu θ ve akımı i_k 'nin fonksiyonu değil, Denklem 5.15'deki gibi faz başına sargı endüktansı L_k ve akımı i_k 'nin çarpımına eşittir.

$$\psi_k = \psi(i_k, \theta) = L_k(\theta, i_k) i_k \quad (5.15)$$

Denklem 5.15'deki ifade Denklem 5.14'de yerine yazılırsa Denklem 5.16 elde edilir (Cui ve ark., 2005).

$$V_k = R_k i_k + \frac{\partial \psi_k}{\partial i_k} \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (5.16)$$

Denklem 5.16'daki ifade Denklem 5.17 şeklinde yazılabilir (Cui ve ark., 2005).

$$V_k = R_k i_k + \left(L_k + i_k \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \right) \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (5.17)$$

Motorun rotor konumu, açısal hıza Denklem 5.18'deki gibi dönüştürülebilir.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (5.18)$$

Bu durumda Denklem 5.18'deki ifade Denklem 5.17'de yerine yazılırsa ARM'nin eşdeğer devresinin matematiksel modeli olan Denklem 5.19'daki ifade elde edilir.

$$V_k = R_k i_k + \left(L_k + i_k \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \right) \frac{di_k}{dt} + \omega i_k \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \quad (5.19)$$

Denklem 5.19'da kaynak geriliminin, 3 gerilim düşümünün toplamına eşit olduğu görülmektedir. k faz devresini göstermek üzere birinci gerilim düşümü direnç üzerindeki gerilim düşümü, ikinci gerilim düşümü akım değiştiği için değişen akının sebep olduğu dönüşüm (transformer) elektromotor kuvveti, üçüncü ise direkt olarak rotor konumu değiştiği için değişen akı değişiminin sebep olduğu ARM'nin elektromekanik enerjisi ile ilgilidir (Cui ve ark., 2005).

ARM'nin bir fazının tork ifadesi Denklem 5.20'de verilmiştir.

$$T_{e_k} = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{dL_k(\theta, i_k)}{d\theta} \quad (5.20)$$

ARM'lerde m faz sayısı olmak üzere motorda üretilen toplam elektriksel tork Denklem 5.21'deki gibi hesaplanabilir.

$$T_e = \sum_{k=1}^m T_{e_k} \quad (5.21)$$

ARM'nin mekanik modellemesi ise Denklem 5.22'deki gibi hesaplanabilir.

$$T = T_e - T_y = J \frac{d\omega}{dt} + b\omega \quad (5.22)$$

Denklem 5.22'daki ω açısal hızı, T_L yük torkunu, b sürtünme katsayısını, J atalet momenti katsayısını ifade etmektedir. Motorun açısal hızı rotor konum açısına Denklem 5.23'deki gibi dönüştürülebilir.

$$\theta = \frac{d\omega}{dt} \quad (5.23)$$

5 fazlı 10/8 ST-ARM'nin modellenmesi için yapılan varsayımlar aşağıdaki gibidir.

- Ana devrenin DC voltaj değeri sabit tutulmuştur.
- Demir çekirdeğin eddy ve histerezis etkileri yani demir kayıpları ihmal edilmiştir.
- Her fazın parametreleri simetriktir ve fazlar arasında ortak endüktans yok sayılmıştır.

Bu durumda ST-ARM modellenmesi için Denklem 5.19'daki ifadede akımın değişimini belirtecek şekilde düzenlenirse Denklem 5.24 elde edilir.

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{1}{i_f \frac{\partial L_k(\theta, i_k)}{\partial i_k} + L_k(\theta, i_k)} \left[-R_k i_k - \omega i_k \frac{\partial L_k(\theta, i_k)}{\partial \theta} + V_k \right] \quad (5.24)$$

Denklem 5.24'deki ifadenin matematiksel çözümünü yapabilmek için Denklem 5.25-5.27'deki ifadelerden yararlanılabilir (Cui ve ark., 2005).

$$L_k = L_0 + \left\{ (L_1 + L_3) \left[1 - \cos(N_r \theta - \varphi_{0_k}) \right] + L_2 \left[\cos 2(N_r \theta - \varphi_{0_k}) - 1 \right] + L_3 \left[\cos 3(N_r \theta - \varphi_{0_k}) - 1 \right] \right\} \frac{a}{a + i_k} \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial L_k}{\partial \theta} = \left[(L_1 + L_3) N_r \sin(N_r \theta - \varphi_{0_k}) - 2L_2 N_r \sin 2(N_r \theta - \varphi_{0_k}) - 3L_3 N_r \sin 3(N_r \theta - \varphi_{0_k}) \right] \frac{a}{a + i_k} \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial L_k}{\partial i_k} = \left\{ (L_1 + L_3) \left[1 - \cos(N_r \theta - \varphi_{0_k}) \right] + L_2 \left[\cos 2(N_r \theta - \varphi_{0_k}) - 1 \right] + L_3 \left[\cos 3(N_r \theta - \varphi_{0_k}) - 1 \right] \right\} \frac{-a}{(a + i_k)^2} \quad (5.27)$$

Ayrıca ARM'deki tork ifadesi Denklem 5.20 ile hesaplanabildiği gibi Denklem 5.28'deki ifade ile de hesaplanabilir

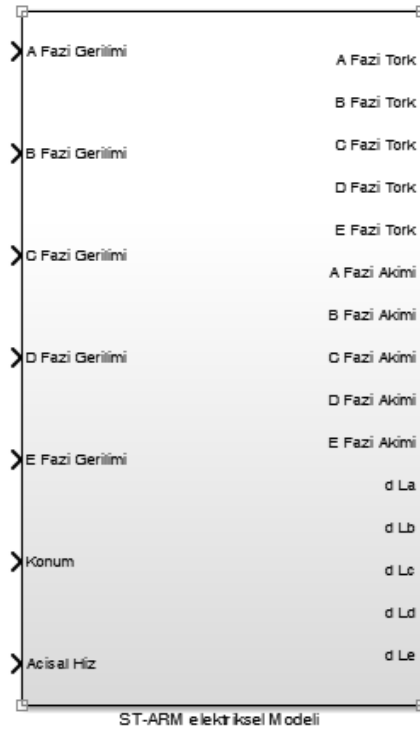
$$T_{e_k} = a \left[i_k - a \ln(a + i_k) + a \ln a \right] \left[(L_1 + L_3) N_r \sin(N_r \theta - \varphi_{0_k}) - 2L_2 N_r \sin 2(N_r \theta - \varphi_{0_k}) - 3L_3 N_r \sin 3(N_r \theta - \varphi_{0_k}) \right] \quad (5.28)$$

Denklem 5.24-5.28'deki $k=1, 2, 3, 4, 5$ 'dir. φ_{0_k} değerleri Denklem 5.29'da verilmiştir.

$$\varphi_{0_k} = \begin{cases} 0 & j=1 \\ 2\pi/5 & j=2 \\ 4\pi/5 & j=3 \\ 6\pi/5 & j=4 \\ 8\pi/5 & j=5 \end{cases} \quad (5.29)$$

Denklem 5.24-5.29'daki matematiksel ifadeler kullanılarak gerçekleştirilen matematiksel modelleme diğer modelleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında bu model daha basittir (Cui ve ark., 2005). Bundan dolayı bu tez çalışmasında ARM'nin dinamik performansı için bu model kullanılmıştır.

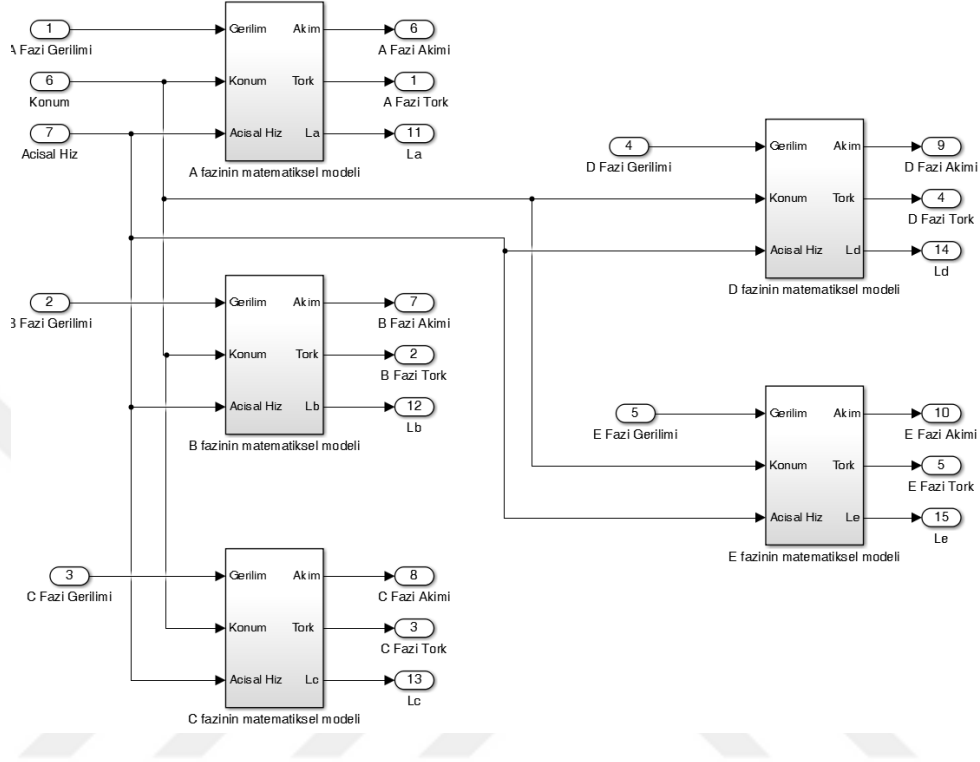
Bu tez çalışmasında ST-ARM'nin modellenmesi için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. ST-ARM'nin dinamik modeli Denklem 5.24-5.29 ifadeleri kullanılarak Simulinkte Şekil 5.6'daki gibi bir blok oluşturulmuştur. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi 5 fazlı olan ST-ARM'nin her bir fazı için gerilim sinyali, konum ve hız bilgileri motorun giriş sinyallerini oluştururken, her bir faza ait akım, tork ve endüktans bilgileri de çıkış sinyali olarak belirlenmiştir. Oluşturulan Simulink modeli ile ST-ARM'nin matematiksel modelinin doğruluğu ispatlandıktan sonra bu modelin matematiksel ifadeleri sezgisel algoritmalarda kullanılmıştır.



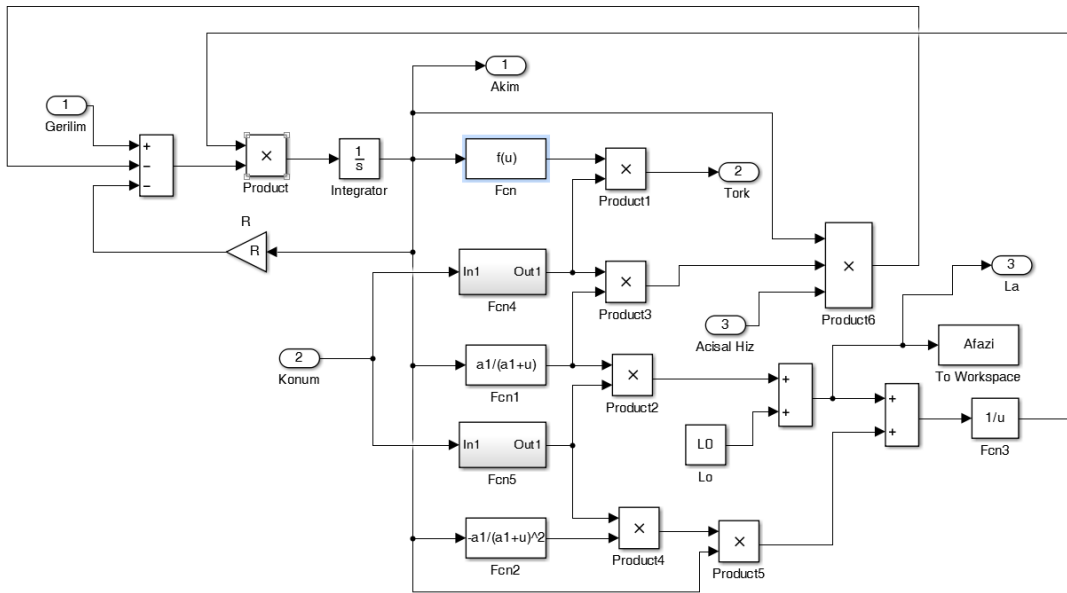
Şekil 5.6. ST-ARM'nin 5 faz simulink dinamik model bloğu

Şekil 5.7'de ST-ARM'nin 5 faz Simulink dinamik model bloğunun içerişi görülmektedir. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi burada 5 faz ayrı ayrı modellenmiştir. Modellenen fazlar arasındaki matematiksel olarak fark, Denklem 5.29'daki fazlar

arasındaki açı değerin Denklemler 5.24-5.27'deki ifadelerde değişmesidir. Bundan dolayı sadece bir faza ait modelin bloğu Şekil 5.8'da verilmiştir.



Şekil 5.7. ST_ARM'nin 5 faz simulink dinamik modeli

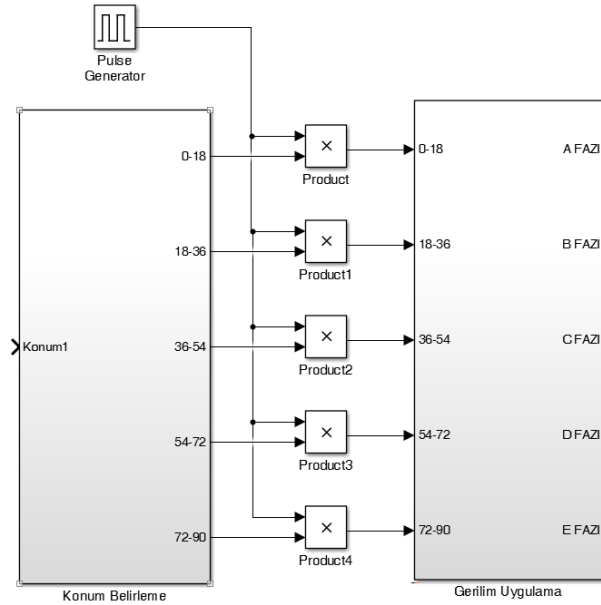


Şekil 5.8. ST_ARM'nin 1 faz simulink dinamik modeli

Bu tez çalışmasında kullanılan motora ait fazların enerjilendirilme sırası Çizelge 5.1’de verilmiştir. Matlab/Simulinkte oluşturulan kontrol bloğu Şekil 5.9’da verilmiştir.

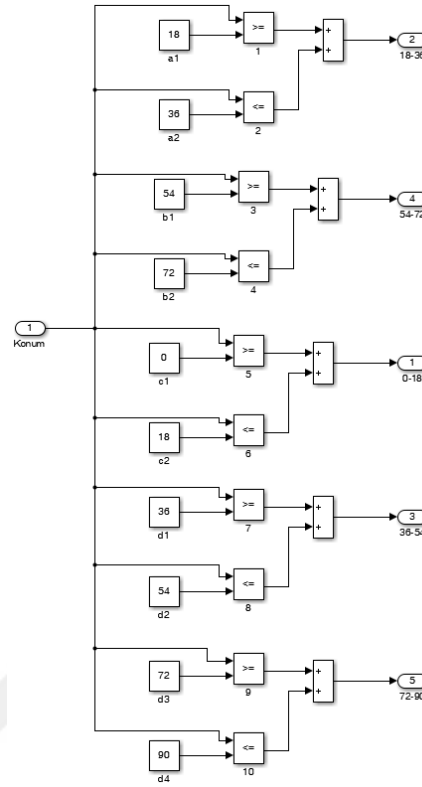
Çizelge 5.1. ST-ARM faz enerjilendirme sırası

	0-18	18-36	36-54	54-72	72-90
A Fazı	0	+	0	-	0
B Fazı	-	0	0	+	0
C Fazı	+	0	-	0	0
D Fazı	0	0	+	0	-
E Fazı	0	-	0	0	+

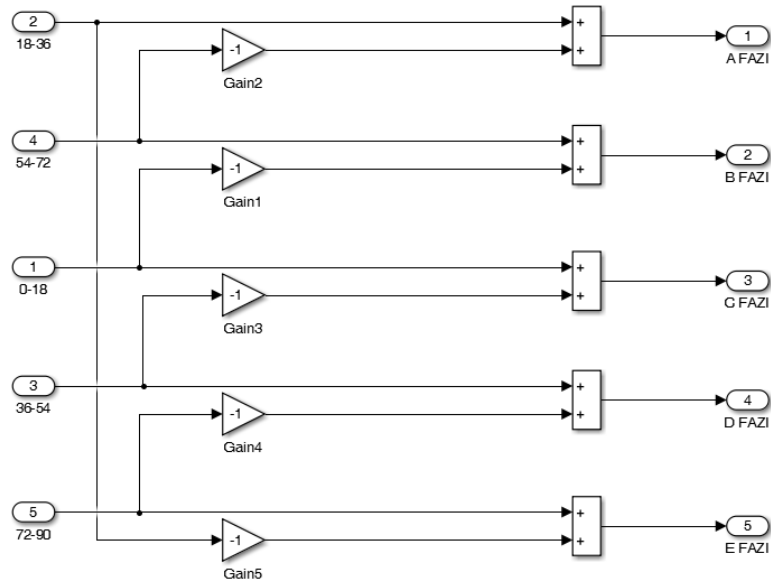


Şekil 5.9. Faz enerjilendirme kontrol bloğu

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi faz enerjilendirme bloğu iki bloktan oluşmaktadır. Konum belirleme bloğu rotorun konumuna göre sinyal üretmek için Şekil 5.10’da görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Gerilim uygulama bloğu ise ST-ARM faz sargılarına gerilim uygulamak için Şekil 5.11’deki gibi tasarlanmıştır.

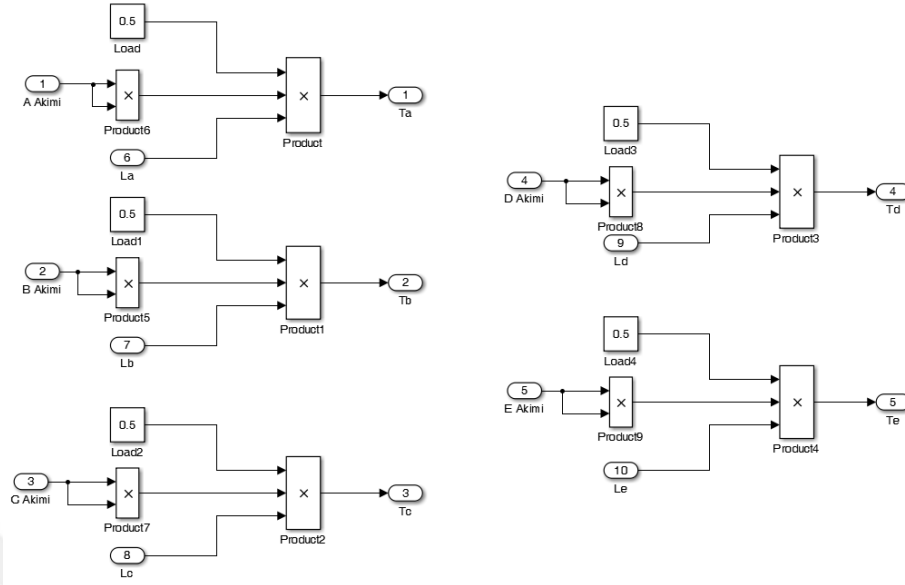


Şekil 5.10. Konum belirleme bloğu



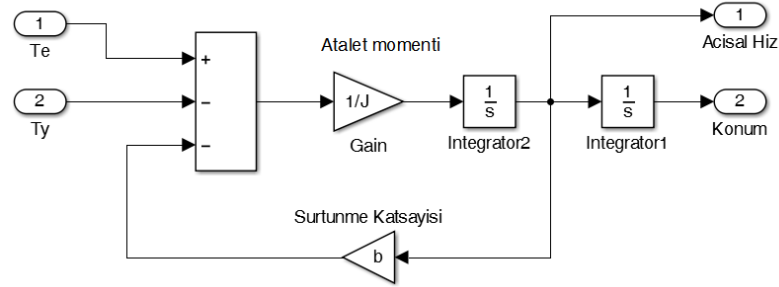
Şekil 5.11. Gerilim uygulama bloğu

ST-ARM'de üretilen tork değeri Denklem 5.20'den hesaplanmıştır. Tork değerinin hesaplandığı blok Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12. ST-ARM için tork bloğu

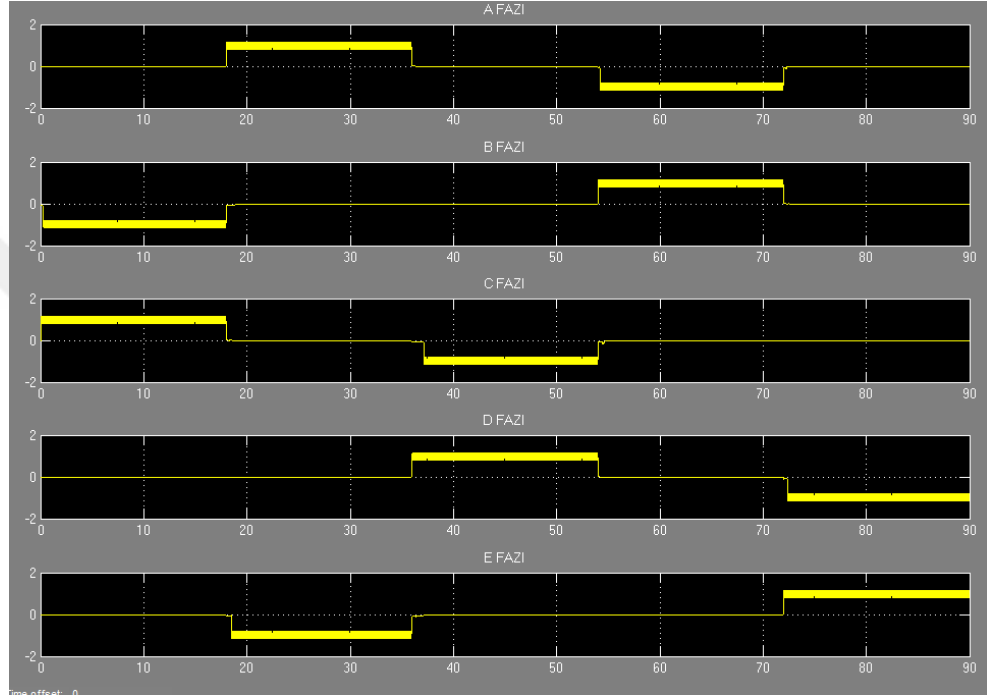
ST-ARM'nin mekanik modellemesi için oluşturulan Simulink modeli Şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5.13. ST-ARM'nin mekaniksel modeli

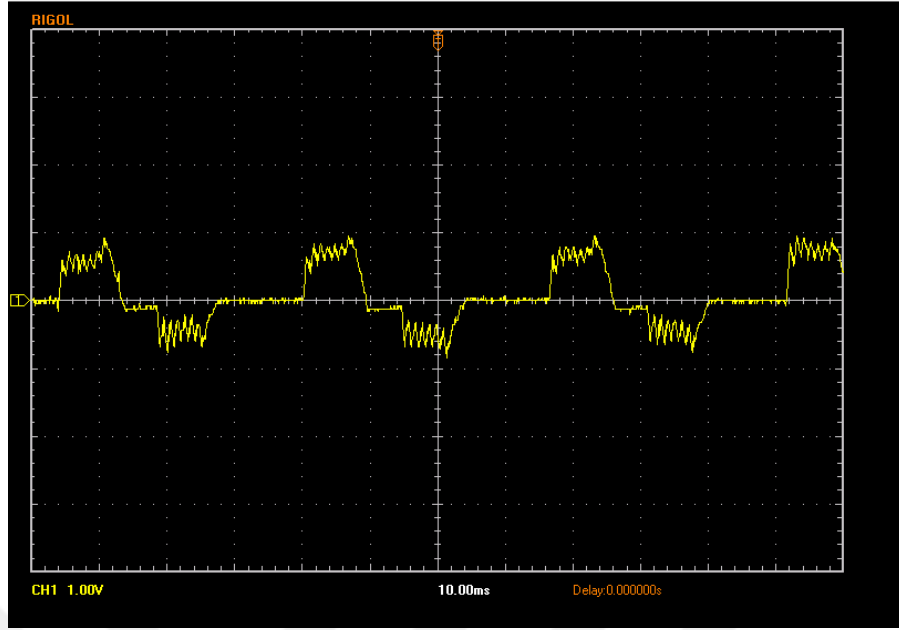
Şekil 5.6-5.13'deki bloklardan oluşan ST-ARM'nin Simulink blok şeması Şekil 5.14'de verilmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak ST-ARM'ye 50 V uygulanmıştır. Bu değerin seçilmesinin nedeni ST-ARM'nin yüksüz çalışmada ortalama bu gerilim değerlerinde çalıştırılmış olmasıdır. ST-ARM'nin yüksüz çalışma simülasyonu sonucu faz sargılarındaki akım eğrileri Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekil 5.16'daki akımlarla çalışan ST-ARM ortalama 2.45A'lık bir akımla çalışmıştır.



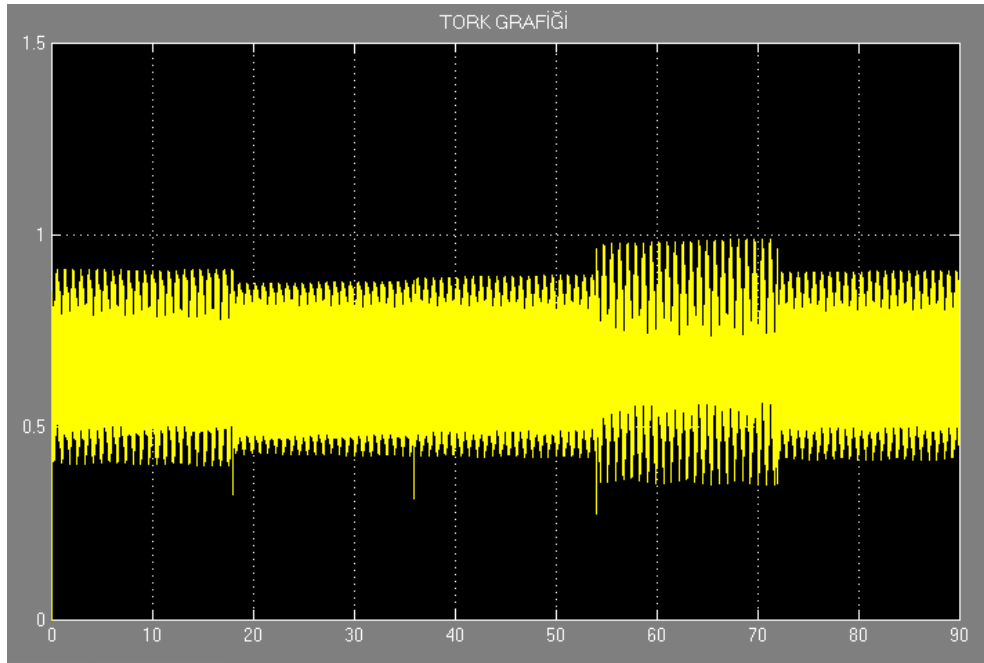
Şekil 5.16. ST-ARM simülasyon yüksüz çalışmadaki akım eğrileri

ST-ARM simülasyonu gerçekleştirilen koşullarda çalıştırıldığında motorun 50V'da 2.6 A'de 447 d/dk döndüğü görülmüştür. ST-ARM'nin bu çalışmadaki bir faz akım eğrisinin osiloskop görüntüsü Şekil 5.17'de verilmiştir. Şekil 5.17 incelendiğinde Şekil 5.16'daki bir fazın akım eğrisi ile Şekil 5.17'deki osiloskop görüntüsü birbirine şekilsel olarak büyük oranda benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.17. ST-ARM bir faz akım grafiğinin osiloskop görüntüsü

Şekil 5.16'daki akımla çalışan ST-ARM'nin tork grafiği Şekil 5.18'de verilmiştir. Şekil 5.18'deki grafikten motorun ortalama torku 0.8 Nm ve tork salınımının da %46.21 olduğu hesaplanmıştır.

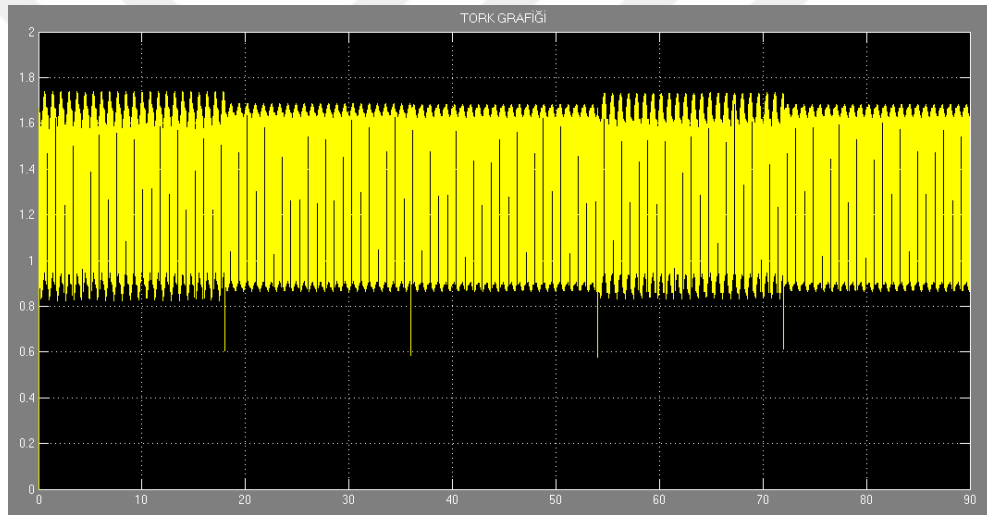


Şekil 5.18. ST-ARM simülasyonunda yüksüz çalışmadaki tork eğrisi

ST-ARM motor konum sensörleriyle kontrol edilirken 45 V gerilimde motorun 2.4 A akım çektiği ve 0.868 Nm'lik tork ürettiği sensörlerden ölçülmüştür. Bu, simulink modelinin akım değerinde ortalama %10.74, tork değerinde ise %8.5 bir hata yaptığı anlamına gelmektedir. Bunun da endüktans modellenmesindeki hatadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Aynı çalışma koşulları için simulink modelinde gerilim değeri 65 V'a yükselttilip motor 50 W'lık bir yük ile çalıştırıldığında akımın ortalama değeri 3.38 A olmaktadır. Bu durumda elde edilen tork grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir.

Şekil 5.19'daki tork grafiği incelendiğinde, ortalama tork değerinin 1.45 Nm ve tork salınımlarının da %51.69 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.19. ST-ARM simülasyonunda yüklü çalışmadaki tork eğrisi

ST-ARM 50 W'lık yük altında deneysel olarak çalıştırıldığında, 75 V gerilimde 3.6 A akımla, 1.54 Nm'lik tork üretmiştir. Torktaki salınım oranı %55.46 olarak hesaplanmıştır. Buna göre yüklü çalışmadaki simülasyon sonuçları akım değerinde %6.5, tork değerinde %6.2 ve tork salınımlarında %7.3 oranında hata ile gerçekleşmiştir.

MATLAB/Simulink modeli, m-file ile gerçekletirilecek modellemeye oranla daha pratik ve yazılımcı hatasının daha az olduğu bir matematiksel modellemedir. Bundan dolayı ST-ARM'nin MATLAB/Simulink modeli tez çalışmasında sezgisel algoritmalarda kullanılacak fonksiyonların doğruluğunu belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

5.2. Sezgisel Algoritmalar Kullanılarak ST-ARM'nin Tetikleme Açılarının Belirlenmesi

Sezgisel algoritmalar son zamanlarda özellikle bilgisayar bilimlerinde problem çözme yöntemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sezgisel algoritmalarda problemin en iyi çözümünün bulunması garanti değildir ancak en hızlı ve en kısa yoldan en iyiye yakın bir çözüm üretirler. Bu da sezgisel algoritmaların yaygın olarak kullanılmasının nedenlerindendir.

Bu tez çalışmasında sezgisel algoritmalar içerisinde yer alan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmış ve yazılımlar Matlab programında gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. PSO ve DGA Yazılımı Performans Değerlendirmesi

PSO ve DGA için hazırlanan yazılımın tez çalışmasında kullanılmadan önce bilinen fonksiyonlar üzerinde denenmesi ve performansının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı literatürde bilinen bazı fonksiyonlar kullanılarak PSO ve DGA algoritmaları denenmiş ve yazılımın doğruluğu ispatlanmıştır. Matlab'da hazırlanan yazılımların doğruluğunu denetlemek için Çizelge 5.2'de görülen Benchmark fonksiyonları ve basamak fonksiyonundan oluşan bir test fonksiyon grubu oluşturulmuştur.

Çizelge 5.2. Test Fonksiyonları

Fonksiyon No	Fonksiyon Adı	Fonksiyon	Sınırlar
F1	Sphere	$F_1 = \sum_{i=1}^4 x_i^2$	$[-150, 75]$
F2	Rosenbrock	$F_2 = \sum_{i=1}^4 \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right]$	$[-50, 25]$
F3	Rastrigin	$F_3 = \sum_{i=1}^4 \left[10 + x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) \right]$	$[-50, 25]$
F4	Griewank	$F_4 = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^4 x_i^2 - \prod_{i=1}^4 \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i+1}}\right)$	$[-500, 250]$
F5	Basamak	$F_5 = \sum_{i=1}^5 \text{int}(x_i)$	$[-5.12, 5.1]$

Çizelge 5.2'deki test fonksiyonlarındaki matematiksel ifadeler PSO ve DGA'da denenmiştir (Özsağlam ve Cunkaş, 2008; Kiranyaz ve ark., 2014; Erdoğan P. ve Yalcin, 2015).

PSO ve DGA yazılımında kullanılan parametre değerleri test fonksiyonlarının çözümünde değiştirilmemiştir. Belirlenen bu değerler Çizelge 5.3'de verilmiştir. PSO ve DGA sezgisel algoritmalar 1000 iterasyon için çalıştırılmıştır. PSO'da öğrenme faktörleri değiştirilerek iki algoritma, DGA'da ise çaprazlama oranı ve ölçekleme faktörü değiştirilerek iki algoritma oluşturulmuştur. Bundan dolayı PSO algoritmaları PSO_1 ve PSO_2 olarak; DGA'lar da DGA_1 ve DGA_2 olarak isimlendirilmiştir. Parametre değişikliklerinin PSO ve DGA'nın performansları üzerindeki etkileri de belirlenebilecektir. Sezgisel algoritmalarından PSO_2 ve DGA_2 yazılımında farklı parametre değerleri olarak daha önceki çalışmalarda yaygın olarak kullanılan Çizelge 5.3'de görülen değerler tercih edilmiştir (Keskintürk, 2006; Karaboğa, 2014). DGA_1 ve PSO_1'de kullanılan parametre değerleri ise yapılan akademik çalışmalar incelendiğinde başarılı olabileceği düşünülen değerlerdir (Eker, 2005; Delice, 2008; Özsağlam ve Cunkaş, 2008; Akbulut, 2009; Arslan, 2010; Demirci, 2011; Eldem, 2014; Güvengir, 2014; Erdoğan P. ve Yalcin, 2015).

Çizelge 5.3. PSO ve DGA parametre değerleri

	PSO			DGA	
	PSO_1	PSO_2		DGA_1	DGA_2
Parçacık Sayısı	100	100	Popülasyon Boyutu	100	100
Öğrenme Faktörü (C_1)	1.5	2	Çaprazlama oranı	0.8	0.75
Öğrenme Faktörü (C_2)	1.5	2	Ölçekleme Faktörü	0.8	1.5

Sezgisel algoritmalarda algoritmanın bir defa çalıştırılması ve bir sonuç üretmesi yerine, algoritma defalarca çalıştırılarak elde edilen sonuçların ortalaması sonuç olarak kabul edilmektedir. Bundan dolayı PSO ve DGA algoritmaları 20 defa çalıştırılmış ve ortalamaları sonuç olarak belirlenmiş ve Çizelge 5.4'de verilmiştir. Test fonksiyonları için daha önceki çalışmalarda gerçekleştirilen küresel minimum çözümleri de Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Test Fonksiyonlarının Çözümleri

Algoritma Fonksiyonları	Küresel Minumun Değerleri	PSO_1 Çözümleri	PSO_2 Çözümleri	DGA_1 Çözümleri	DGA_2 Çözümleri
F1	0	1.65E-9	2.65E-8	2.7E-210	3.52E-195
F2	0	4.78E-7	6E-4	0	0
F3	0	5.65E-5	14.8E-2	24E-5	77.5E-4
F4	0	3.86E-3	4.85E-3	2.98E-3	4.36E-2
F5	-30	-30.00372	-30.05426	-30	-30.00005

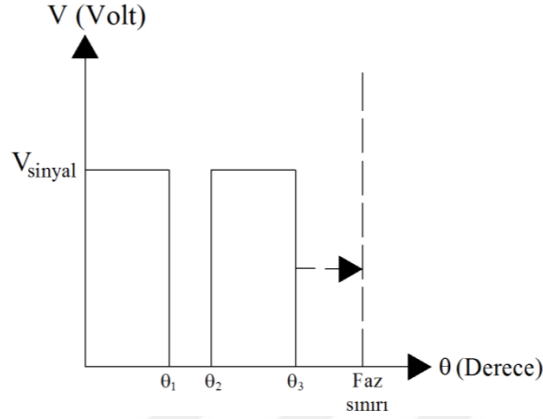
Çizelge 5.4’de görüldüğü gibi PSO ve DGA sezgisel algoritmaların performansları test fonksiyonları ile değerlendirildiğinde başarılı bir sonuç elde edilmiştir. Çizelge 5.4’de görüldüğü gibi DGA, PSO’ya oranla daha doğru bir değer üretmiştir. Yapılan çalışmalarda PSO’nun DGA’dan daha küçük iterasyonda çözüm ürettiği görülmüştür. Bu da PSO’nun lokal minumuma takılmış olması, DGA’nın ise global minumuma ulaştığı şeklinde ifade edilebilir. Çözüme ulaşılan iterasyon sayısı bakımında Çizelge 4.3 incelendiğinde test fonksiyonlarının çözümünde, DGA’nın PSO’dan daha kısa sürede çözüme ulaştığı görülmektedir.

5.2.2. PSO ve DGA ile ST-ARM’nin Tetikleme Açılarının Optimizasyonu

Matlab’da gerçekleştirilen yazılımların uygun sonuçlar ürettiği test fonksiyonlarıyla denenerek görülmüştür. Sezgisel algoritmaların performansını belirleyen en önemli unsurlardan birisi de optimize edilecek sistemin en doğru şekilde modellenmesidir. ST-ARM’nin gerçekleştirilen matematiksel modeli Matlab/Simulink sonuçlarından görüldüğü gibi gerçeğe yakın bir modeldir.

Bu tez çalışmasında, faz sargılarının enerjili kaldığı durumda, sinyalin iletim ve kesim süreleri ayarlanarak torktaki salınım değerlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Burada açısız olarak hangi sinyallerin kullanılması gerektiği PSO ve DGA algoritmaları kullanılarak optimize edilmiştir. Şekil 5.20’de görüldüğü gibi bir tetikleme sinyalinin bir faza uygulandığı düşünülmüştür. Şekilde görülen 3 farklı konum değeri optimize edilmiştir. Bu da algoritmalarındaki değişken sayısının 3 olması anlamı taşımaktadır. Değişken sayısının artırılması akımın istenilen değere yükselmesini zorlaştıracığı için değişken sayısı 3 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.20’deki faz sınırı Çizelge 5.1’deki her fazın bitiş konumu olarak belirlenmiştir. Sezgisel algoritmalarda değişken sınırları

akımın yükselme ve düşme zamanı dikkate alınarak $4 \leq \theta_1 \leq 8$, $8 \leq \theta_2 \leq 13$, $13 \leq \theta_3 \leq 17$ olarak belirlenmiştir.



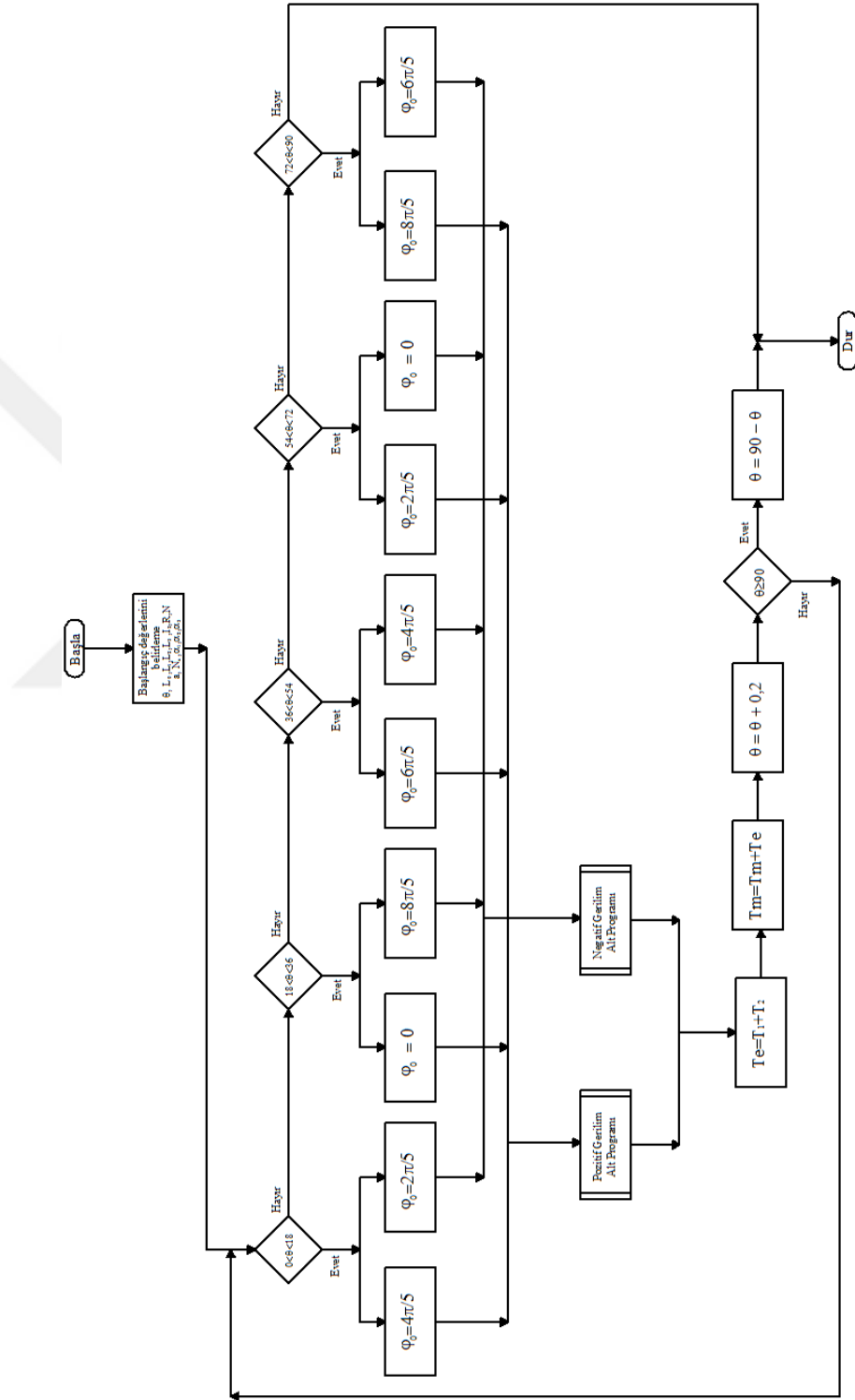
Şekil 5.20. Bir faz tetikleme sinyali

Sezgisel algoritmalarda değişkenler belirlendikten sonra, amaç fonksiyonunun da doğru belirlenmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında amaç fonksiyonu olarak Denklem 5.21'deki tork salınımlarının formülü belirlenmiştir. Buradaki tork değerleri Denklem 5.21-5.30'daki ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır.

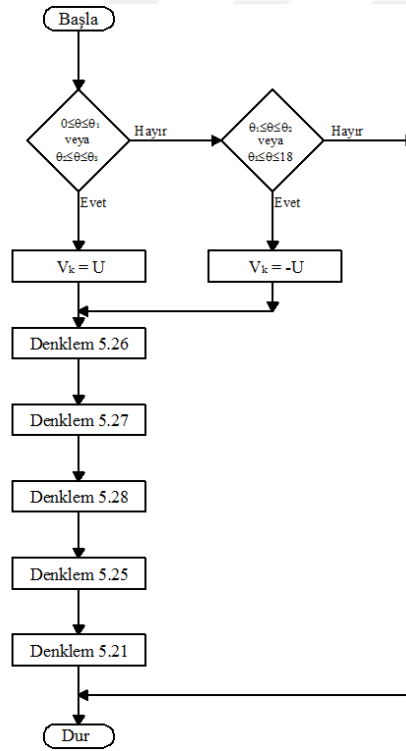
$$\%T_{\text{salınım}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{ort}}} \cdot 100 \quad (5.31)$$

Denklem 5.31'deki amaç fonksiyonunda hesaplama yapabilmek için Şekil 5.22'deki gibi ST-ARM'nin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.22'de görüldüğü gibi ilk olarak ST-ARM'ye ait sabit değerleri ve başlangıç koşulları belirlenmiştir. $L_0 = 3.79 \text{ mH}$, $L_1 = 4.605 \text{ mH}$, $L_2 = 1 \text{ mH}$, $L_3 = 0 \text{ mH}$, $a=2.68$, $N_r=8$ olarak belirlenirken akımın değeri ve rotor konumu sıfır olarak kabul edilmiştir. Şekil 5.22'de görüldüğü gibi 90° için Çizelge 5.1'deki gibi faz sargılarının enerjili kalma durumları belirlenmiştir. ST-ARM'nin konumuna göre φ_0 değerleri belirlendikten sonra pozitif ve negatif alt programların içerisinde işlemlerin sonucunda tork değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 5.22'de görüldüğü gibi bu işlem 0.2° 'lik adımlarla gerçekleştirilmiştir. ST-ARM'nin konumunun belirlenmesi için kullanılacak enkoderin

3600 puls'lik olmasından dolayı hassasiyetin iki katı olan 0.2^0 'lik açı değeri belirlenmiştir. Şekil 5.22'deki algoritma 1080 derece için gerçekleştirilmiştir.



ST-ARM bipolar olarak kontrol edildiğinden dolayı, bir faz sargısından pozitif yönlü akım geçerken diğer faz sargısından aynı anda negatif yönlü bir akım geçmektedir. Bundan dolayı Şekil 5.22’de görüldüğü gibi pozitif ve negatif yönde akımların geçişini modellemek için aynı isimlerin verildiği alt programlar kullanılmıştır. Pozitif ve negatif alt programlarda her faz için sadece φ_0 değerleri farklı olacak şekilde ayrı bir modelleme gerçekleştirmiştir. Bunun dışında pozitif ve negatif alt programlardaki fark uygulanan gerilimin yön değiştirmesidir. Şekil 5.23’de pozitif alt program için ve bir faz için algoritma verilmiştir. Şekil 5.23’de Denklem 5.21’den her bir açış değeri için tork değerleri elde edilmektedir.

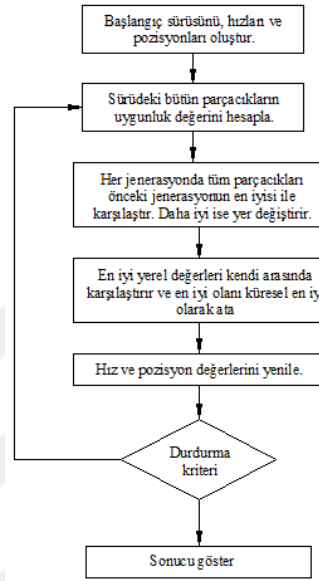


Şekil 5.23. ST-ARM’nin bir faz modeli

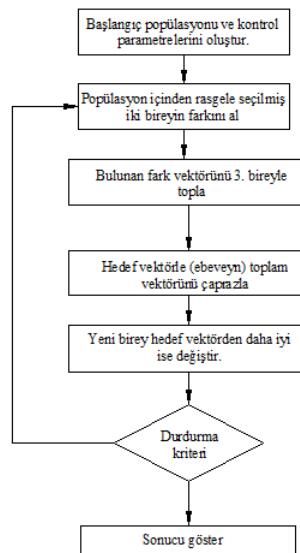
Bu tez çalışmasında ST-ARM’nin tork salınımlarının minimum yapılması hedeflenmektedir. Hedef olarak salınım değerinin “0” olarak belirlenmesi motora ait fiziksel ve elektriksel özelliklerden dolayı neredeyse imkansızdır. Bundan dolayı sezgisel algoritmalarda amaç en iyi çözüme yakın bir değer elde etmektir. Bu çalışmada algoritmayı durdurma koşulu, tork salınımlarının %10 olması ya da 1000 iterasyon olarak belirlenmiştir. Test fonksiyonları ile performansları denenen PSO ve DGA için Şekil

5.22'deki algorithmadan tork değerleri elde edilmiş ve üretilen değerler amaç fonksiyonunun belirlenmesi için gerekli verileri oluşturmuştur. Buradan elde edilen verilerden $T_{\max}$, $T_{\min}$, T_{ort} değerleri hesaplanarak Denklem 5.31'deki yerine yazılarak amaç fonksiyonu hesaplanmıştır.

PSO ve DGA'nın algorithmaları sırasıyla şekil 5.24 ve şekil 5.25'de verilmiştir.



şekil 5.24. PSO algoritması



şekil 5.25. DGA algoritması

Şekil 5.24'deki PSO algoritması 10'ar defa çalıştırılmıştır. PSO algoritmasında 2 farklı parametreden oluşan algoritmalarından PSO_1 ve PSO_2'den elde edilen tetikleme açısı değerleri Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. PSO optimizasyon sonuçları

Çalışma numarası	PSO_1				PSO_2		
	θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)		θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)
1	6	12.6	15.4		6.4	12	16
2	6.2	12.4	15.8		7	11.2	16.2
3	7.2	11.8	15.2		7.4	11.2	15
4	6	11.6	14.6		7.6	11	17
5	6.6	11	15		7.4	10.8	16.8
6	7	11.4	15.2		7	10.6	16.4
7	6.2	12.2	14.8		6.4	11	15.8
8	6.4	12	15		7.4	11	16.6
9	6.4	11.8	14.8		7.2	11.2	17
10	5.8	11	14.6		7.2	10.6	17.4

Çizelge 5.5'deki PSO_1 algoritmasından elde edilen açısal değerlerin ortalaması alındığında $\theta_1=6.38^0$, $\theta_2=11.78^0$, $\theta_3=15.04^0$ olarak hesaplanmıştır. Tetikleme açıları 0.2^0 'lik açılarla değiştiği için tetikleme açıları $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=12^0$, $\theta_3=15^0$ olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.5'deki PSO_2 algoritmasından elde edilen açısal değerlerin ortalaması alındığında $\theta_1=7.1^0$, $\theta_2=11.06^0$, $\theta_3=16.42^0$ olarak hesaplanmış ve tetikleme açıları $\theta_1=7.2^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=16.4^0$ olarak belirlenmiştir.

Optimizasyon sonucunda elde edilen değerlerle ST-ARM'nin modellenmesi çalıştırıldığında elde edilen tork salınımları Çizelge 5.6'da verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan PSO_1 algoritmasının PSO_2'ye göre daha iyi sonuç verdiği Çizelge 5.6'dan görülmektedir.

Çizelge 5.6. Optimizasyon sonuçlarının ortalaması ve tork salınımı

PSO_1				PSO_2			
θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)	$T_{salınım}$	θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)	$T_{salınım}$
6.4	12	15	%32.6	7.2	11	16.4	%33.4

DGA algoritmaları tez çalışmasında farklı parametre değerleriyle çalıştırılmış ve bunlar DGA_1 ve DGA_2 olarak ifade edilmiştir. DGA algoritmalarının çalıştırılmasıyla elde edilen tetikleme açı değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. DGA optimizasyon sonuçları

Çalışma numarası	DGA_1				DGA_2		
	θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)		θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)
1	6.4	11	14.8		6.6	11	14.8
2	6.2	10.4	15		6.4	10.8	14.6
3	6.8	10.2	14.8		6.8	10.8	14.4
4	6.4	10.6	14.6		6.4	11.2	14.6
5	6	10.4	15.2		7	11.6	14.8
6	6.2	10.8	15		6.8	11	14.2
7	6.2	11	15		7	10.8	14.6
8	6.4	10.6	14.8		6.6	10.6	14.2
9	6.8	10.4	15.2		6.8	11.4	14
10	6	10.6	15.4		6.8	11.2	14.2

Çizelge 5.7’deki DGA_1 algoritmasından elde edilen açısal değerlerin ortalaması alındığında $\theta_1=6.34^0$, $\theta_2=10.6^0$, $\theta_3=14.98^0$ olarak hesaplanmış ve tetikleme açıları $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=10.6^0$, $\theta_3=15^0$ olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.7’deki DGA_2 algoritmasından elde edilen açısal değerlerin ortalaması alındığında $\theta_1=6.72^0$, $\theta_2=11.04^0$, $\theta_3=14.44^0$ olarak hesaplanmış ve tetikleme açıları $\theta_1=6.8^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=14.4^0$ olarak belirlenmiştir.

DGA optimizasyon sonucunda elde edilen değerlerle ST-ARM’nin modellenmesi çalıştırıldığında elde edilen tork salınımları Çizelge 5.8’de verilmiştir. DGA_1’in DGA_2’ye göre daha iyi bir sonuç ürettiği Çizelge 5.8’den görülmektedir.

Çizelge 5.8. Optimizasyon sonuçlarının ortalaması ve tork salınımı

DGA_1				DGA_2			
θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)	$T_{salınım}$	θ_1 (Derece)	θ_2 (Derece)	θ_3 (Derece)	$T_{salınım}$
6.4	10.6	15	%26	6.8	11	14	%30.4

PSO ve DGA kullanılarak gerçekleştirilen iki optimizasyonun sonuçları Çizelge 5.9’da verilmiştir.

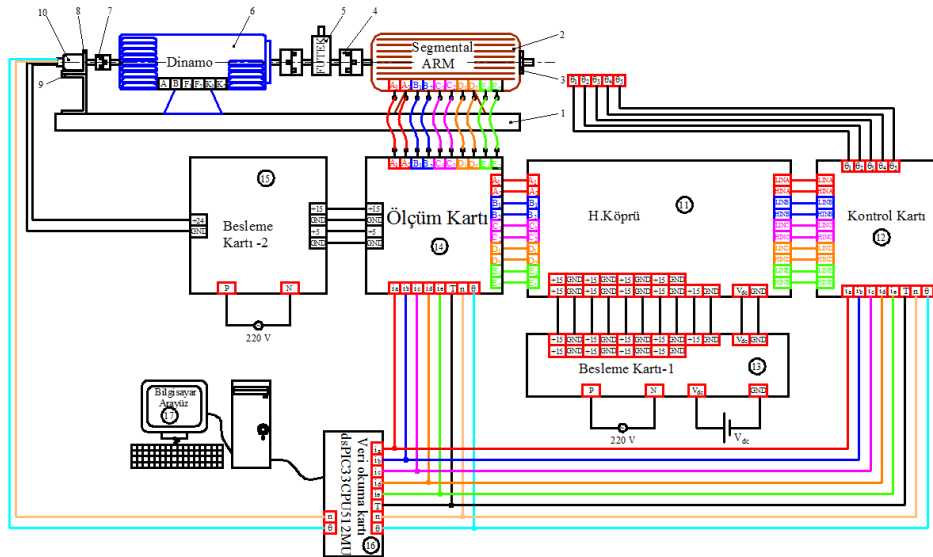
Çizelge 5.9. PSO ve DGA'nın karşılaştırılması

Parametre Değerleri	PSO_1	PSO_2	DGA_1	DGA_2
θ_1 (Derece)	6.4	7.2	6.4	6.8
θ_2 (Derece)	12	11	10.6	11
θ_3 (Derece)	15	16.4	15	14.4
$T_{salınım}$	%32.6	%33.4	%26	%30.4

Çizelge 5.9 incelendiğinde ST-ARM için belirlenen tetikleme açıları için tork salınımlarının, bu motor için daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda %56'lık değerin altında olduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen sonuçlar hedeflenen değerin altında olduğundan bulunan tetikleme sinyalleri ST-ARM'nin çalıştırılmasında kullanılmıştır.

5.3. ST-ARM Kontrol Deney Düzenekinin Oluşturulması

Tez çalışmasında ST-ARM'nin tork salınımlarının azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaçla tetikleme açıları PSO ve DGA ile belirlenen sinyallerin motor üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için şekil 5.26'da blok şeması verilen deney düzeneği oluşturulmuştur.



Şekil 5.26. ST-ARM deney düzeneğinin blok şeması

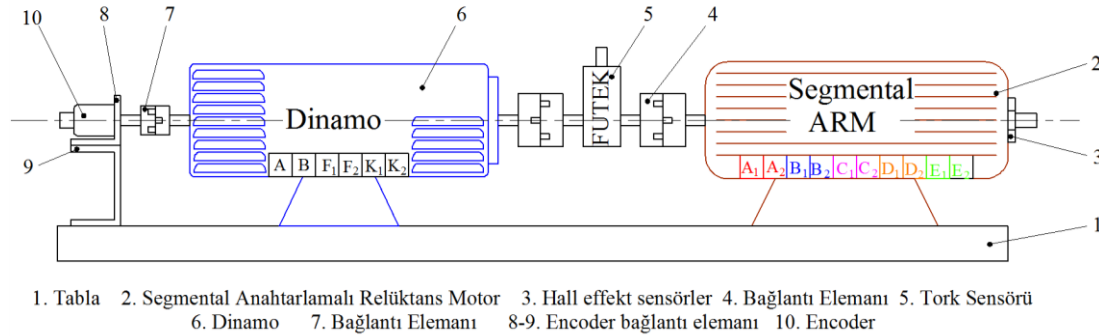
Şekil 5.26'da görüldüğü gibi deney düzeneği bağlantı elemanları ile birlikte 17 parçadan oluşmaktadır ancak temel olarak 7 parçadan oluştuğu ifade edilebilir. Bunlar;

1. ST-ARM- Tork sensörü-Dinamo-Enkoder bağlantıları

2. H-köprü kartları
3. Kontrol Kartı
4. Besleme Kartları
5. Sensör Kartı
6. Veri işleme Kartı
7. Arayüz Tasarımı

5.3.1. ST-ARM- Tork sensörü-Dinamo-Enkoder bağlantıları

ST-ARM'yi elektriksel olarak yükleyebilmek için dinamo kullanılmıştır. Ayrıca ST-ARM'nin hız ve tork değerlerinin ölçülebilmesi için Tork sensörü ve enkoder Şekil 5.27'de görüldüğü gibi bir tabla üzerinde mekaniksel olarak birbirlerine akuple edilmiştir.



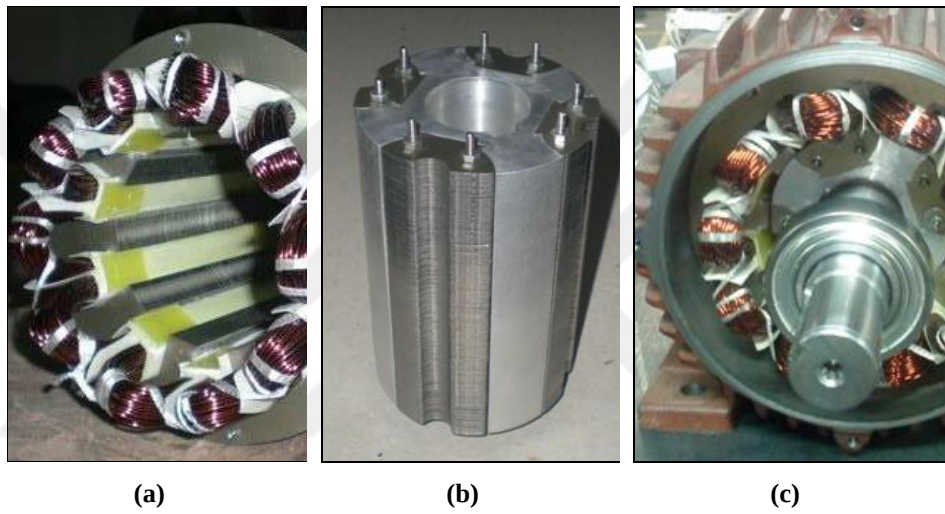
Şekil 5.27. ST-ARM-Dinamo-Tork Sensörü-Enkoder bağlantı şeması

5 fazlı U Tipi Segmental Rotorlu 10/8 Segmental Tip Anahtarlama Relüktans Motor

Bu çalışmada kullanılan Motor, 2012 yılında Durmuş Uygun tarafından doktora tezi kapsamında tasarlanan 5 fazlı U Tipi Segmental Rotorlu 10/8 Segmental Tip Anahtarlama Relüktans Motor (ST-ARM)'dur (Uygun D., 2012).

Şekil 5.28'de ST-ARM'nin parçaları görülmektedir (Uygun ve ark., 2014). Şekil 5.28 (b)'de de görüldüğü gibi ST-ARM'nin en önemli özelliği farklı bir rotor yapısına sahip olmasıdır (Uygun D., 2012). Alüminyumun manyetik özelliği olmayan bir metal olması nedeniyle motorun rotor yapısında alüminyum blok kullanılmıştır. Böylece alüminyumun oluşan manyetik alanı sınırlama özelliği ile klasik anahtarlama

relüktans makinelerde tercih edilen akı bariyeri görevini başarılı ile yerine getirmesi sağlanmıştır(Uygun D., 2012). Ayrıca alüminyum motor yapılarında kullanılan diğer metallere (örneğin paslanmaz çelik vb.) göre çok daha hafif bir metaldir. Böylece motorlarda dikkate alınan (Nm/kg) ağırlık başına üretilen moment değeri otomatik olarak arttırılmış olacaktır (Uygun D., 2012). ST-ARM ile ilgili daha önce yapılan çalışmalarda motorun tork salınımı %56 civarındadır (Uygun ve ark., 2014). Bundan dolayı bu tez çalışmasındaki hedef bu değerin altında salınımda motorun çalıştırılmasının sağlanmasıdır.

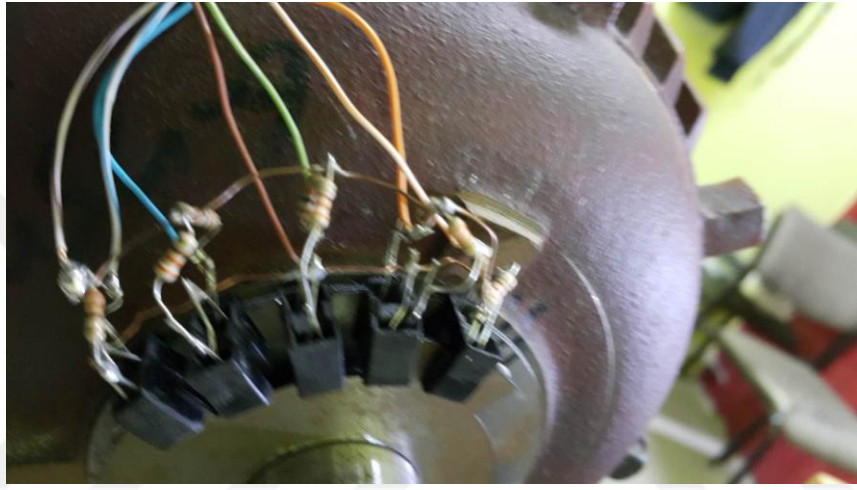


Şekil 5.28. Segmental Tip Anahtarlamalı Relüktans Motorun Yapısı
a. Stator **b.** Rotor **c.** Segmental Tip Anahtarlamalı Relüktans Motor

Çizelge 5.10. ST-ARM'nin özellikleri

No	Özellikler	Değer
1	Maksimum endüktans	13.45 mH
2	Minumum endüktans	3.8 mH
3	Faz başına direnç	1 Ω
4	Aktif M530-50A silikon çelik ağırlığı	9.90 kg
5	Alüminyum blok ağırlığı	0.71 kg
6	Moment/ağırlık oranı	0.22 Nm/kg
7	Faz Sayısı	5
8	Stator/Rotor Konfigürasyonu	10/8
9	Stator dış çapı	150 mm
10	Rotor dış çapı	79.4 mm
11	Bir faz sarım sayısı	100
12	Bakır telin çapı	1.25 mm

Şekil 5.28'deki ST-ARM'ye ait parametre değerleri Çizelge 5.10'da verilmiştir. ST-ARM'nin üzerinde Şekil 5.29'da görüldüğü gibi rotorun konumunun belirlenmesini sağlayan 18^0 'lik açılarla yerleştirilmiş 5 adet HA22A1 konum sensörü bulunmaktadır. ST-ARM çalıştığında rotorun miline bağlı olan levha sensörlerin içerisinde geçtiğinde sensörler bir puls üretmektedirler. Bu pulsler kullanılarak Çizelge 5.11'deki sıralamaya göre ST-ARM'nin fazları kontrol devresi tarafından enerjilendirilerek motor çalıştırılabilmektedir.



Şekil 5.29. HA22A1 sensörünün ST-ARM üzerindeki görünümü

Çizelge 5.11. Sensör çıkışlarına göre ST-ARM'nin faz enerjilendirme sırası

SENSÖRLER					MOTOR FAZLARI				
A	B	C	D	E	A Fazı	B Fazı	C Fazı	D Fazı	E Fazı
-	-	1	0	0	-	N	P	-	-
-	1	0	0	-	P	-	-	-	N
1	0	0	-	-	-	-	N	P	-
0	0	-	-	1	N	P	-	-	-
0	-	-	1	0	-	-	-	N	P

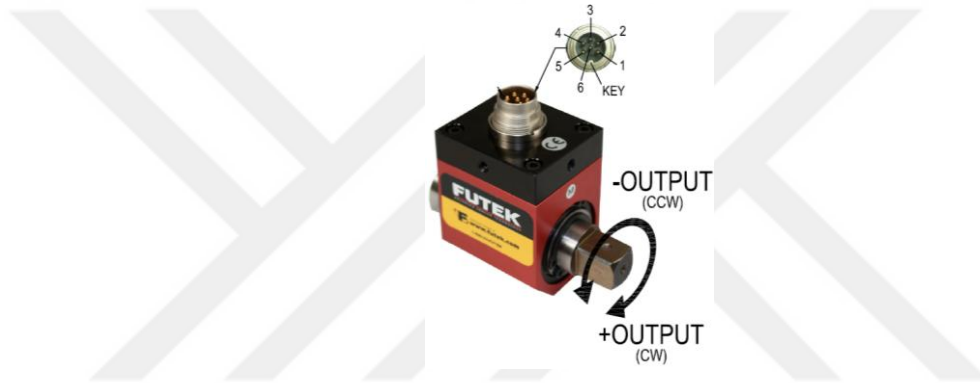
Dinamo

ST-ARM'nin elektriksel olarak yüklenebilmesi için GEMS firması tarafından üretilen dışardan uyarımlı DA motoru dinamo olarak kullanılmıştır. Dinamoya ait özellikler GEMS firması tarafında 1,5 KW, 200 V, 7,5 A, 3000 d/dk, %89, 4.75Nm olarak verilmiştir. Tez çalışmasında dinamonun elektriksel yük olarak çalıştırılırken dışarıdan DC bir kaynakla uyarım sargılarına gerilim uygulanmıştır. Uyarım

devresinden geçen akım değiştirilerek ST-ARM'nin elektriksel olarak yüklenmesi sağlanmıştır.

Tork Sensörü

ST-ARM'nin torkunu ölçmek için FUTEK markasının TRD300 modeli tork sensörü kullanılmıştır. Bu tork sensörünün ölçüm aralığı 0-10 Nm'dir. ST-ARM'nin üretebileceği tork değeri dikkate alınarak 0-10 Nm ölçüm aralığına sahip tork sensörü seçilmiştir. Şekil 5.30'da tork sensörünün bağlantı için soket yapısı görülmektedir.

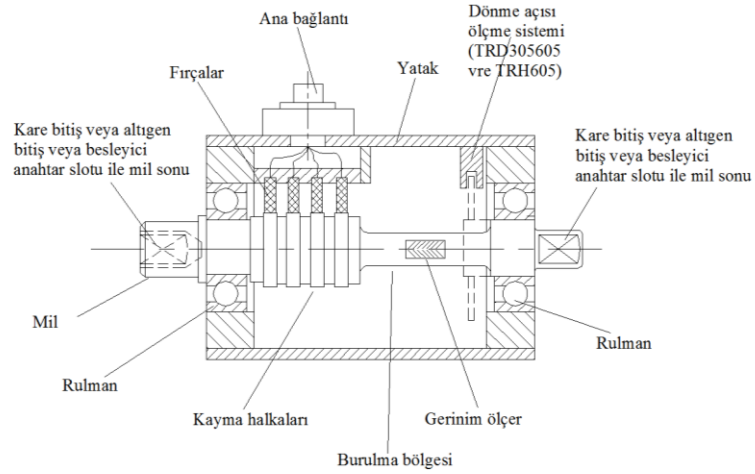


Şekil 5.30. Tork sensörü

Şekil 5.30'daki soket yapısında pinlerin renkleri ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Pin 1 (Siyah): Uyarım (-)
- Pin 2 (Kırmızı): Uyarım (+)
- Pin 3 (Siyah): Shield
- Pin 4 (Yeşil): Çıkış sinyali (+)
- Pin 5 (Beyaz): Çıkış sinyali (-)
- Pin 6 (Turuncu): Şönt kalibrasyon

Şekil 5.30'da DC ya da AC 5-11 V uyarım gerilimine ihtiyaç duyulan sensörün köprü direnci 350 Ω olup maksimum 3000 d/dk'da ölçüm yapabilmektedir. Tork sensörünün bağlantı kablosu takıldığında kılavuzdaki renkler değişiklik gösterebilmektedir. Bundan dolayı soketteki bağlantı numaraları ile kablolar AVOMETRE kullanılarak belirlenmelidir. Tork sensörünün içyapısında Şekil 5.31'de görüldüğü gibi strain gaugesler bulunmaktadır.



Şekil 5.31. Tork sensörü iç yapısı

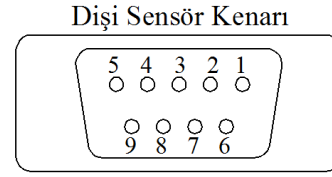
Tork sensöründe bulunan strain gaugeslerden tam köprü Wheastone köprüsü oluşturulmuştur. Bundan dolayı tork sensöründen elde edilen gerilim değerleri mV seviyelerindedir. Tork sensöründen elde edilen gerilimlerin artırılması için yükselteç devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında tork sensöründen elde edilen sinyalleri ± 10 V seviyesine yükseltmek için FUTEK markasının CSG110 kodlu yükseltici modülü kullanılmıştır. Şekil 5.32’de yükseltici modülün resmi görülmektedir.



Şekil 5.32. Yükseltici Modül

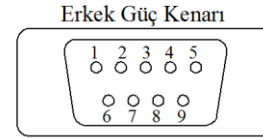
Şekil 5.32’de görüldüğü gibi yükseltici modülün RS232 soketli olarak bir giriş bağlantı bir de çıkış bağlantısı bulunmaktadır. Giriş bağlantısı olarak sensör tarafı, çıkış tarafı güç tarafı olarak adlandırılabilir. Şekil 5.33’de sensör tarafı, Şekil 5.34’de de güç tarafı konnektör bağlantı uçları ve açıklamaları görülmektedir.

Pin	İletken Kodu
1	+Uyarıtım
2	+Sinyal
3	-Sinyal
4	-Uyarıtım
5	GND
6	GND
7	GND
8	GND
9	GND



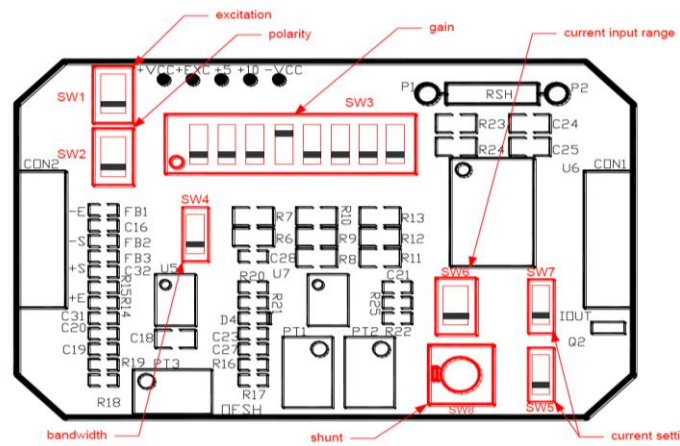
Şekil 5.33. Sensör tarafı bağlantıları

Pin	İletken Kodu	Kablo Renk Kodu
9	Güç Kaynağı	Red
8	Sinyal Çıkışı (Gerilim)	Yeşil
7	GND	Turuncu
6	GND	N/A
5	GND	N/A
4	GND	N/A
3	GND	N/A
2	GND	Blue
1	Sinyal çıkışı (Akım)	White



Şekil 5.34. Güç tarafı bağlantıları

Yükselticinin tork sensörüyle bağlantıları yapıldıktan sonra, güç tarafındaki 9 numaralı pine 14-26 V DC uygulandığında yükseltecin 8 numaralı ucundan gerilim, 1 numaralı ucundan da akım çıkışı alınabilmektedir. Bu tez çalışmasında yükseltecin gerilim çıkışı kullanılmıştır.



Şekil 5.35. Yükselteç modülün iç yapısı

Şekil 5.35’de görüldüğü gibi yükseltecin içerisinde sinyallerin seviyelerinin belirlendiği 8 adet switch bulunmaktadır. Bu switchler sırayla aşağıdaki görevleri yapmaktadırlar.

SW1: Uyarım sinyal seviyesi UP: 5 V, DOWN:10 V

SW2: Polarite UP:Reverse DOWN: Straight

SW3: Kazanç burada 8 adet switch bulunmaktadır. Bu switchlerin seviyelerine göre Çizelge 5.12’de görüldüğü gibi yükseltecin hassasiyeti ayarlanabilmektedir.

Çizelge 5.12. SW3 kullanılarak hassasiyet ayarları

SW3: Sensitivity (mV/V)					
1	UP	0.5	5	UP	2.5
	DOWN	N/ A		DOWN	N/ A
2	UP	1	6	UP	3
	DOWN	N/ A		DOWN	N/ A
3	UP	1.5	7	UP	4
	DOWN	N/ A		DOWN	N/ A
4	UP	2	8	UP	10
	DOWN	N/ A		DOWN	N/ A

SW4: Bant genişliği UP: 10kHz DOWN:1kHz

SW5- SW6-SW7: Akım ayarlaması ve oranı yükselteç modülün 8 farklı durum için akım çıkış değerleri Çizelge 5.13’de verilmiştir. Bu ayarlamalar yükseltecin akım çıkışı kullanılmak istendiğinde yapılmaktadır.

Çizelge 5.13. Yükselteç modül akım ayarlaması

SW5	SW6	SW7	Input Range (V)	Output Range (mA)
DOWN	DOWN	DOWN	0-10	4-20
DOWN	DOWN	UP	0-10	5-25
UP	DOWN	DOWN	0-10	0-16
UP	DOWN	UP	0-10	0-20
DOWN	UP	DOWN	0-5	4-20
DOWN	UP	UP	0-5	5-25
UP	UP	DOWN	0-5	0-16
UP	UP	UP	0-5	0-20

SW8: Şönt direnci Yükseltecin kalibrasyonu için kullanılan dirençtir.

FUTEK firması yükselteç modülün çıkışındaki gerilimin hesaplanması için internette hesaplama dosyası paylaşmıştır. Burada çıkış geriliminin değerini, switchlerin durumunu ve kazanç değerini vermektedir. Yükselteç modülündeki parametre ayarlamaları bu dosyaya göre gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında uyarım 10 V olarak

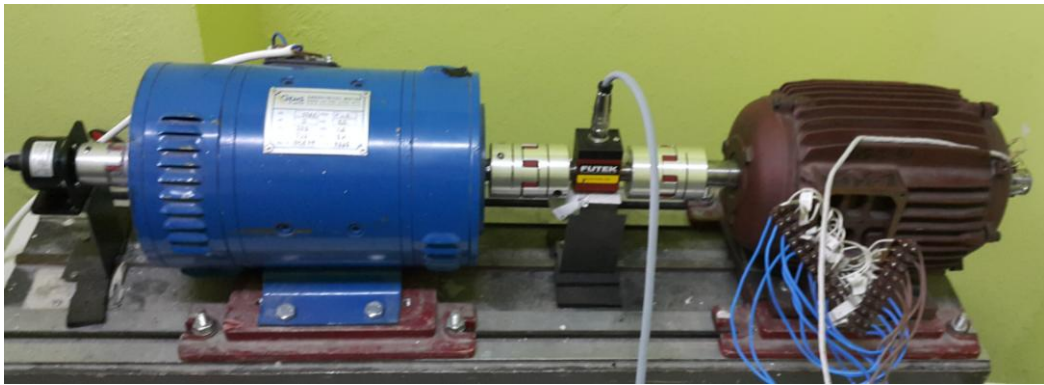
belirlenmiş, polarite straight (düz), kazanç 2.5 mV/V olarak belirlenmiştir. FUTEK yükselteç modülünün en önemli avantajlarından biri de sıfır ve span ayarının yapılabilmesidir. Bu da deney yapmadan önce sinyalin değerinin ve seviyesinin ayarlanabilmesini sağlamaktadır.

Tork sensörünün FUTEK marka seçilmesinden dolayı yükseltici olarak da aynı marka tercih edilmiştir. Tez çalışmasında tercih edilen yükseltecin dışında ADVANTECH firmasının ADAM3016 modülü de tercih edilebilirdi.

Enkoder

ST-ARM'nin hızını ve rotor konumunu belirlemek için Autonics marka 3600 puls'lik rotary enkoder kullanılmıştır. Sistemin konum hassasiyeti 3600 puls üreten enkoderden dolayı 0.1^0 'de olmaktadır. Bu da ST-ARM'nin kontrolü için yeterli bir hassasiyet seviyesini oluşturmaktadır.

ST-ARM- Tork sensörü-Dinamo-Enkoder bağlantılarının yapıldığı resim Şekil 5.36'da görülmektedir.

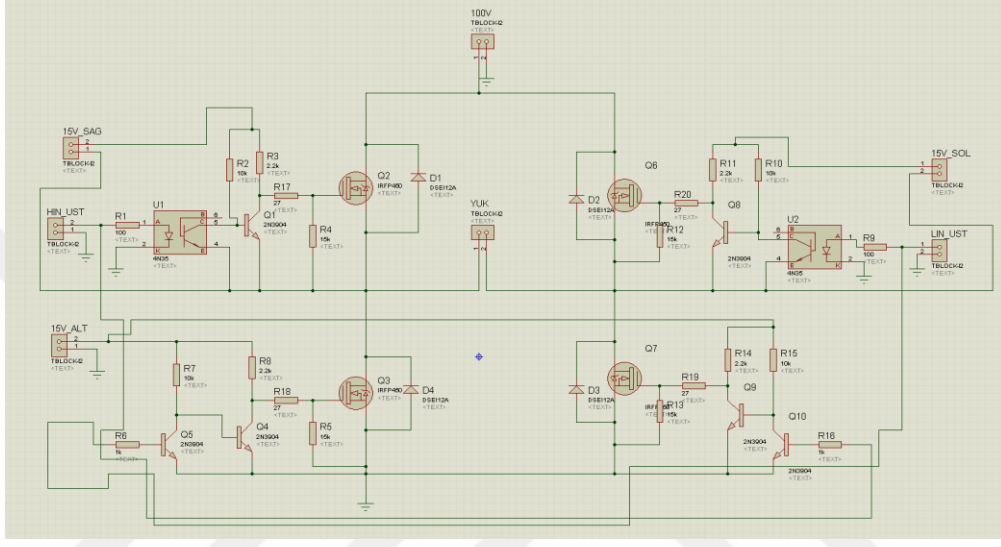


Şekil 5.36. ST-ARM- tork sensörü-dinamo-enkoder akuple bağlantısı

5.3.2. H-Köprü Sürücü Devreleri

Tez çalışmasında kullanılan ST-ARM bipolar olarak kontrol edilmiştir. Bundan dolayı, bipolar sürücü devrelerinin kullanılması gerekmektedir. Bipolar sürücü devreleri içerisinde kontrol edilme özelliği olarak en esnek yapıya sahip olan H-Köprü sürücü devresi tercih edilmiştir. H-köprü sürücü devresinin kontrolündeki esneklikten

faydalanılarak, tork salınımlarının azaltılmasında kullanılacak yöntemlerin daha kolay uygulanabileceği düşünülmüştür. ST-ARM'nin 5 fazlı olmasından dolayı, motorun kontrolünde 5 adet H-köprü devresine ihtiyaç duyulmuştur. Gerçekleştirilen H-köprü devresinde hazır sürücü devresi kullanmak yerine transistörlerden oluşan daha uygun maliyetli Şekil 5.37'de görülen bir faz sürücü devresi tasarlanmıştır.



Şekil 5.37. Bir faz H-köprü sürücü devresi

Şekil 5.37'den de görüldüğü gibi H-köprü devresinde 3 adet 15 V'luk ayrı besleme devresine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu da bu devrenin dezavantajlarından bir tanesi olarak kabul edilebilir, ancak avantajlarının yanında bu durum göz ardı edilebilmektedir. 3 farklı 15 V besleme devresinin kullanılması H-köprülerdeki şase çakışması sorununun giderilmesini sağlamaktadır. Şekil 5.37'de görüldüğü gibi HIN ve LIN olmak üzere iki adet kontrol sinyali H-köprü devresine uygulanmaktadır. Tasarlanan H-köprü devresinde kontrol devresinden gelen bu sinyaller 4N35 optokuplör kullanılarak yalıtılmıştır. Optokuplörün çıkışları ile hızlı anahtarlama özelliğine sahip olan 2N3904 transistörü tetiklenmiştir. Şekil 5.37'de de görüldüğü gibi kontrol sinyalinin durumuna göre hızlı transistörler yardımıyla bazı Mosfetler ilettime geçerken bazı mosfetler kesimde kalmaktadır. H-köprü devresinde güç anahtarı olarak N kanallı 14 A, 500 V, 0.4 Ω özellikleri olan IRFP450 Mosfeti kullanılmıştır. ST-ARM'nin 75 V ve 5 A'de çalıştığı durum için tez çalışması gerçekleştirileceğinden, seçilen Mosfetin değerleri motorun çalışma durumunu karşılamaktadır. Mosfetlere bağlı bulunan ters diyotlar için hızlı deşarj özelliği olan 11A, 1200 V, 50 ns özelliğine sahip olan DSEI12

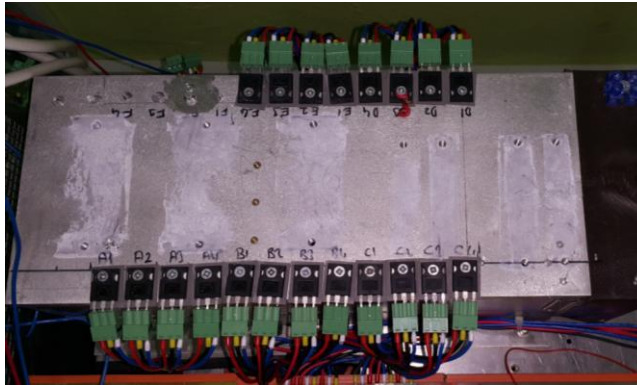
shottky diyotu kullanılmıştır. Şekil 5.37'deki devrede HIN sinyali kontrol devresinden lojik 1 yapıldığında Q2-Q7 üzerinden devrede olacak ve Q2'den Q7'ye doğru bir akım akışı meydana gelecektir. LIN sinyali lojik 1 yapıldığında ise Q6-Q3 mosfetleri iletime geçecektir ve bu durumda da Q6'dan Q3'e doğru bir akım akışı oluşacaktır. HIN ve LIN'in tetiklendiği iki durumdaki akımın yönleri birbirinden ters olduğu için bu devrelere bipolar sürücü devre ismi verilmektedir.

ST-ARM'nin 5 fazlı olmasından dolayı Şekil 5.37'de görülen devreden 5 adet tasarlanmıştır. Şekil 5.38'de tasarlanan H-köprü sürücü devresinin resmi görülmektedir.



Şekil 5.38. H-köprü sürücü devresi

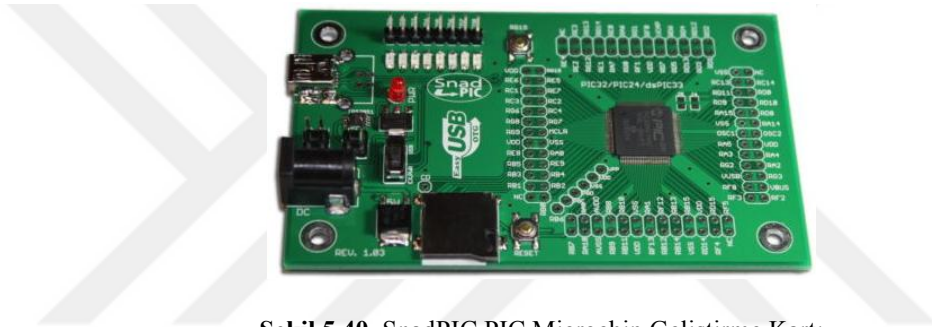
H-köprü devresindeki Mosfetlerin soğutulabilmesi için Şekil 5.39'daki gibi soğutucuların üzerine monte edilmiştir. Şekil 5.39'daki mosfet montajı, mosfetlerin soğutulmasının kolay bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamakla birlikte, mosfetlerde oluşan herhangi bir hata ya da yanma durumunda da mosfetlerin kolay değiştirilebilmesini sağlamıştır. Şekil 5.39'daki mosfetler termal bantlarla mevcut sistemde sabit hale dönüştürülürken güvenlik önleminin de alınması sağlanmıştır.



Şekil 5.39. Mosfetlerin montajı

5.3.3. Kontrol Kart Devresi

ST-ARM sürücü devresindeki H-köprü sürücü devresinin kontrol için Mikrochip firmasına ait dsPIC33EP512MU kullanılmıştır. Yüksek performanslı olan dsPICler hassas motor kontrol sistemlerinde, yüksek verimli, daha hassas ve uzun ömürlü olmaları sebebiyle tercih edilmektedir. dsPIC33EP512MU kartının 16 bit özelliği, yüksek hızlı PWM özelliği, USB 2.0 ve 10 bitlik 24 kanal analog giriş özelliklerinden dolayı ARM kontrolünde dsPIC tercih edilmiştir. Bu çalışmada üzerinde dsPIC33EP512MU810 olan Şekil 5.40'da görülen SnadPIC PIC Microchip Geliştirme Kartı kullanılmıştır.



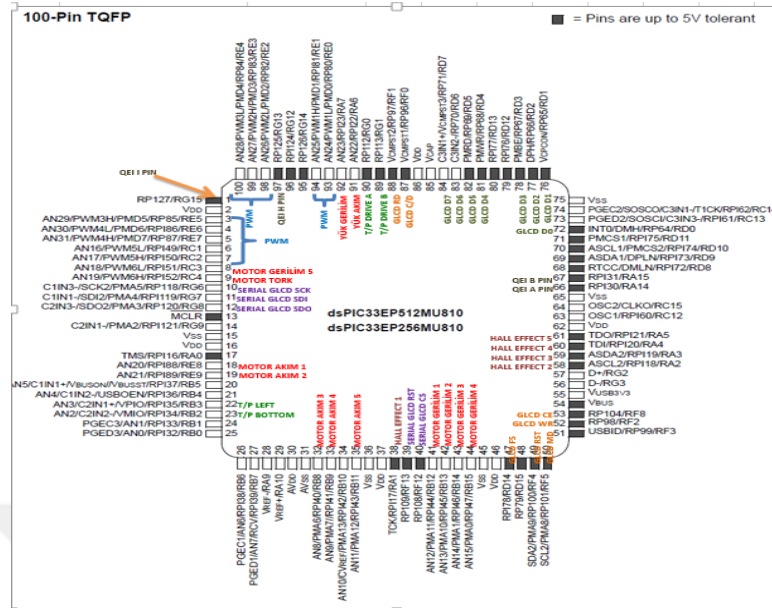
Şekil 5.40. SnadPIC PIC Microchip Geliştirme Kartı

SnadPIC PIC Microchip Geliştirme Kartında bulunan dsPIC33EP512MU810'un temel özellikleri Çizelge 5.14'de verilmiştir.

Çizelge 5.14. dsPIC33EP512MU810 temel özellikleri

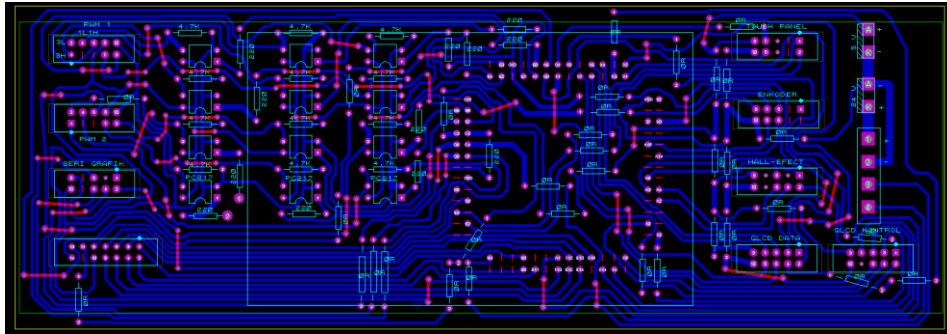
Parameter Name	Value	Parameter Name	Value
Architecture	16-bit	Digital Communication Peripherals	4-UART 4-SPI 2-I2C
CPU Speed (MIPS)	70	Codec Interface	Yes
Memory Type	Flash	Comparators	3
Auxiliary Flash (KB)	24	USB (ch, speed, compliance)	1, FS Device/Host/OTG, USB 2.0 OTG
Program Memory (KB)	512	CAN (#, type)	2 CAN
RAM Bytes	53,248	Capture/Compare/PWM Peripherals	16/16
DMA RAM Bytes	4096	PWM Resolution bits	16
Temperature Range C	-40 to 125	Motor Control PWM Channels	12
Operating Voltage Range (V)	3 to 3.6	Quadrature Encoder Interface (QEI)	2
I/O Pins	83	Timers	9 x 16-bit 4 x 32-bit
Pin Count	100	Parallel Port	PMP
System Management Features	BOR	DMA	15
POR	Yes	Cap Touch Channels	32
WDT	Yes		
nanoWatt Features	Low Sleep/Fast Wake/Fast Control		

Kontrol kartı tasarlanırken Şekil 5.41'de görüldüğü gibi dsPIC33EP512MU810'in pin bağlantı uçları kullanılmıştır.



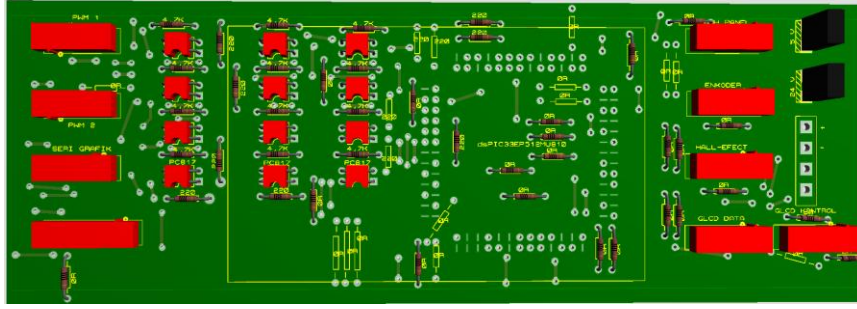
Şekil 5.41. dsPIC33EP512MU810 pin bağlantıları

Bu çalışmada Şekil 5.41’de görülen bağlantı uçlarına göre tasarlanan devrenin baskı devresi Şekil 5.42’de verilmiştir.



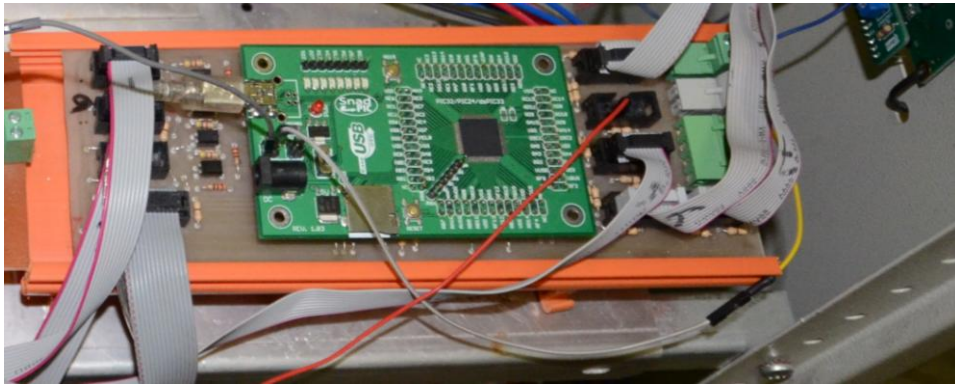
Şekil 5.42. Kontrol kartı baskı devresi

Şekil 5.42’deki kontrol devresinin programdaki üst görünüşü Şekil 5.43’de görülmektedir.



Şekil 5.43. Kontrol devresinin üst görüntüsü

Şekil 5.43'den de görüldüğü gibi dsPIC33EP512MU810'ın çıkış olarak kullanılan uçlarının tamamı dsPIC ve devreyi korumak amaçlı optokuplör üzerinden diğer devrelere uygulanmıştır. Kontrol devresinde PWM1 ve PWM2 çıkışları H-köprü devrelerine giden kontrol sinyal uçlarını ifade etmektedir. Ayrıca kontrol devresi üzerinde, HA22A1 konum sensöründen gelen bilgiler, sistemin kontrolünde kullanılan WG240128B-TMI-VZ dokunmatik LCD bağlantıları, akım değerleri, enkoderden ve tork sensöründen gelen bilgilerin giriş olarak uygulandığı soketler oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen kontrol devresinin resmi Şekil 5.44'de verilmiştir.



Şekil 5.44. Kontrol devresi resmi

ST-ARM kontrol devresinde sistemin kontrolü kullanılan WG240128B-TMI-VZ dokunmatik LCD ile yapılmaktadır. Dokunmatik LCD ekran ile kontrol devresinin haberleşmesi için MikroElektronica firmasına ait Serial GLCD Adapter 240x128 devresi kullanılmıştır. Ayrıca dokunmatik LCD ekranın kontrol edilebilmesi için yine MikroElektronica firmasına ait Touch Panel Controller devresi kullanılmıştır. Dokunmatik LCD ekranın deney düzeneğindeki bağlantısı Şekil 5.45'de verilmiştir.



Şekil 5.45. Dokunmatik LCD ekran resmi

Dokunmatik LCD, sistemin çalıştırılıp durdurulduğu, devir, tork ve akım değerlerinin yazıldığı bir ekran olarak tasarlanmıştır. Deney düzeneğinde arayüz devresinin kullanılmasından dolayı burada sadece sistemin çalıştırılıp durdurulması yapılmıştır ve devir değeri ekranda yazdırılmıştır. Pasif durumda olan diğer bölümler istenildiğinde yazılımları gerçekleştirilerek aktif duruma getirilebilmektedir. Şekil 5.46’da tasarlanan dokunmatik LCD’nin çalıştığı durumdaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.46. Dokunmatik LCD ekran görüntüsü

Tez çalışmasında kullanılan SnadPIC PIC microchip geliştirme kartının programlanmasında MikroElektronika firmasında ait MicroC PRO for dsPIC versiyon 6.2 programı kullanılmıştır. MikroC, Mikroelektronika firmasının geliştirdiği bir derleyicidir. Şu an piyasada CCS-C, HI-TECH C, MPLAB® C gibi değişik derleyiciler bulunmasına rağmen, MikroC'nin tercih edilmesinin başlıca sebeplerini aşağıdaki gibi sıralanabilir (Kazan F.A. ve ark., 2014).

- ▶ C tabanlı bir yazım dili olması, bununla birlikte komut yapısının kolay ve kullanışlı olması
- ▶ Tek bir programda bir mikrodenetleyici programcısı için gerekli olan her şeyin olması, yani hiçbir yardımcı programa gerek kalmaması
- ▶ Düşünülen bir proje için kütüphanesinin oldukça yeterli olması ve bir eklentiye ihtiyaç duymaması
- ▶ Mikroelektronika firmasının derleyici ve kütüphanelerini, diğer firmalara oranla daha sık güncellemesi ve yenilemesi, teknolojiye daha çabuk ayak uydurması
- ▶ Tek bir dil ile PIC, PIC24/dsPIC, PIC32, ARM, AVR, 8051 platformlarında program yazılabilmesi
- ▶ MikroC içerisinde gelen örnek devre şemaları ve program kodlarının her birinin hemen hemen birer proje yapısında olması
- ▶ İnternet üzerinden forum aracılığıyla veya doğrudan iletişim yöntemiyle MikroC team tarafından yardım sunulması
- ▶ Paralel, seri ve USB veri iletişimine destek vermesi ve bu iletişim türlerini kullanıcıya çok kolay bir şekilde kullandıran yapısının bulunması
- ▶ Libstock sitesi üzerinden örnek projelere ve örnek kodlara ulaşım imkanının bulunması
- ▶ Derleyici içerisinde yer almayan ve sonradan geliştirilen kütüphanelerin programa rahatlıkla entegre edilebilmesi ve kütüphane desteğinin artırılması
- ▶ Mikroelektronika firmasının ses, iletişim, depolama vs... konularında yaklaşık 300 adet hazır modül kartının bulunması ve bu kartların her birinin kullanımı konusunda açıklayıcı örneklerin bulunması

SnadPIC PIC microchip geliştirme kartının yazılımında kullanılan MikroC yazılımının üreticisi olan MikroElektronika firmasının Visual GLCD adındaki programı da Dokunmatik LCD'lerin programlanması için kullanılmaktadır. Visual GLCD

programında görsel olarak tasarlanan LCD tasarımının yazılımı da yine MikroC programından gerçekleştirilmiştir.

SnadPIC PIC microchip geliştirme kartına dsPIC33EP512MU810'a ait Bootloder programı yüklenerek bilgisayarın USB bağlantısı hem kartın güç kaynağı hem de programlama kablosu olarak kullanılabilir. MicroC programında yazılan yazılım derlendikten sonra oluşan hex dosyaları bilgisayardan mikroBootloader USB HID programı aracılığıyla geliştirme kartına kolayca yüklenebilir. Böylece program üzerinde yapılan değişikliklerde ekstra bir programlayıcıya ihtiyaç duyulmamaktadır. Programlayıcı sadece geliştirme kartına ilk olarak Bootloder programı atılırken kullanılmıştır.

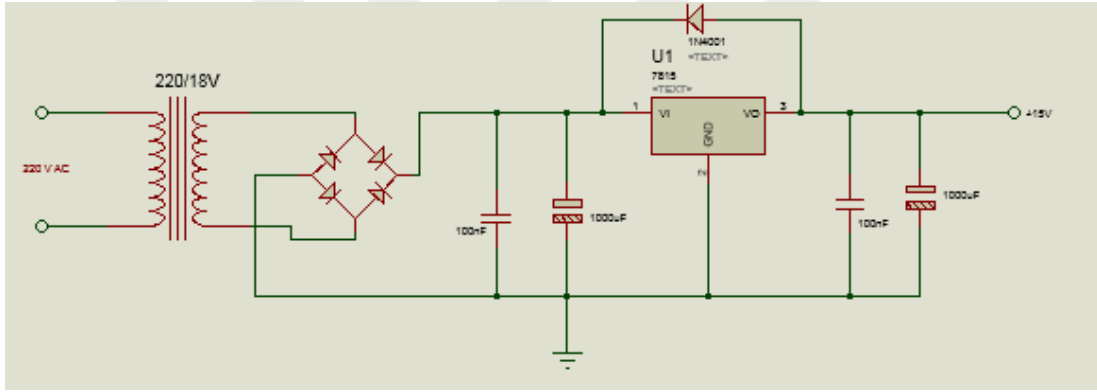
Tez çalışmasında gerçekleştirilen kontrol kartı 5 adet H-köprü devresindeki 10 adet tetikleme sinyalinin kontrolünü gerçekleştirmektedir. Burada tetikleme sinyalleri zamana ya da rotor konumuna bağlı olarak da yazılımsal olarak gerçekleştirilebilir. Kontrol kartına rotorun konum bilgisi 18⁰'de bir yerleştirilmiş olan 5 adet HA22A1 konum sensörlerinden ve enkoderden gelmektedir. Gerçekleştirilen yazılıma göre ST-ARM'nin çalışması için ilk olarak dokunmatik LCD ekrandan BAŞLAT butonuna basılması gerekmektedir. Bundan sonra kontrol kartı konum sensörlerinden aldığı bilgiye göre Çizelge 5.11'deki sırayla H-Köprü sürücüyeye gerekli tetikleme sinyallerini göndermektedir. Bu sırada eğer enkoderden puls gelmezse kontrol kartı sistemin enerjisini kesmektedir. Enkoderden sinyal geldiğinde motor artık rotor konumunu enkoderden almaya başlamaktadır ve ST-ARM bu sinyallere göre kontrol edilmektedir. Ayrıca kontrol devresi akım sensörlerinden gelen değerler referans sınırı aştığında sistemi otomatik olarak durdurmaktadır. ST-ARM'nin durdurulması dokunmatik LCD ekran üzerindeki DURDUR butonuna basılarak gerçekleştirilmektedir.

5.3.4. Besleme Kart Devreleri

Tez çalışmasında gerçekleştirilen devrelerin beslemeleri için oluşturulan devrelerdir. Bu çalışmada H-köprü devreleri için 15 V, tork sensörü için 10 V, enkoder için 24 V, akım sensörleri için 5V besleme devreleri kullanılmıştır.

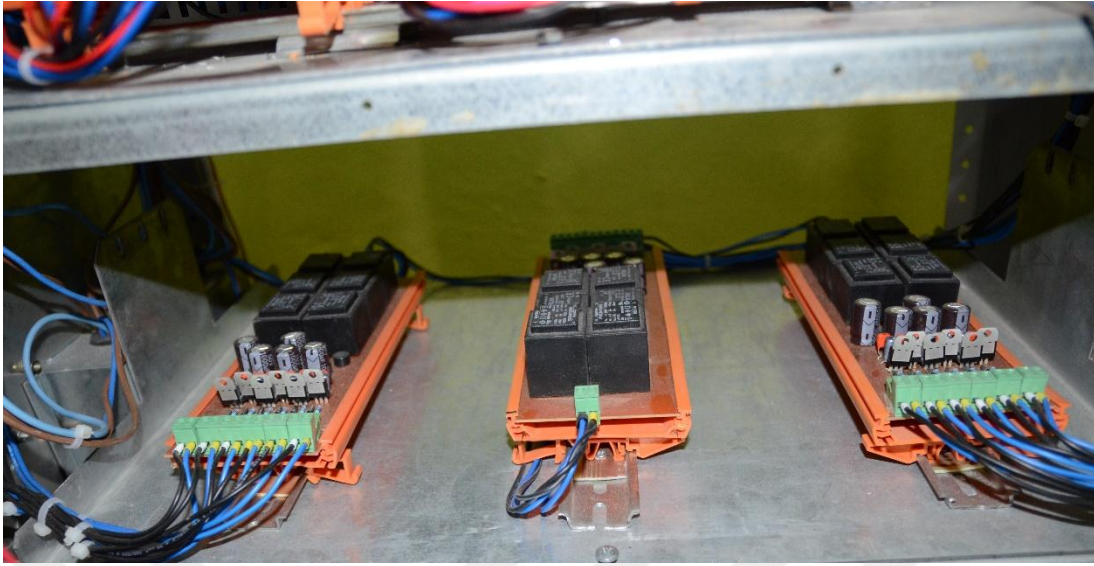
H-köprü devresinin bir fazı için toplam 3 adet 15 V besleme devresine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca bu besleme devrelerinin şaselerinin yalıtılabilmesi için her

besleme devresi ayrı bir trafo ile beslenmektedir. Böylece şase sorunu önlenmiş olmaktadır. H-köprü devresindeki 15V_ALT besleme devrelerine daha güçlü bir trafo bağlanarak besleme devre sayısı ve trafo sayısı azaltılabilir. Çalışmada böyle bir tasarım gerçekleştirilirse 15V_ALT beslemelerini sağlayan kartta bir arıza olursa H-köprü devrelerinin hiçbiri çalıştıramayacaktır bu da bu tasarımın en büyük dezavantajını oluşturmaktadır. Bundan dolayı tez çalışmasında her 15 V besleme devresi için ayrı trafo kullanılmıştır. Gerçekleştirilen bir adet 15 V besleme devresinin şeması Şekil 5.47’de verilmiştir. Şekil 5.47’de görüldüğü gibi 220 V trafo ile şebeke gerilimi 18 V’a düşürülmüş, daha sonra doğrultma devresi ile DC sinyale dönüştürülerek 7815 entegresi ile sabit 15 V gerilim elde edilmiştir. Burada kondansatörler ile DC gerilimin salınımı çok düşük seviyelere çekilmiştir.



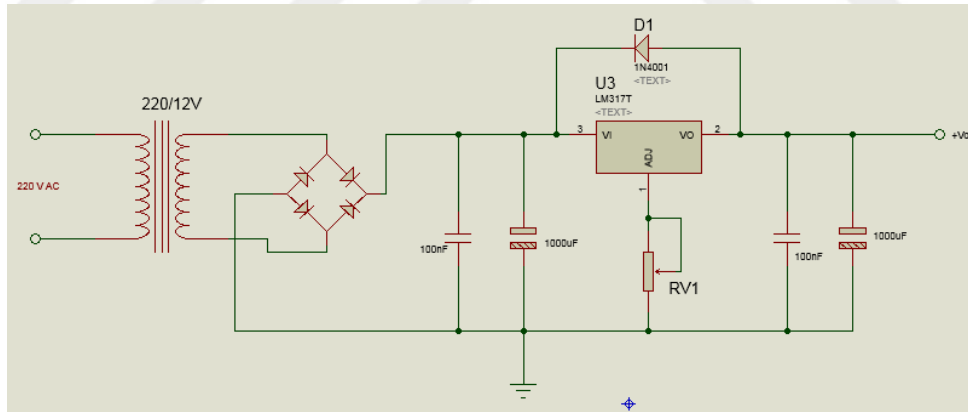
Şekil 5.47. 15V besleme devresi

H-köprü devrelerinin besleme gerilim olarak kullanılan devrelerin resimleri Şekil 5.48’de verilmiştir.



Şekil 5.48. H-köprü besleme devreleri resimleri

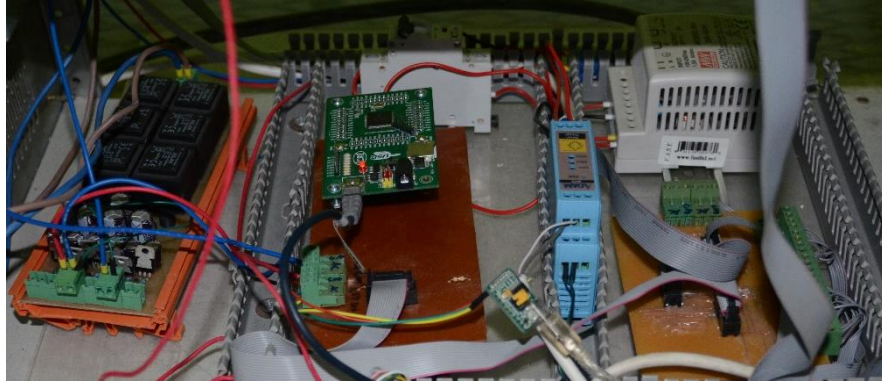
Tork sensörünün besleme gerilimi 5-11 V aralığında olması gerekmektedir. Tork sensörünün besleme devresi Şekil 5.49’de görülmektedir. Bu devrede 220/12 V trafo ve LM317 entegresi kullanılmıştır.



Şekil 5.49. Ayarlı besleme devresi

Encoderin beslemesi MeanWell marka 48 W, 24 V, 2 A’lık güç kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akım sensörlerinin beslemesi için gerçekleştirilen devrenin Şekil 5.49’dan farkı sadece entegre olarak 7805 kullanılmış olmasıdır.

Tez çalışmasında kullanılan besleme devrelerinin resimleri Şekil 5.50’de verilmiştir.



Şekil 5.50. Besleme devreleri

ST-ARM'nin çalışma gerilimi olan 75 V DC gerilim değeri VAR-SAN firması tarafından üretilen 0-200 V DC ayarlı 10 A'lık güç kaynağından sağlanmıştır. Kullanılan güç kaynağının çıkış geriliminde salınımların fazla olması sistemin kararlılığını etkileyeceğinden Şekil 5.51'de görüldüğü gibi güç kaynağının çıkışına kondansatör grubu bağlanmıştır. Ayrıca ST-ARM'ye elektriksel yük olarak bağlanan dinamonun dışarıdan uyarımlı olmasından dolayı dinamonun uyarımını sağlamak için 0-200 V ayarlı DC bir güç kaynağı daha kullanılmıştır. Şekil 5.51'de 2 adet ayarlı güç kaynakları görülmektedir.



Şekil 5.51. ST-ARM ve dinamo uyarım güç kaynağı resmi

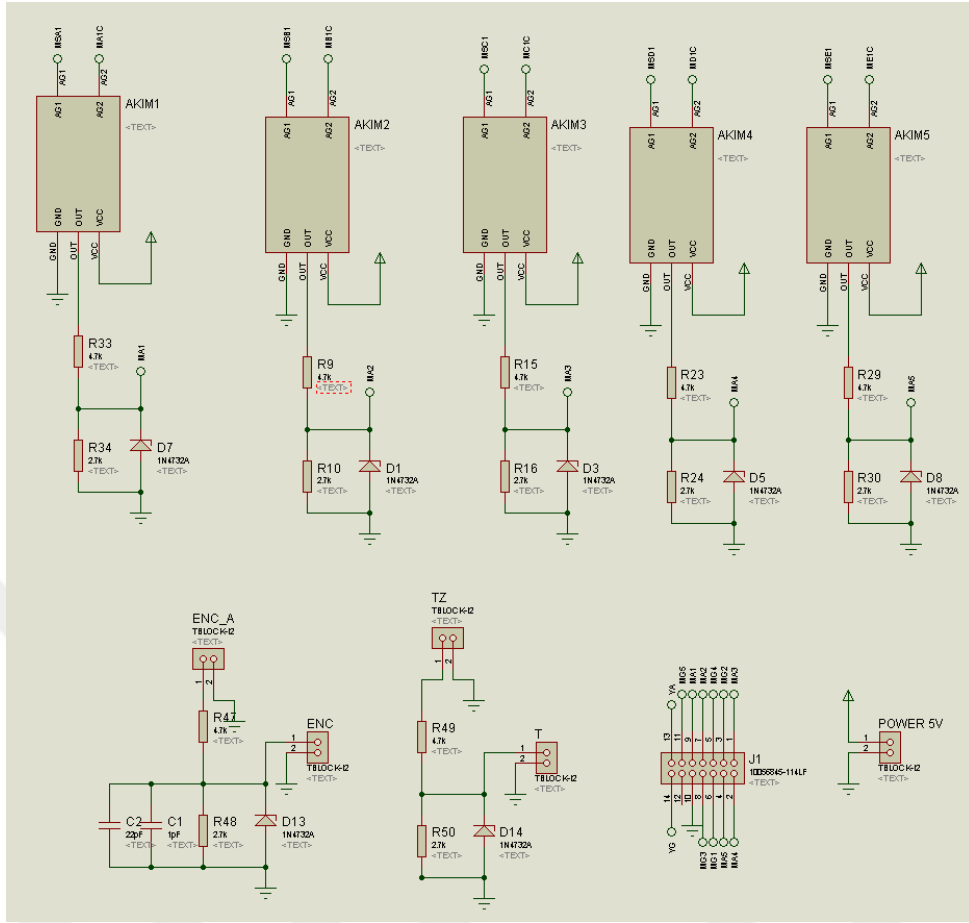
5.3.5. Sensör Kart Devresi

Sensör kartı deney düzeneğinde bulunan bütün sensör bilgilerinin toplandığı ve aynı zamanda akım sensörlerinin bulunduğu elektronik karttır. Tez çalışmasında

akımdaki salınımları azaltılarak torktaki salınımların azalabileceği gerçeği dikkate alınmıştır. Bundan dolayı akımdaki salınımları belirleyen tetikleme açıları sezgisel algoritmalar kullanılarak belirlenmiştir. Akımların değerleri bu çalışmadaki en önemli parametrelerden bir tanesidir. Bundan dolayı 5 fazlı ST-ARM'nin tüm faz akımlarını okumak için 5 adet ACS712 kodlu akım sensörü kullanılmıştır. Bu çalışmada ST-ARM bipolar olarak çalıştırıldığından dolayı $\pm$ özelliğine sahip bir akım sensörü olan ACS712 tercih edilmiştir. ACS712 akım sensörü Allegro firmasının ürettiği manyetik etkiye bağlı lineer akım sensörüdür. Tez çalışmasında kullanılan sensör 20 A'e kadar iki yönlü akım girişine izin veren, hata payı %5'in altında ve analog voltaj 185 mV/A olan bir sensördür. Bu sensörün tercih edilmesinin nedenleri aşağıda sıralanmıştır.

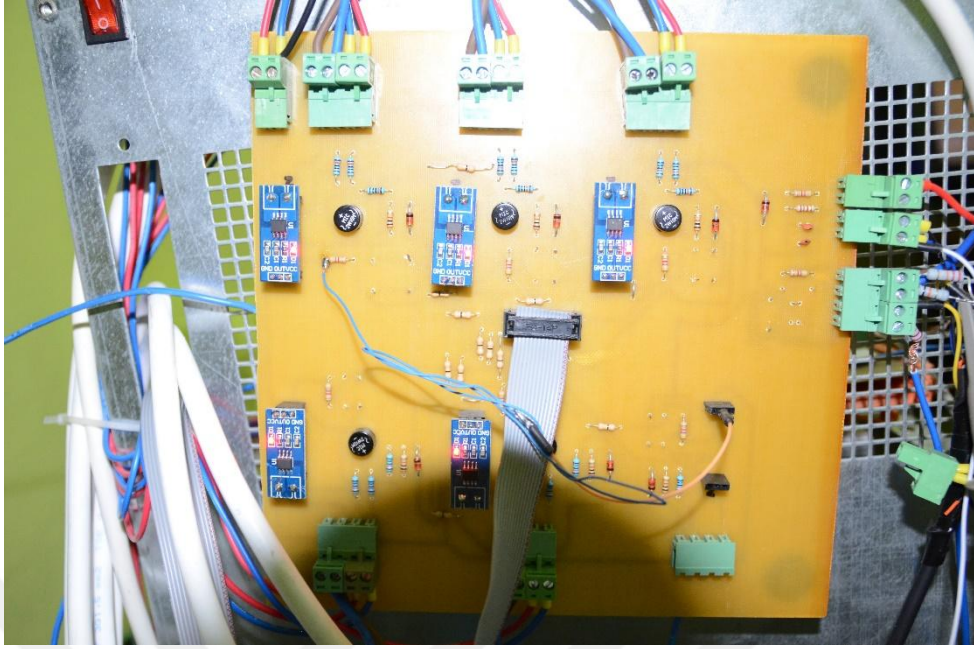
- -20 A'dan 20 A'ya çift yönlü giriş akımı için tasarlanmıştır.
- Stabil sensör IC, aşırı akıma beş defaya kadar dayanabilmektedir.
- İletken yolda iç rezistansı 1.2 m Ω 'dur.
- Hall etkisi sensörü kullanmanın anlamı IC'nin akım hattını sensörün elektroniğinden elektriksel olarak 2.1 kV RMS'e kadar izole edebilmektir. Böylece sensörün akım hattı üzerinde herhangi bir yere takılabiliş elektriksel izolasyon gerektiren uygulamalarda kullanılabilmesidir.
- Kart üzerindeki filtre olarak tanımlı pinler üzerine bir kapasitör ekleyerek 80 kHz bant genişliği isteğe bağlı olarak düşürülebilmektedir.
- Yüksek kesinlik ve güvenilirlik: tipik toplam çıkış hatası oda sıcaklığında ve fabrika ayarlarında %4'dür.
- Çalışma sıcaklık aralığı -40°C'den 85°C'ye kadardır.

ST-ARM'nin akım değerlerini ölçen ve diğer sensörlerden gelen bilgilerin toplandığı sensör kartı Şekil 5.52'de verilmiştir.



Şekil 5.52. Sensör kartı

Şekil 5.52’de sensör kartında sensörlerden veri işleme kartına gidecek sinyallerin 5V’u geçmemesi için devrede zener diyotlar ve gerilim bölücü dirençleri kullanılmıştır. Böylece veri işleme kartının zarar görmesine bir önlem alınmıştır. Ayrıca enkoderden gelen sinyallerdeki parazitleri engellemek için sinyal uçlarına kondansatör bağlanmıştır. Tasarlanan sensör kartının resmi Şekil 5.53’de verilmiştir.



Şekil 5.53. Sensör kartı

Sensör kartından toplanan veriler hem kontrol kartına hem de veri işleme kartına bağlanmaktadır. Veri işleme kartı sensör kartındaki verileri okuyup bilgisayara aktarmaktadır.

5.3.6. Veri İşleme Kartı

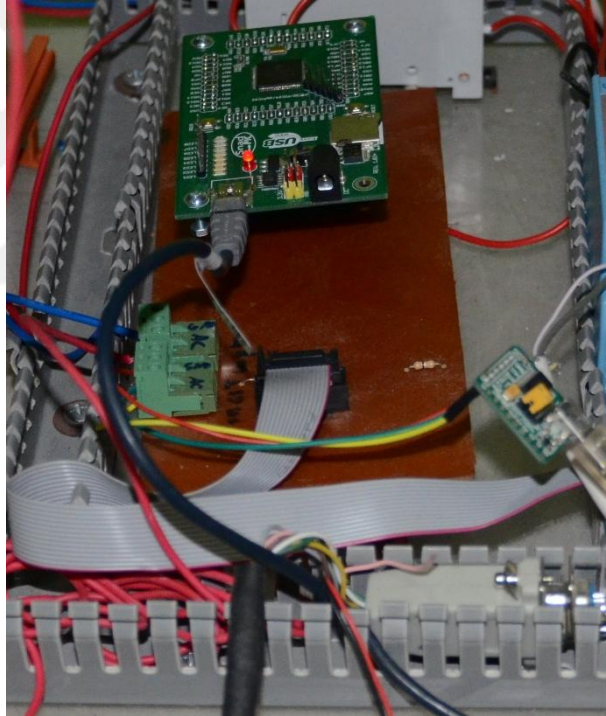
Veri işleme kartı sensör kartından alınan sinyallerin okunması ve bilgisayara aktarılması amacıyla tasarlanmış bir karttır. Tez çalışmasında veri işleme kartı hazır olarak kullanılmamış ve üzerinde dsPIC33EP512MU810 olan SnadPIC PIC Microchip Geliştirme Kartı kullanılmıştır. Tasarlanan bu kart aracılığıyla 5 akım, tork ve hız değeri okunmakta ve bilgisayara aktarılmaktadır. Veri işleme kartı verileri 10 bitlik çözünürlükte okumakta ve 1024000 bps hızında veri aktarımı gerçekleştirmektedir. ST-ARM'nin kontrolünde enkoderden alınan sinyaller kullanılmıştır. Bundan dolayı veri işleme kartının MicroC'de gerçekleştirilen yazılımıyla veriler seri iletişimle bilgisayara 0.2^0 de bir gönderilmektedir. Veri işleme kartından gönderilen verilerin karışmaması için verilerin arasına Şekil 5.54'de görüldüğü gibi @ işareti konularak gönderilmiştir. Şekil 5.54'de görülen sırayla veri işleme devresi bilgileri bilgisayara aktarmaktadır. Bilgisayara aktarılan veriler Şekil 5.54'deki sırayla 10 bit (0-1023)

olarak gönderilmektedir. Ara yüz programında bu değerler okunarak gerçek değerlerine dönüştürülmüştür.

*HT@	125@	995@	265@	270@	15@	26@	37@	450@
Veri	Veri	Devir	A fazı	B fazı	C fazı	D fazı	E fazı	Tork
başlangıç	sırası	bilgisi	Akımı	Akımı	Akımı	Akımı	Akımı	Değeri
kontrolü								

Şekil 5.54. Veri işleme kartından verinin gönderilmesi

Şekil 5.55’de veri işleme kartının resmi görülmektedir.



Şekil 5.55. Veri işleme kartı

Tez çalışmasında oluşturulan deney düzeneğinin resmi Şekil 5.56’da verilmiştir.



Şekil 5.56. ST-ARM kontrol deney düzeneği

5.3.7. Arayüz Tasarımı

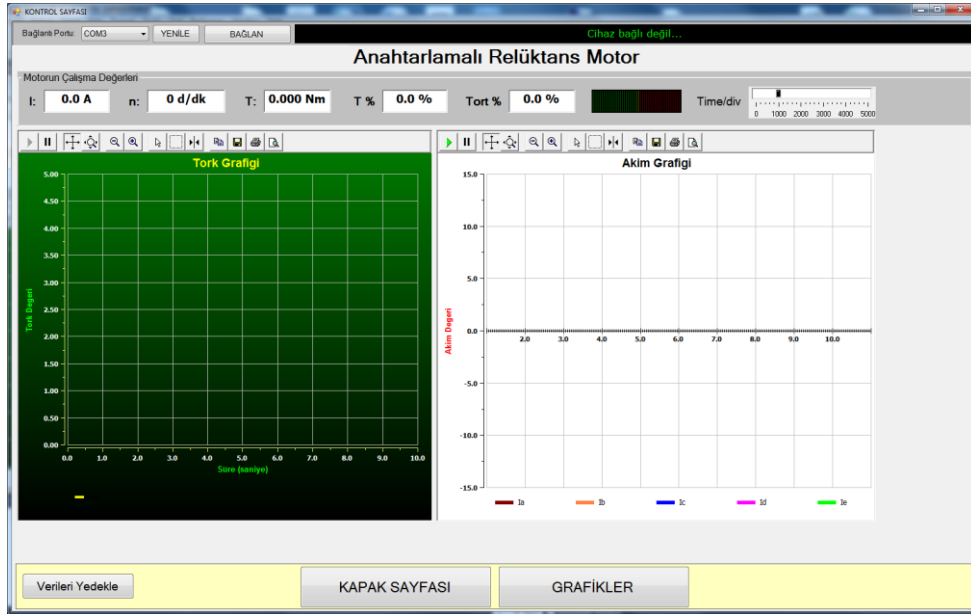
Veri işleme kartından verilerin alınabilmesi, kaydedilebilmesi ve grafiklerinin çizdirilebilmesi için hazırlanan arayüz programı Visual Studio C# programında hazırlanmıştır.

Arayüz programı Kapak, Tork Grafiği ve Grafikler olmak üzere 3 sayfa olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 5.57’de kapak sayfası görülmektedir. Bu sayfa sadece bilgi amaçlı ve diğer sayfalara geçiş için kullanılan bir sayfadır. Kapak sayfasında tork grafiği ve grafikler olmak üzere iki adet düğme bulunmaktadır.



Şekil 5.57. Arayüz kapak sayfası tasarımı

Tork Grafiği düğmesine tıklandığında, tork grafiğini, tork değerini, tork salınım değerinin ve ST-ARM akımlarının görüldüğü Şekil 5.58'deki gibi bir sayfa oluşturulmuştur.



Şekil 5.58. Arayüz tork grafiği sayfası

Tork grafiği sayfasının üst kısımda seri haberleşme portu aracılığıyla, veri gönderme kartı ile bağlantı yapılması sağlanmıştır. Bu sayfada bilgisayarda bulunan

mevcut seri portlar listelenmiştir ve bağlantı portu seçilebilmektedir. Ayrıca son seçilen portun bir sonraki açılışta otomatik seçilmesi sağlanmıştır. Böylece yeni veri alma işlemi sırasında port değiştirilmediği takdirde bağlantı kısa sürede gerçekleştirilebilmektedir. Bağlantının yapılacağı port belirlendiğinde “Bağlan” butonuna tıklandığında program ilk olarak bağlantı yapılacak port bilgilerini kaydetmekte sonra bağlantı yapılıp yapılmadığını kontrol etmektedir. Eğer bağlantı yapılmamışsa, daha önce herhangi bir veri kaydedilmiş olma ihtimaline karşı kullanıcı uyarılarak bağlanma isteğine devam edip etmeyeceği sorulmaktadır. Kullanıcı devam etmek isterse bağlantı sağlanınca seri porttan veri işleme kartı ile 1024000 bps hızında veri aktarımı için bağlantı yapılmaktadır. Veri işleme kartı ile bağlantı gerçekleştirildiğinde Access veri tabanına bağlantı gerçekleştirilmiş olmaktadır. Bundan dolayı veri tabanına bağlantı kurulduğunda veri tabanında bulunan daha önceki kayıtlar var ise silinmiştir. Ayrıca Access veritabanı dosyası boyutu, kayıt yaptıkça büyür ve boyutu yüzlerce megabayta ulaşabilir. Veritabanı tablosundaki her şey silinse bile, boyutu tekrar küçülmez. Bu da zamanla veri tabanının şişerek bozulmasına ve aslında gereksiz olarak çok yer kaplamasına sebep olabilir. Bu nedenle veritabanı özel modda açılarak tamir edilmekte ve boyutu gerekli olan en küçük boyuta düşürülmektedir. Bu işlemten sonra, veri tabanının bağlantısı açılarak, veri kaydetmeye hazır hale getirilmektedir. Veri işleme kartından gelen 0.2^0 'de gelen veriler Şekil 5.54'deki sırayla gönderilir. Arayüz programı veri işleme kartı tarafından ölçülen 10 bitlik çözünürlük değerine göre (0...1023 arası) gelen akım ve tork değerlerini gerilim değerine dönüştürmektedir. Bu değerler veri tabanına kaydedilmektedir.

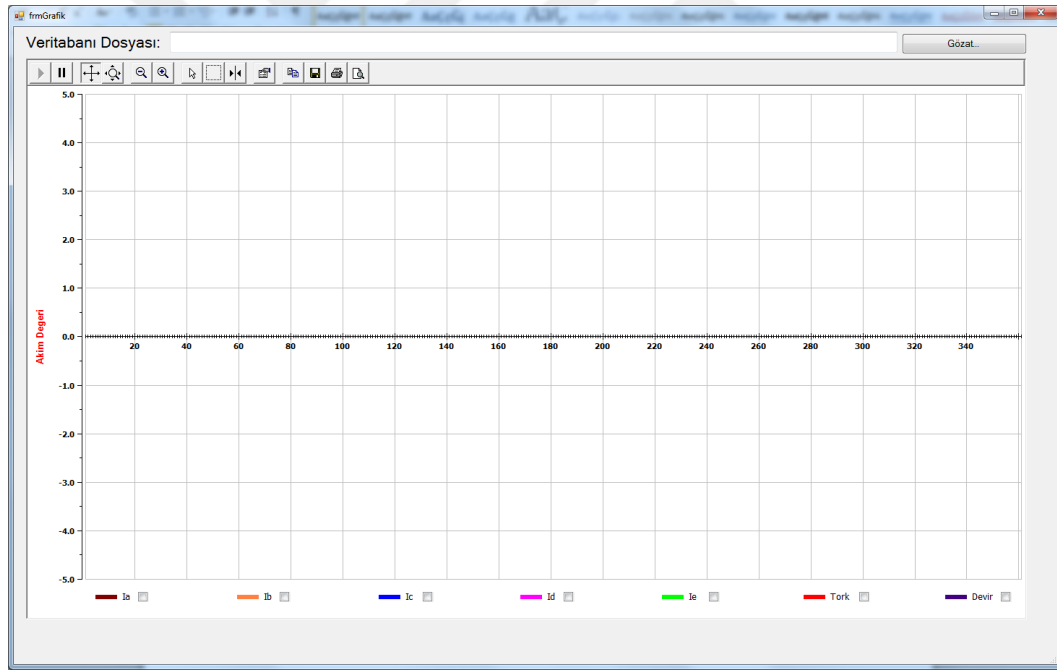
Veri işleme kartından gelen verilerden akım, tork ve tork salınım değerlerinin sürekli değişiklik göstermesinden dolayı bu değerler için bazı yazılımlar gerçekleştirilmiştir. Akım sensörlerinden alınan veriler veri tabanına kaydedilmiş ve grafik olarak çizdirilmiştir. Fakat akımların değerleri ekrana sayısal olarak yazdırılırken, 50 adet akım verisi geldiğinden bu değerlerin ortalaması alınarak ekrana bir sayısal akım değeri yazdırılmıştır. Tork sensöründen alınan değerlerde de grafik gerçek zamanlı çizdirilmiş ve veri tabanına kaydedilmiştir. Tork değerinin sayısal değeri arayüze yazdırılırken her 50 değerdeki tork verisinin ortalaması alınmış ve ekrana yazdırılmıştır.

Tork salınımı ekrana değer olarak yazdırılırken tork sensöründen alınan 20 verinin ortalaması, maksimum ve minimum değerleri bulunarak ST-ARM'nin tork salınımları hesaplanmıştır. Burada 21. tork verisi geldiğinde ilk hesaplamadaki 1. veri

çıkartılıp son 20 adet veri ile tork salınım değerleri hesaplanmıştır. Bu işlem veri alma işlemi bitinceye kadar devam etmektedir.

Arayüz programında seri port bağlantısı ve veritabanı bağlantısı kapatıldıktan sonra verilerin kaybolmaması için kullanıcıya veri tabanını yedeklemek isteyip istemediğini soran bir onay mesajı verilmiştir. Onay verilmesi durumunda, veritabanı kullanıcının seçeceği bir konuma yedeklenir.

Kapak formundaki grafikler düğmesine tıklayınca, kaydedilen veri tabanlarındaki grafiklerin gösterildiği Şekil 5.59'daki sayfa açılmaktadır. Daha önce yedeklenmiş olan veri tabanlarındaki bilgiler bu sayfa kullanılarak gösterilebilir. Bunun için sayfa üzerinde bulunan Gözet butonu ile veritabanı yolunun belirtilmesi gerekmektedir. Grafik sayfasının altında ekranda görüntülemek istenilen verinin seçilmesi checkbox kutucuklarıyla sağlanmıştır.



Şekil 5.59. Arayüzdeki grafikler sayfası

5.4. ST-ARM'nin Kontrolü için Deneysel Çalışmaların Gerçekleştirilmesi

Sezgisel algoritmalarından PSO ve DGA kullanılarak tetikleme açısı değerleri belirlendikten sonra ST-ARM'nin çalıştırılması ve verilerin alınması için gerekli olan devre tasarımları gerçekleştirilmiştir. ST-ARM ile gerçekleştirilen deneylerde karşılaştırma yapabilmek için deneylerin tümü aynı şartlarda yapılmıştır. Deneylerin

hepsi ST-ARM 1000 d/dk'da iken gerçekleştirilmiş ayrıca yüklü çalışma deneyleri ise motor gerilimi 75 V ya da akımı 5 A'ı geçmeyecek şekilde gerçekleştirilmiştir. ST-ARM motorun bu çalıştırılma şartları motorla ilgili daha önce yapılan çalışmalardaki koşullar olduğu için tercih edilmiştir.

Deneylerin gerçekleştirilmesine geçmeden önce sensörlerden alınan verilerin doğruluğu kontrol edilmiştir. İlk olarak tork sensöründen alınan verinin kontrol edilmesinde ST-ARM farklı yüklerde çalıştırılmış ve Denklem 5.32'deki ifade kullanılarak motorun tork değeri hesaplanmıştır.

$$T = \frac{60 P_m}{2 \pi n} \quad (5.32)$$

Denklem 5.32'de P_m dinamonun gücünü ifade etmektedir. Dinamonun gücü hesaplanırken verim de hesaba katılmıştır. Buradan elde edilen değerler ile tork sensöründen ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. Ölçülen değer olarak ifade edilen tork değeri arayüzde tork grafiği ekranındaki değerdir. Çizelge 5.15'de hesaplanan değerler, tork sensöründen ölçülen değerler ve Denklem 5.13 ve Denklem 5.14'e göre hesaplanan hata oranları verilmiştir.

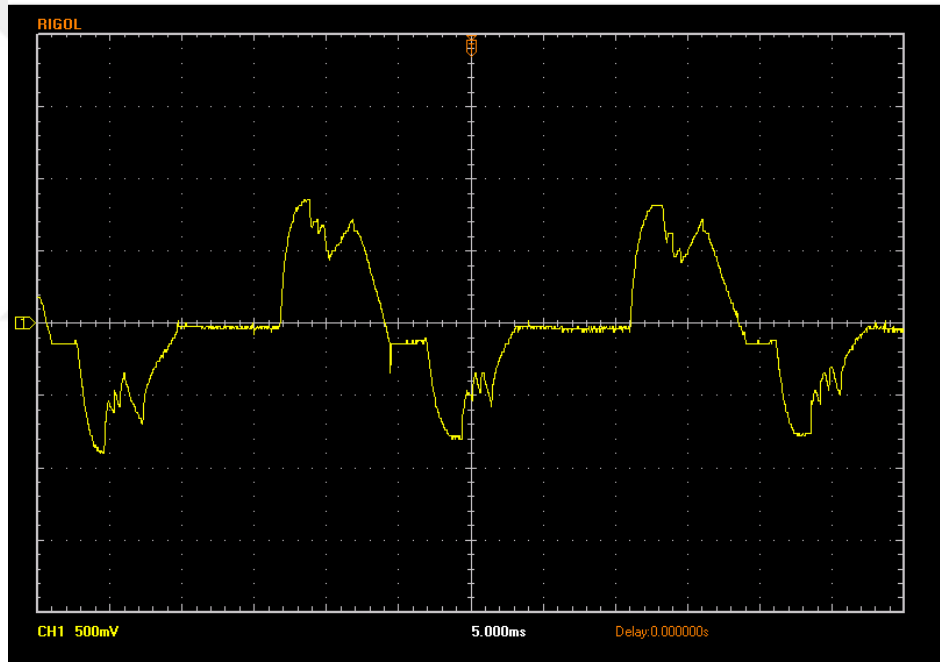
Çizelge 5.15. Tork sensöründen alınan verilerin doğruluğu-1

Hız (d/dk)	Elektriksel yük (W)	Ölçülen Tork Değeri (Nm)	Hesaplanan Tork Değeri (Nm)	Hata Oranı (%)
1010	16.61	0.82	0.75	8.72
993	50.43	1.10	1.08	1.02
1004	78.85	1.41	1.36	3.93
1000	94.79	1.67	1.56	6.36
1009	107.14	1.65	1.63	1.45
1013	121.6	1.72	1.74	1.16
Ortalama Hata (%)				3.78

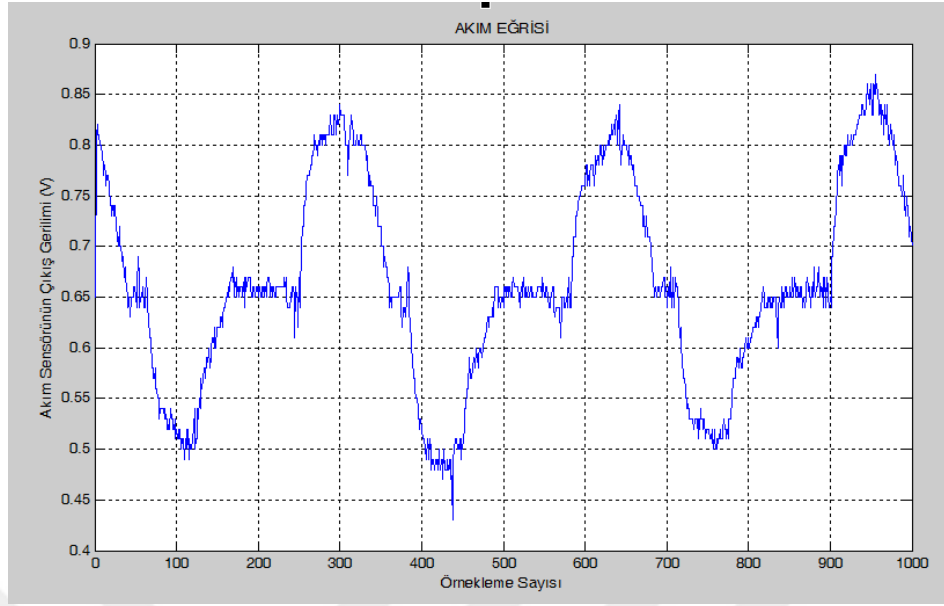
Çizelge 5.15'den de görüldüğü gibi tork sensöründen okunan değerle hesaplanan değer arasında ortalama %3.78 oranında hata bulunmaktadır. Bu farkın deneyde kullanılan ölçü aletlerinin hata payı, motorun veriminin net olarak firma tarafından belirlenememesi gibi sebeplerden meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir. %96.2

oranındaki doğruluk bizim deneysel çalışmamız için yeterli olan bir doğruluk seviyesidir.

ST-ARM'nin akım değerinin ölçülmesinde kullanılan ACS712 akım sensöründen okunan değerlerin doğruluğu için basit bir elektrik devresi oluşturulmuş ve bu devreden geçen akımın değeri hem osiloskop ile hem de arayüz ile ölçülmüştür. Ölçülen değerlerle osiloskopta ölçülen ortalama değerin %97 oranında aynı olduğu görülmüştür. ST-ARM çalıştırıldığında motorun bir faz akımı hem osiloskopta hem de arayüzde veri tabanına kaydedilmiştir. ST-ARM'nin bir faz akımının osiloskop eğrisi Şekil 5.60'da, arayüzde kaydedilen verilerden çizdirilen akım eğrisi de Şekil 5.61'de verilmiştir.



Şekil 5.60. A fazı akım eğrisi osiloskop görüntüsü



Şekil 5.61. A fazı akım eğrisi arayüzde kaydedilen değerlerin grafiği

Şekil 5.61’de veri işleme kartıyla okunan değerlerin örnekleme zamanı $100\mu s$ ’dir. Şekil 5.60 ve Şekil 5.61 karşılaştırıldığında akım eğrilerinin hem değer olarak hem de eğri olarak benzedikleri görülmektedir. Böylece akım sensörlerinden alınan değerlerin doğruluğu kanıtlanmıştır. Sensörlerden alınan verilerin doğruluğu belirlendikten sonra PSO ve DGA kullanılarak elde edilen tetikleme açılarıyla ST-ARM’nin deneysel çalışmalarının yapılmasına başlanmıştır.

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

ST-ARM'nin kontrol edilebilmesi için gereken elektronik devreler tamamlandıktan ve sensörlerden doğru veriler alındığı görüldükten sonra gerekli olan deneylerin yapılmasına başlanmıştır. Bu tez çalışmasında amaç ST-ARM'nin tork salınımlarının %56'nın altına düşürülmesini sağlamaktır. Bugüne kadar tork salınımlarının azaltılması için gerçekleştirilen çalışmalar ARM'lerin fiziksel yapısında değişiklikler yaparak ya da sürücü ve kontrol devresindeki değişikliklerle gerçekleştirilmiştir. Bu tezde faz sargılarına uygulanan gerilimin dolayısıyla akımın kontrol edildiği tetikleme sinyallerinin PSO ve DGA kullanılarak belirlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. PSO ve DGA'nın simülasyon sonuçlarından elde edilen tork salınımları belirlenen %56'lık hedefin altındaki değerlerdedir. PSO ve DGA'dan elde edilen tetikleme sinyallerinin ST-ARM'nin gerçek uygulamasındaki tork salınım değerlerini görmek için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ST-ARM'nin üzerindeki konum sensörleri kullanılarak motor kontrol edilmiş ve tork salınımları incelenmiştir.

ST-ARM yapılan deneylerde miline bağlı dinamo yardımıyla elektriksel olarak yüklenmiş ve yüklü çalışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burada ST-ARM 75 V ya da 5 A akım sınırına kadar yüklenmiştir. Dinamo ile ST-ARM'nin elektriksel olarak yüklenirken uyartım sargılarına ayarlı DC güç kaynağı bağlanmış ve AVOMETRE kullanılarak uyartım akım ve gerilim değeri ölçülmüştür. Ayrıca endüvi sargılarına bağlanan 1kW'lık taş direnç ile dinamodan elde edilen elektrik enerjisi harcanmıştır. Dinamonun ne kadar yüklendiğini belirlemek için dinamonun endüvi sargılarına AVOMETRE bağlanarak akım ve gerilim değerleri kaydedilmiştir. Dinamo ile ilgili ölçülen akım ve gerilim değerlerinden dinamonun verimini de hesaba katarak ST-ARM'nin elektriksel olarak ne kadar yüklendiği belirlenmiştir. Bu ST-ARM ile bugüne kadar yapılan çalışmalarda motor 5A'de %20 yük ile çalıştırılmıştır. Bu değer ST-ARM'nin 5 A'de 500 W'lık bir motor olarak çalıştığının ifade edilmesinden dolayı 100 W'lık bir değere karşılık gelmektedir. Ayrıca motor 5 A'lık bir akım çektiğinde ortalama olarak 1.8 Nm'lik tork değeri elde edilmiştir (Uygun D., 2012).

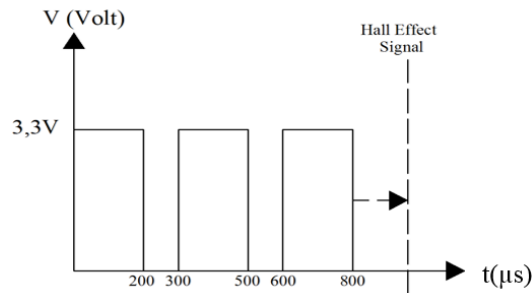
Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ST-ARM'nin konum sensörleriyle tetiklenerek çalıştırılması,

- ▶ ST-ARM'nin PSO'dan belirlenen tetikleme açılarıyla tetiklenerek çalıştırılması,
- ▶ ST-ARM'nin DGA'dan belirlenen tetikleme açılarıyla tetiklenerek çalıştırılması,

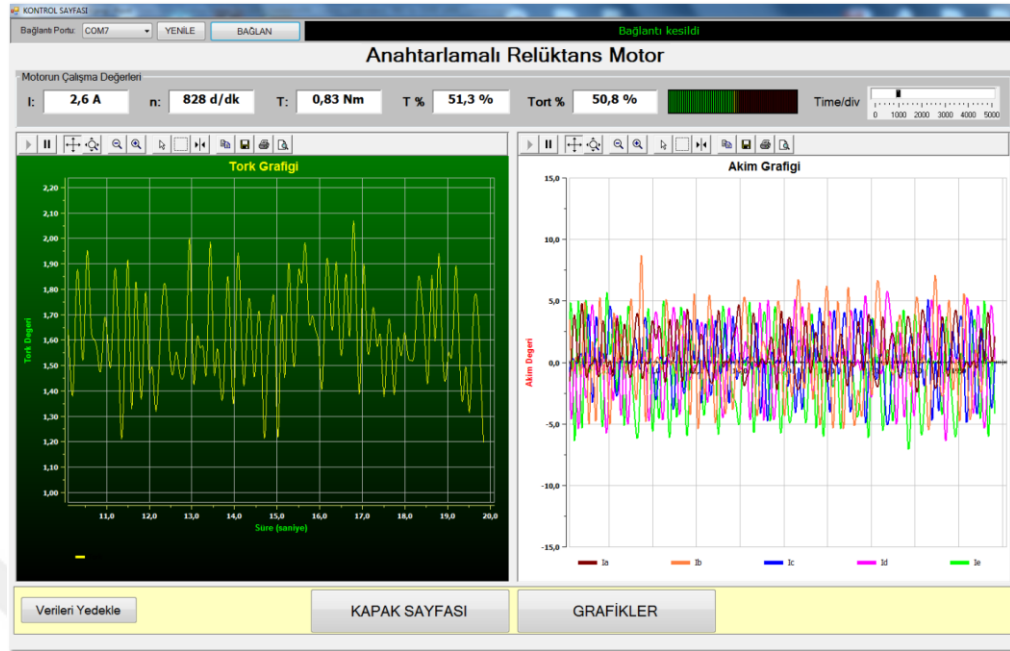
6.1. ST-ARM'nin Konum Sensörleriyle Çalıştırılması

ST-ARM'nin üzerinde 18^0 'lik açılarla yerleştirilmiş konum sensörlerinden gelen sinyallere göre Çizelge 5.1'deki faz enerjilendirilmesinin gerçekleştirildiği deneysel çalışmadır. Bu deneysel çalışmada aktif olan fazın enerjilendirmesini sağlayan H-köprü devresine tetikleme sinyali olarak Şekil 6.1'de görülen sinyal uygulanmıştır. Şekil 6.1'deki sinyal ile zamana bağlı olarak 200 μ s iletimde 100 μ s kesimde olacak şekilde tetikleme oluşturmaktadır. Bu süre ST-ARM üzerindeki konum sensörlerinden bilgi gelinceye kadar devam etmektedir. Daha sonra faz sıralaması değişerek bu sefer sıradaki fazın tetikleme sinyali Şekil 6.1'deki sinyal olacaktır. ST-ARM'ye Şekil 6.1'deki tetikleme sinyali uygulandığında motor 75 V'da 2.6 A akım ve 0.83 Nm tork değeri ile yüksüz çalışmıştır. Şekil 6.2'deki akım değeri motorun bir faz akım değerinin ortalamasının hesaplanmasıyla elde edilen sonuçlardır.



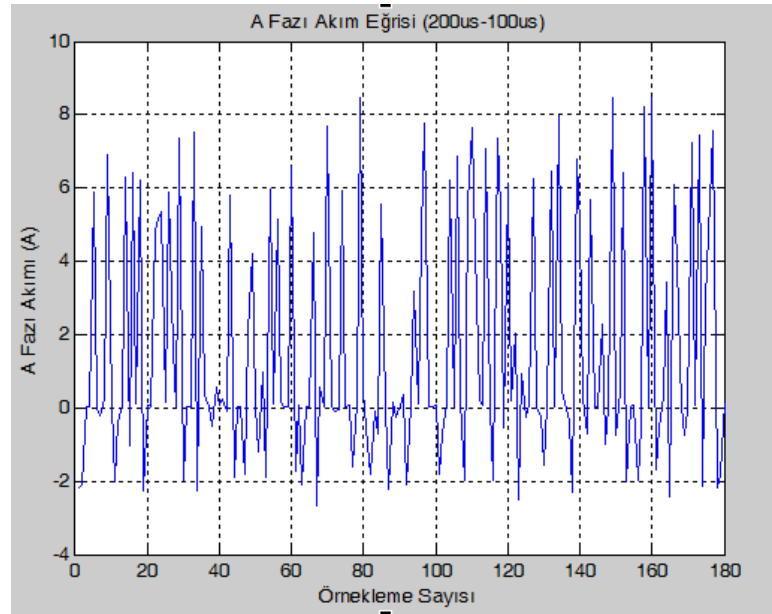
Şekil 6.1. ST-ARM $t_{on}=200\mu$ s, $t_{off}=100\mu$ s aralıklarla faz tetikleme sinyalleri

ST-ARM'nin kontrol devresi H-köprü devresini Şekil 6.1'deki sinyaller ile kontrol ettiğinde Şekil 6.2'de görülen arayüz ekranındaki değerler elde edilmiştir. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi ST-ARM 828 d/dk hızda 0.83 Nm tork ve ortalama % 50.8 salınım ile çalıştığı görülmektedir.



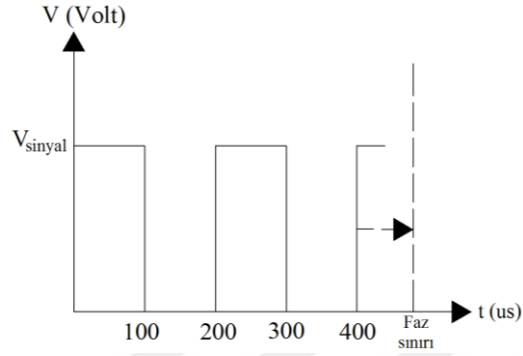
Şekil 6.2. $t_{on}=200\mu s$, $t_{off}=100\mu s$ aralıklarla tetiklenen ST-ARM'nin çalışması

ST-ARM bu tetikleme sinyalleriyle çalıştırıldığında A fazının akım grafiği Şekil 6.3'de verilmiştir.



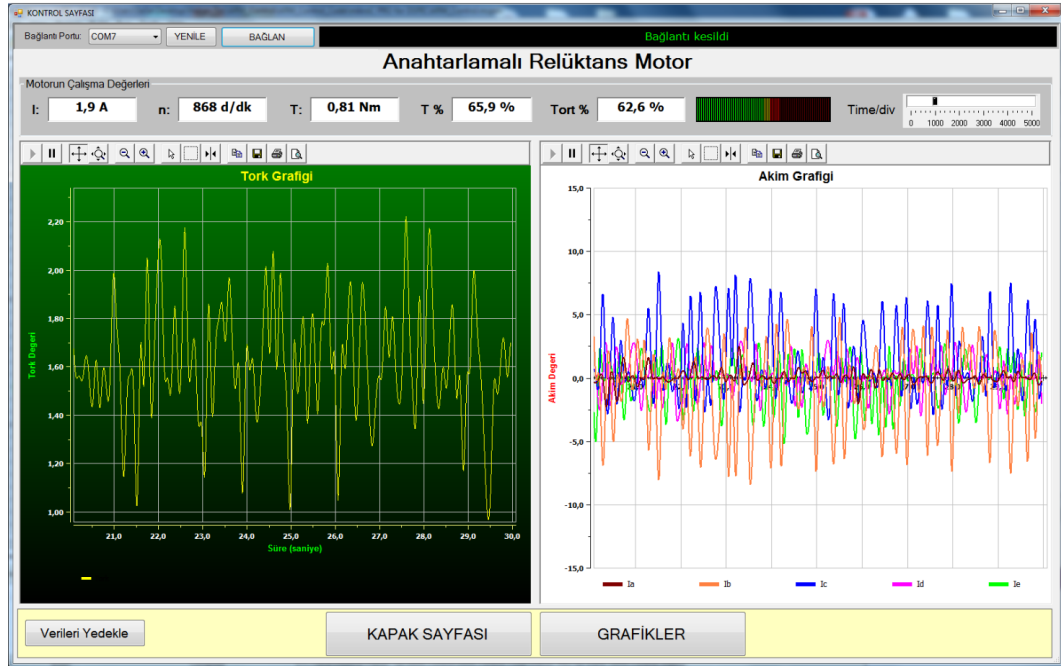
Şekil 6.3. $t_{on}=200\mu s$, $t_{off}=100\mu s$ aralıklarla tetiklenen ST-ARM'nin A fazı akım grafiği

ST-ARM faz tetikleme sinyalleri Şekil 6.4'deki gibi 100 μ s iletimde 100 μ s kesimde olacak şekilde ayarlandığında ve motora 75 V'luk bir gerilim uygulandığında elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 6.5'de verilmiştir.

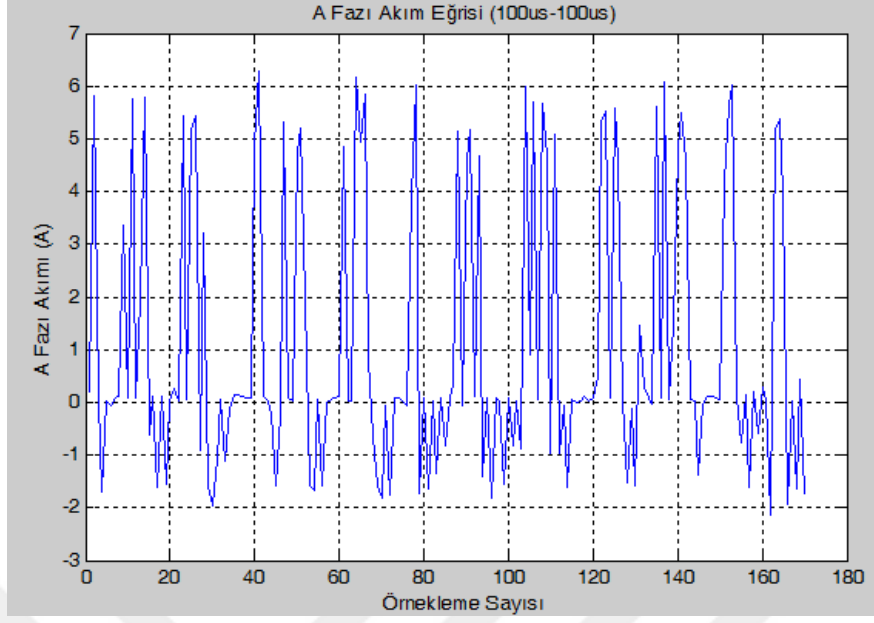


Şekil 6.4. ST-ARM $t_{on}=100 \mu$ s, $t_{off}=100 \mu$ s aralıklarla faz tetikleme sinyalleri

Şekil 6.5'de görüldüğü gibi ST-ARM 868 d/dk hızda 1.9 A akım çekerken 0.81 Nm'lik bir tork üretmektedir. Burada motorun tork salınımı %65.9 değerlerinde olmuştur.



Şekil 6.5. $t_{on}=100 \mu$ s, $t_{off}=100 \mu$ s aralıklarla tetiklenen ST-ARM'nin çalışması



Şekil 6.6. $t_{on}=100 \mu s$, $t_{off}=100 \mu s$ aralıklarla tetiklenen ST-ARM'nin A fazı akım grafiği

ST-ARM'nin fazlarının gerilimleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.4'deki tetikleme sinyalleri ile kontrol edilmiştir. ST-ARM 75 V'luk sınır geriliminde yüksüz çalıştırılmış fakat 1000 d/dk'lık hız sınırına ulaşamamıştır. Ayrıca ST-ARM'nin tork salınım oranlarının da değiştiği fakat ürettiği ortalama tork değerinin değişmediği görülmüştür. Şekil 6.6'daki akım grafiğinden akımların salınımları dikkate alındığında ST-ARM'deki tork salınımlarının Şekil 6.3'deki akım grafiğine göre daha fazla olduğu görülmüştür.

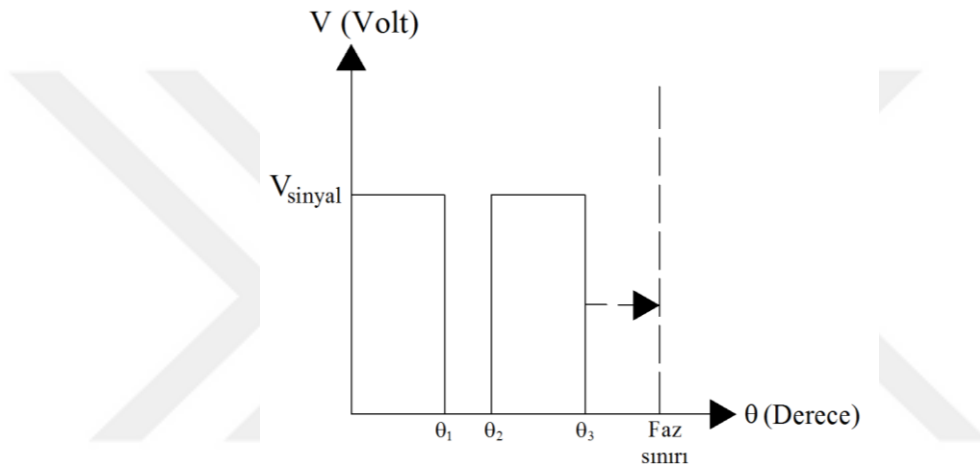
6.2. ST-ARM'nin Sezgisel Algoritmalarla Belirlenen Tetikleme Açılıyla Çalıştırılması

ST-ARM'nin matematiksel modeli kullanılarak sezgisel algoritmalarla PSO ve DGA kullanılarak tork salınımlarını minimize edecek optimum tetikleme açıları belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında PSO ve DGA parametre değerleri değiştirilerek 2 farklı şekilde çalıştırılmıştır. Bu algoritmalar PSO_1, PSO_2, DGA_1 ve DGA_2 olarak adlandırılmış ve her algoritma 10 defa çalıştırılmıştır. Her bir grupta elde edilen sonuçların ortalama değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. PSO ve DGA'nın karşılaştırılması

Parametre Değerleri	PSO_1	PSO_2	DGA_1	DGA_2
θ_1 (Derece)	6.4	7.2	6.4	6.8
θ_2 (Derece)	12	11	10.6	11
θ_3 (Derece)	15	16.4	15	14.4

Çizelge 6.1'de görülen tetikleme açı değerleri Şekil 6.7'de görüldüğü gibi ST-ARM'ye uygulanmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler yüksüz çalışma ve yüklü çalışma deneyleri olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.7. Bir faz tetikleme sinyali

DeneySEL çalışmaların bazılarında ST-ARM'nin bir faz akımının 18^0 'lık değişim grafikleri verilmiştir. ST-ARM bütün deneylerde 1000 d/dk'da çalıştırıldığına göre 18^0 alma süresi 3 ms'dir. Arayüzde kaydedilen verilerin örnekleme zamanı 600 μ s'dir.

6.2.1. ST-ARM'nin PSO'dan belirlenen tetikleme açılarıyla tetiklenerek çalıştırılması

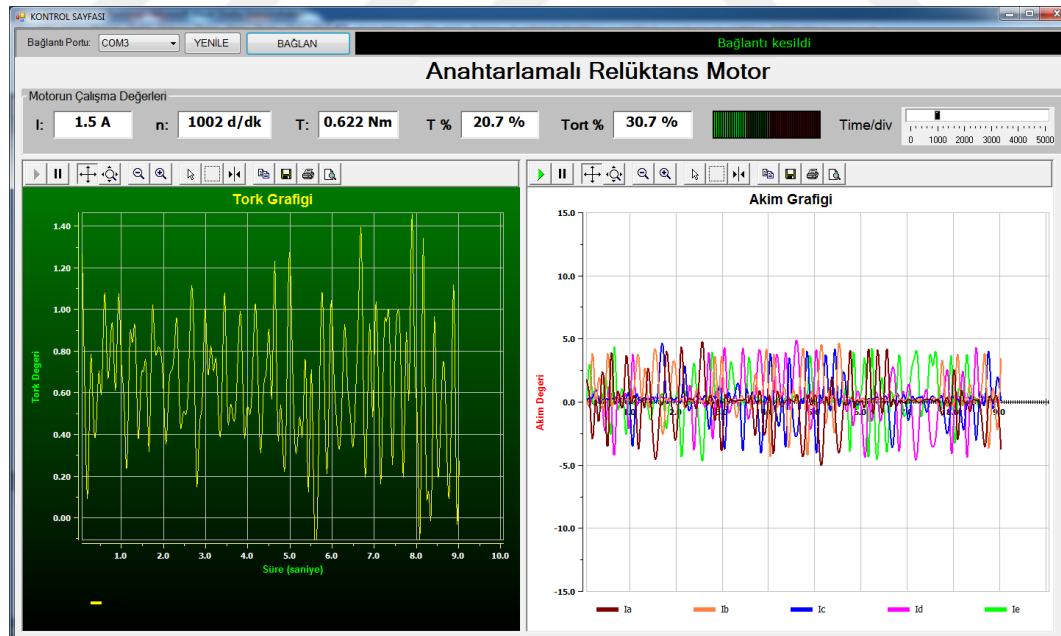
Sezgisel algoritmalarından PSO kullanılarak Çizelge 6.2'deki değerler elde edilmiştir. Bu değerler ile ST-ARM kontrol edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.2. PSO kullanılarak belirlenen tetikleme açısı değerleri

Parametre Değerleri	PSO_1	PSO_2
θ_1 (Derece)	6.4	7.2
θ_2 (Derece)	12	11
θ_3 (Derece)	15	16.4

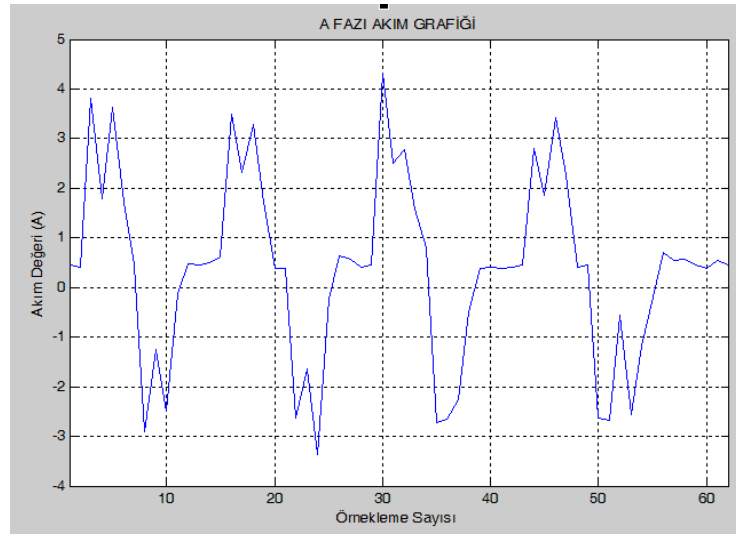
$\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=12^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açısı değerleriyle ST-ARM'nin çalıştırılması

PSO_1 algoritması 10 defa çalıştırılarak elde edilen sonuçların ortalaması olarak elde edilen $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=12^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açısı değerleriyle ST-ARM ilk olarak yüksüz çalıştırılmıştır. ST-ARM yüksüz çalıştırıldığında elde edilen verilerin görüldüğü arayüz Şekil 6.8'de verilmiştir. Bu tetikleme açılarıyla kontrol edilen ST-ARM'nin yüksüz çalışma deneyinde motor 42 V'da 1002 d/dk hıza ulaşmıştır. Şekil 6.8'de görüldüğü gibi ST-ARM 1002 d/dk'da 1.5 A akım çekerken 0.622 Nm'lik tork üretmektedir. ST-ARM'nin PSO_1'dan elde edilen tetikleme açılarıyla yüksüz çalıştırılmasında motorun ortalama tork salınımının %30.7 olduğu görülmüştür.



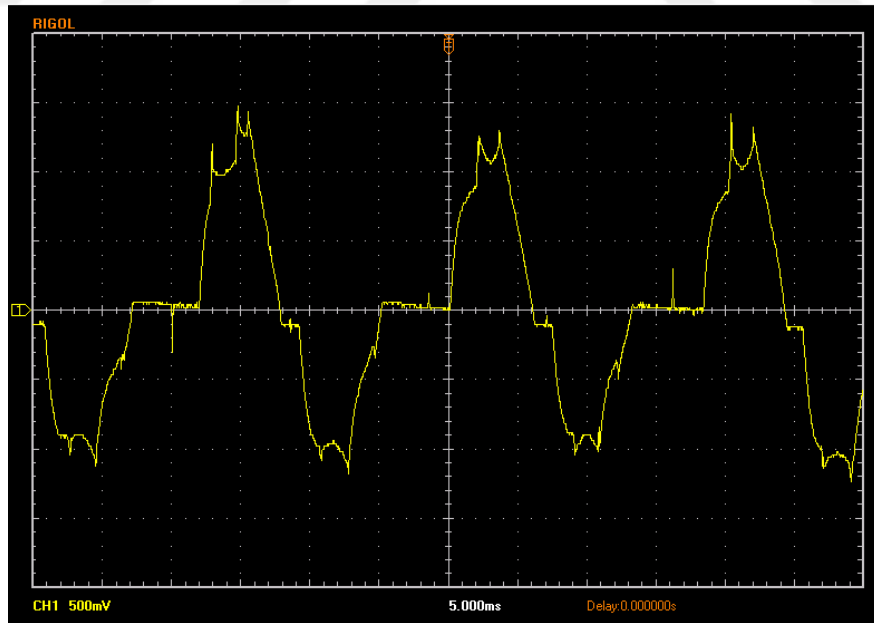
Şekil 6.8. ST-ARM'nin $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=12^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma tork grafiği

PSO_1 ile belirlenen tetikleme açılarıyla çalıştırılan ST-ARM'nin arayüz ile kaydedilen verilerinden çizdirilen akım eğrisi Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9. ST-ARM'nin $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=12^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma arayüz akım grafiği

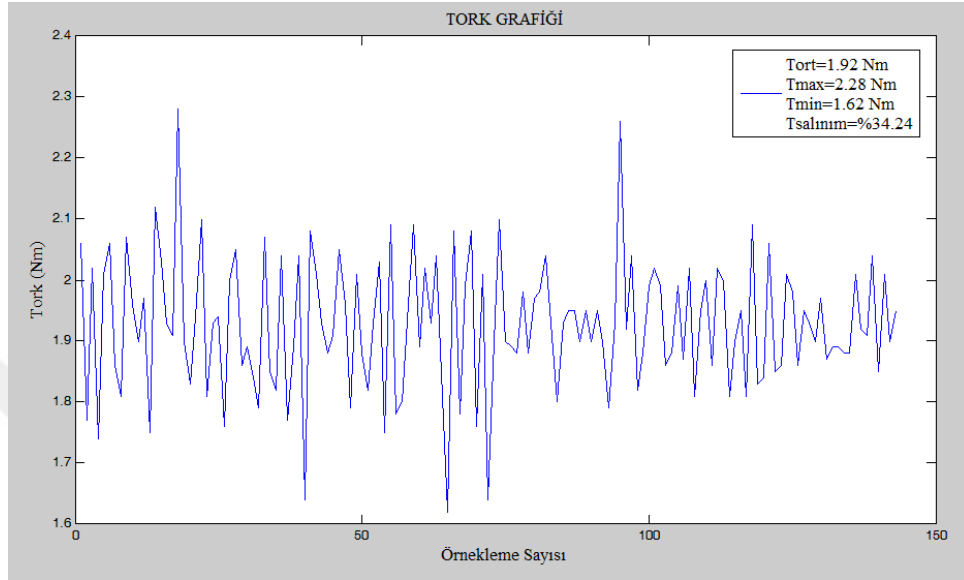
Şekil 6.9'da verilen akım eğrisinin osiloskop görüntüsü Şekil 6.10'da verilmiştir. Şekil 6.9 ile Şekil 6.10 incelendiğinde akım eğrilerinin periyotları aynı olduğu görülmektedir. Osiloskop hızı veri işleme kartının hızından daha iyi olduğu dikkate alındığında eğrilerin şekillerindeki benzerlik kabul edilebilir sınırlar içerisinde.



Şekil 6.10. ST-ARM'nin $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=12^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma akım osiloskop görüntüsü

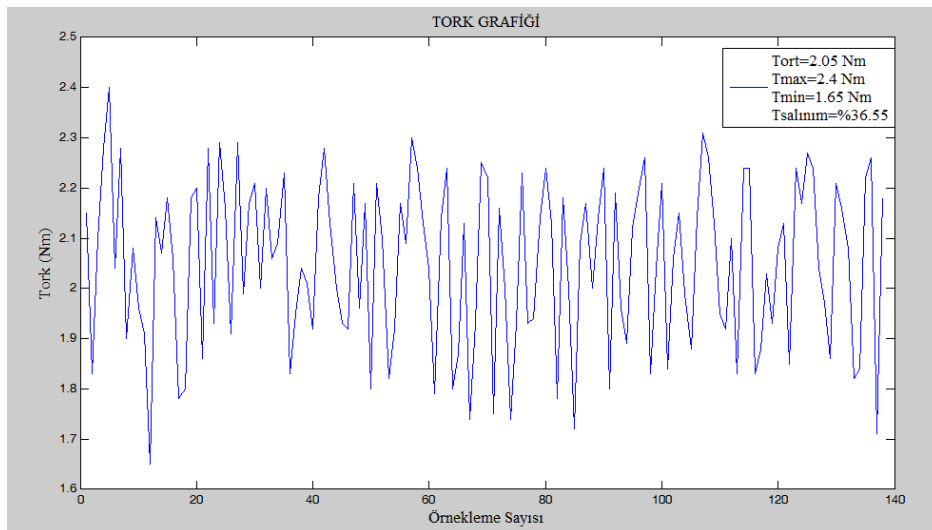
$\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=12^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açılarıyla kontrol edilen ST-ARM 70 W'lık bir elektriksel yükü yüklendiğinde 1000 d/dk hızda 62 V, 3.4 A'lık akım çekerken

1.92 Nm tork üretmiştir. Bu çalışma durumundaki motorun arayüz programında kaydedilen verilerden MATLAB programında çizilen tork eğrisi Şekil 6.11’de verilmiştir. 70 W’lık bir yük ile çalıştırılan motorun ortalama tork salınım %34.24 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.11. ST-ARM’nin $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=12^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açılarıyla 70 W elektriksel yüklü çalışması durumu için tork grafiği

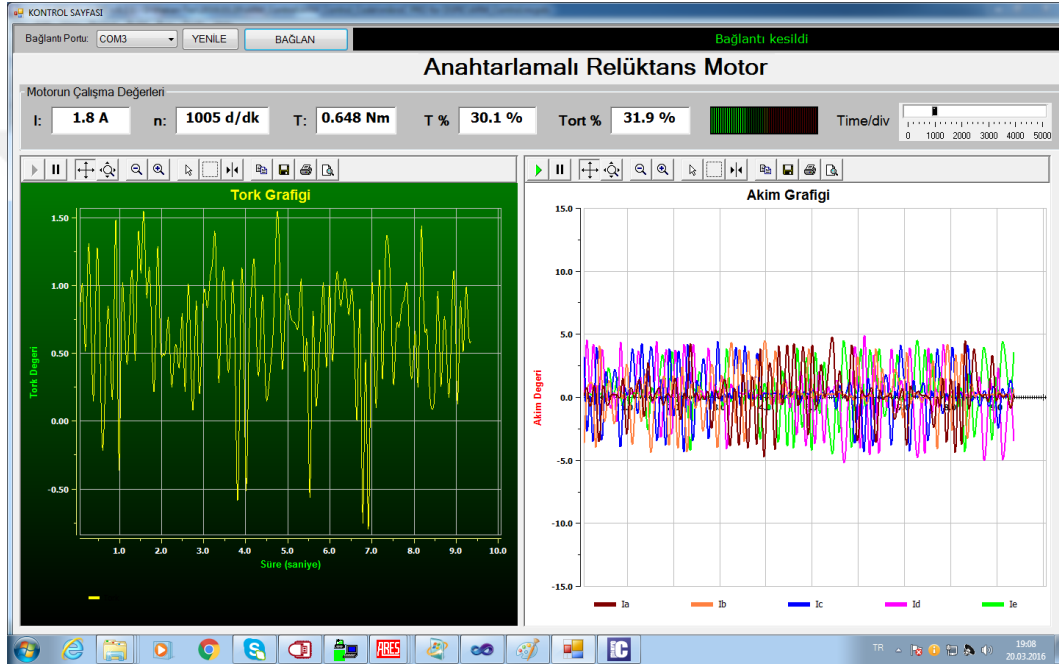
ST-ARM’nin elektriksel yükü 110 W’a çıkartıldığında 1000 d/dk hızda 75 V, 4.1 A’lık akım çektiği ve 2.05 Nm tork ürettiği görülmüştür. 110 W’lık bir yük ile çalıştırılan motorun ortalama tork salınım %36.55 olduğu Şekil 6.12’deki tork grafiğinden görülmektedir.



Şekil 6.12. ST-ARM’nin $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=12^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açılarıyla 110 W elektriksel yüklü çalışması durumu için tork grafiği

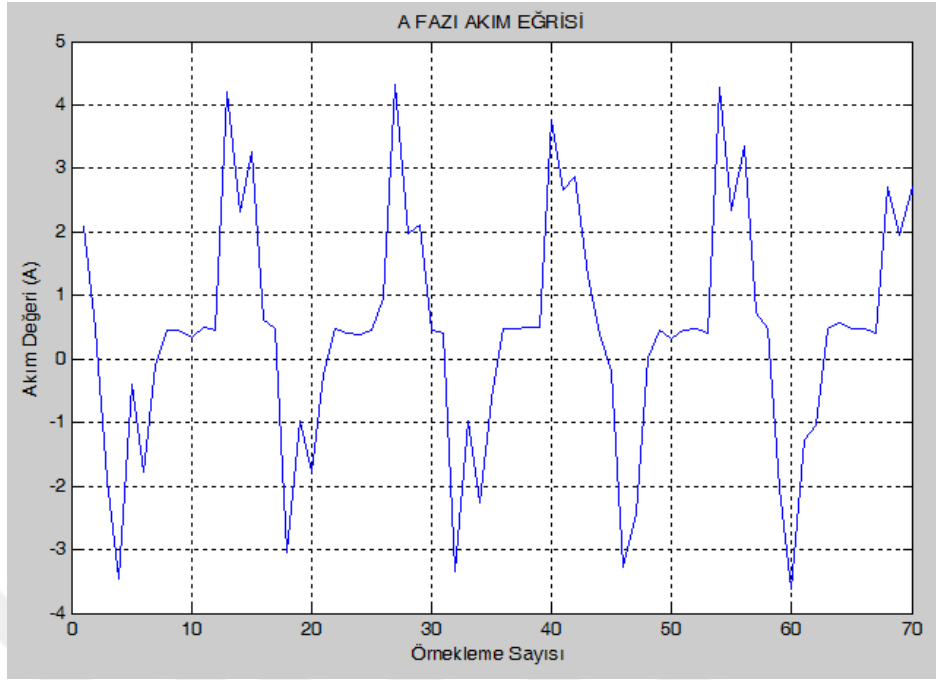
$\theta_1=7.2^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=16.4^0$ tetikleme açı değerleriyle ST-ARM'nin çalıştırılması

PSO_2 algoritması çalıştırıldığında $\theta_1=7.2^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=16.4^0$ tetikleme açı değerleri üretilmiştir. Bu üretilen tetikleme açılarıyla kontrol edilen ST-ARM yüksüz çalıştırıldığında 41 V'da, 1.8 A çektiği görülmüştür. ST-ARM'nin yüksüz çalışmadaki verileri Şekil 6.11'de verilmiştir. Şekil 6.13'de görüldüğü gibi ST-ARM 1005 d/dk'da 0.648 Nm'lik tork üretirken ortalama tork salınımının %31.9 olduğu görülmektedir.



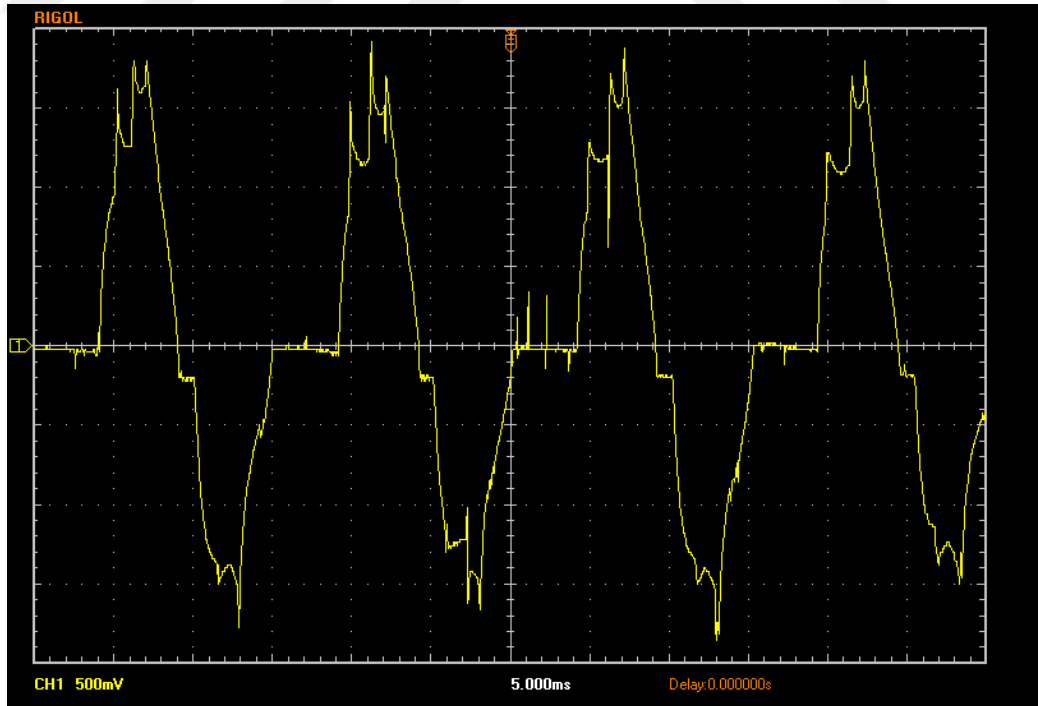
Şekil 6.13. ST-ARM'nin $\theta_1=7.2^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=16.4^0$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma tork grafiği

$\theta_1=7.2^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=16.4^0$ tetikleme açılarıyla çalıştırılan ARM'nin bir faz akım eğri grafiği Şekil 6.14'de verilmiştir. PSO_1'deki tetikleme açılarından $\theta_1=6.4^0$ olduğunda Şekil 6.9'da faz akımlarının tepe değeri yaklaşık 3.8 A'e çıkarken PSO_2'de $\theta_1=7.2^0$ olduğunda akımın tepe değeri yaklaşık 4.2 A'e çıkmaktadır.



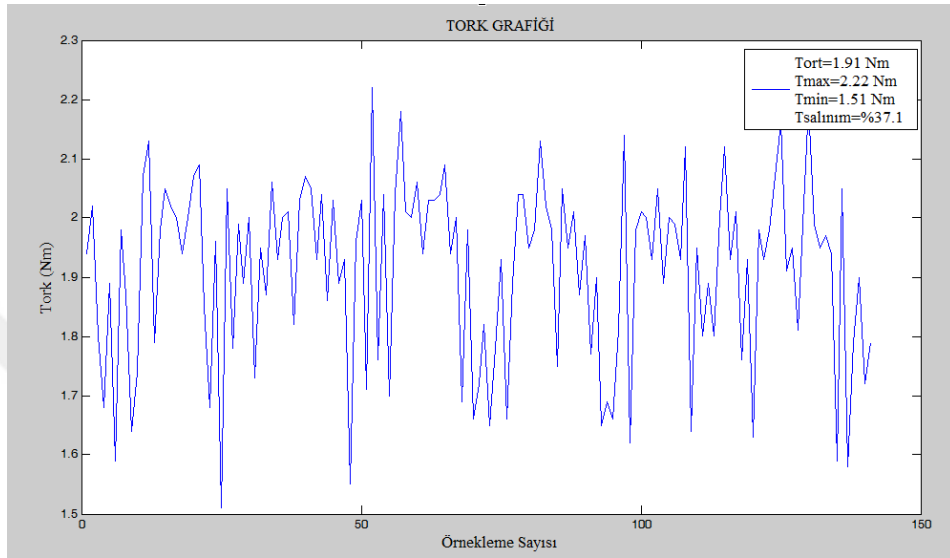
Şekil 6.14. ST-ARM'nin $\theta_1=7.2^\circ$, $\theta_2=11^\circ$, $\theta_3=16.4^\circ$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma arayüz akım grafiği

ST-ARM'nin belirlenen şartlarda çalıştırılması durumunda akım grafiği Şekil 6.15'de verilmiştir.



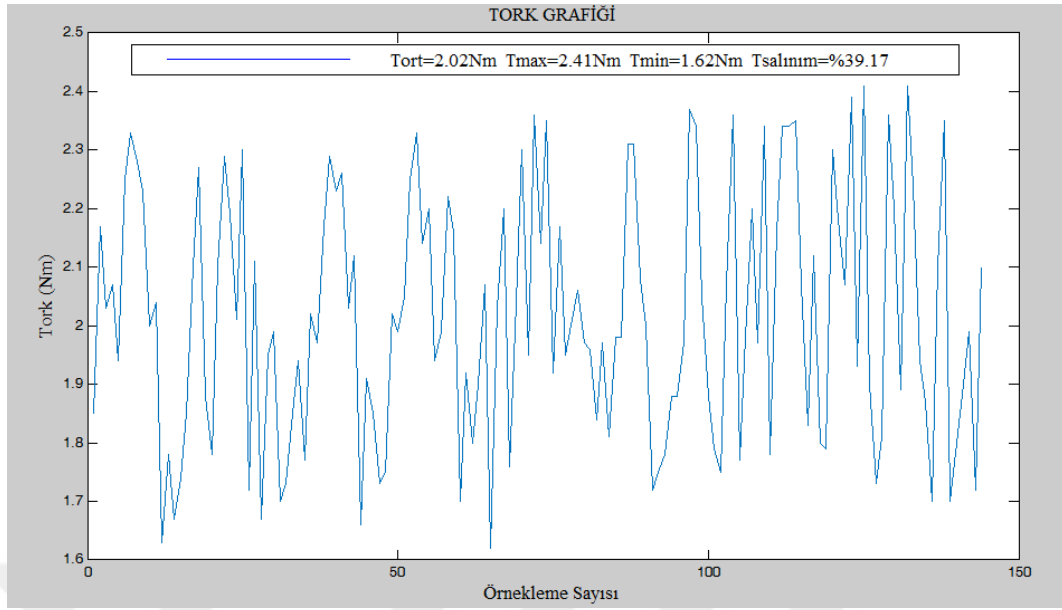
Şekil 6.15. ST-ARM'nin $\theta_1=7.2^\circ$, $\theta_2=11^\circ$, $\theta_3=16.4^\circ$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma osiloskop akım görüntüsü

ST-ARM 66 W'lık bir yükle yüklendiğinde 1000 d/dk hızda 62 V gerilim ile 4.2 A akım çekmektedir. ST-ARM'nin 66W yüklü çalışma durumundaki tork grafiği Şekil 6.12'de verilmiştir. Şekil 6.16'dan da görüldüğü gibi ST-ARM'nin ürettiği tork değeri 1.91 Nm iken tork salınımı %37.1 değerindedir.



Şekil 6.16. ST-ARM'nin $\theta_1=7.2^\circ$, $\theta_2=11^\circ$, $\theta_3=16.4^\circ$ tetikleme açılarıyla 66 W elektriksel yüklü çalışma tork grafiği

ST-ARM 100 W'lık bir yükle yüklendiğinde 1000 d/dk hızda 73 V gerilimde, 5 A akım çekmektedir. ST-ARM'nin yüklü çalışma durumundaki tork grafiği Şekil 6.17'de verilmiştir. Şekil 6.17'den de görüldüğü gibi ST-ARM'nin tork salınımı %39.71 değerindedir.



Şekil 6.17. ST-ARM'nin $\theta_1=7.2^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=16.4^0$ tetikleme açılarıyla 100 W elektriksel yüklü çalışma tork grafiği

6.2.2. ST-ARM'nin DGA'dan belirlenen tetikleme açılarıyla tetiklenerek çalıştırılması

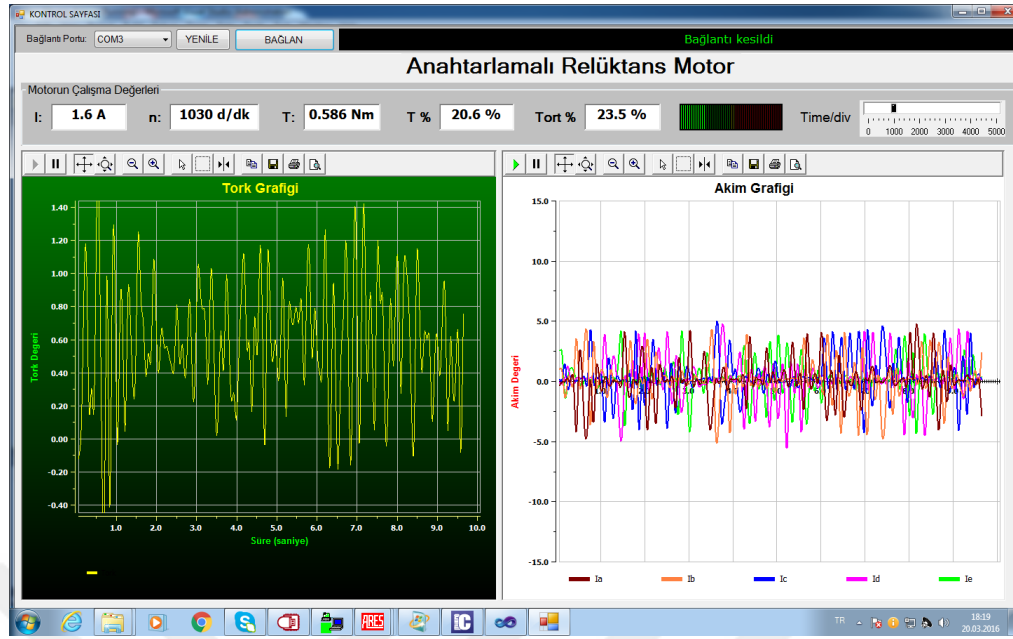
Sezgisel algoritmalarla DGA kullanılarak belirlenen tetikleme açılarının değerleri Çizelge 6.3'de verilmiştir. Çizelge 6.3'deki değerler kullanılarak ST-ARM'nin yüksüz ve yüklü çalışma durumlarındaki tork salınımı değerleri ölçülmüştür.

Çizelge 6.3. DGA kullanılarak belirlenen tetikleme açı değerleri

Parametre Değerleri	DGA_1	DGA_2
θ_1 (Derece)	6.4	6.8
θ_2 (Derece)	10.6	11
θ_3 (Derece)	15	14.4

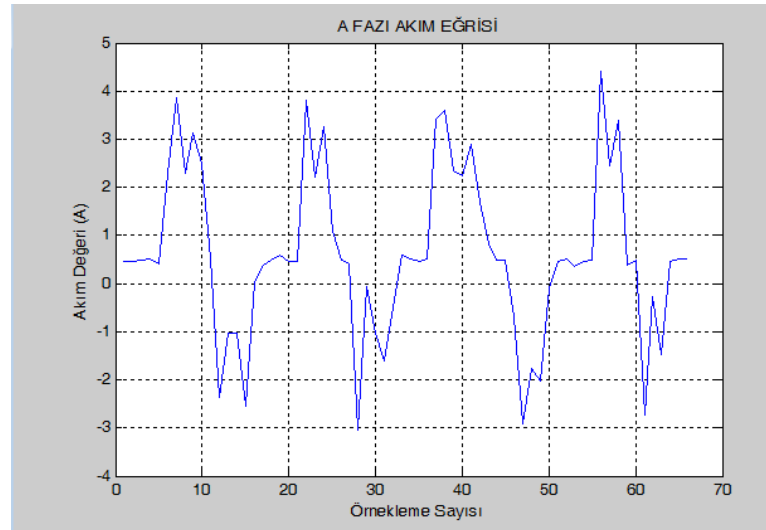
$\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=10.6^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açı değerleriyle ST-ARM çalıştırılması

DGA_1 çalıştırıldığında tetikleme açıları $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=10.6^0$, $\theta_3=15^0$ olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu açı değerleri kullanılarak ST-ARM yüksüz çalıştırıldığında 42 V'da 1.6 A akım çekmektedir. ST-ARM yüksüz çalışmada 0.586 Nm tork değeri üretirken tork salınımının da %23.5 olduğu Şekil 6.18'den görülmektedir.

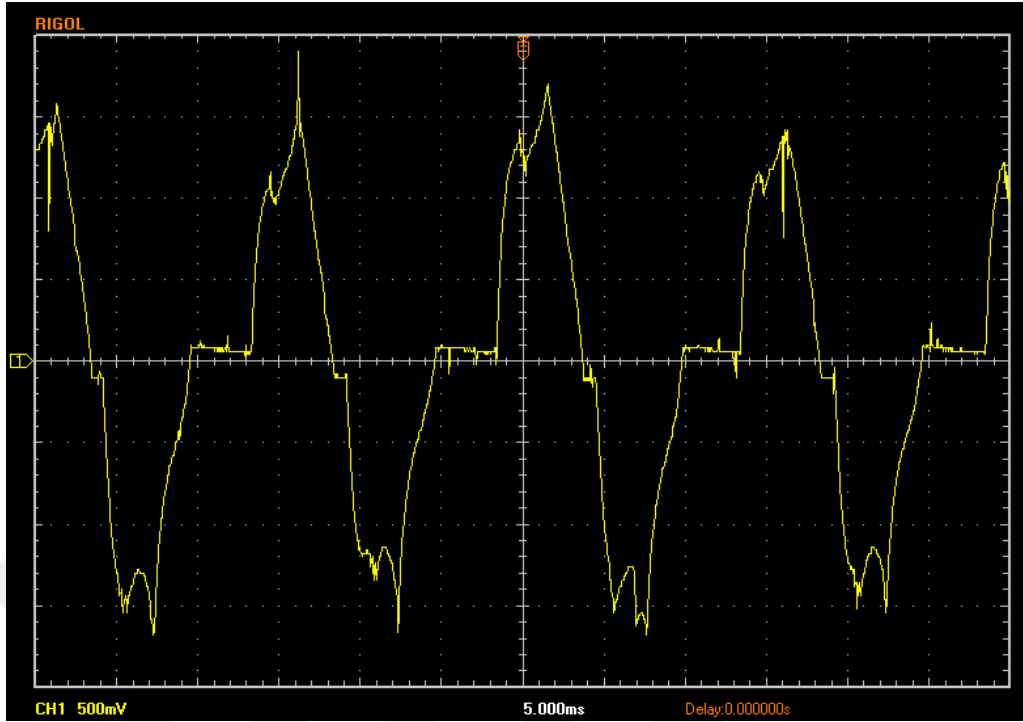


Şekil 6.18. ST-ARM'nin $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=10.6^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma tork grafiği

Bu çalışma durumunda bir faz akım eğrisinin arayüzden elde edilen verilerle çizdirilmiş hali Şekil 6.19'da, osiloskop görüntüsü ise Şekil 6.20'de verilmiştir. ST-ARM'nin çektiği akımın tepe değeri Şekil 6.19'dan ortalama 3.8 A olduğu görülmektedir. Ayrıca arayüzden elde edilen verilerle çizdirilen akım eğrisi ile osiloskop görüntüsündeki akım eğrisi şekilsel olarak benzerlik göstermektedir.

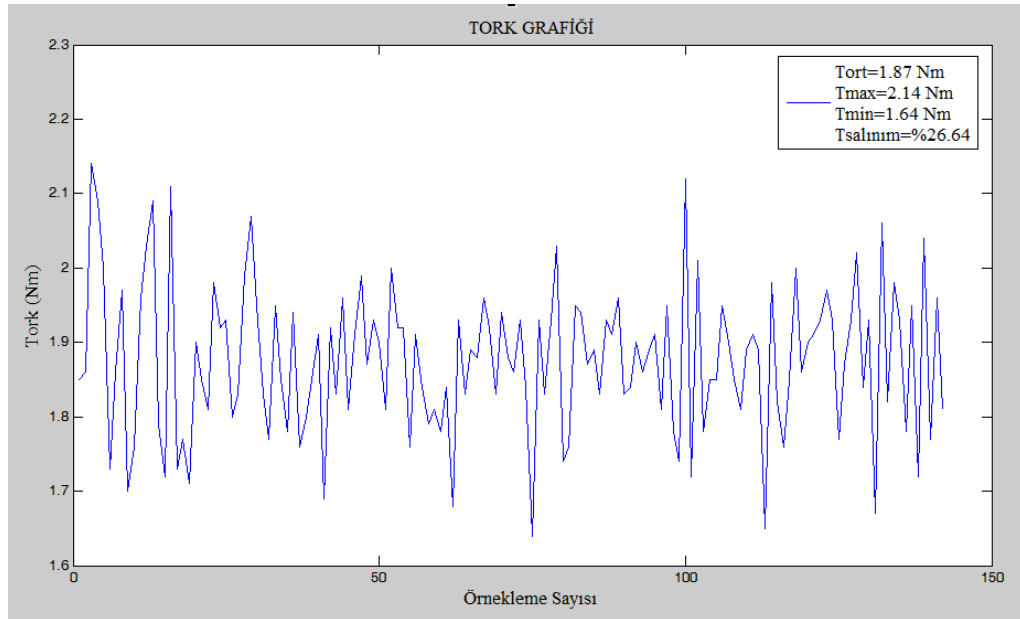


Şekil 6.19. ST-ARM'nin $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=10.6^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma arayüz akım grafiği



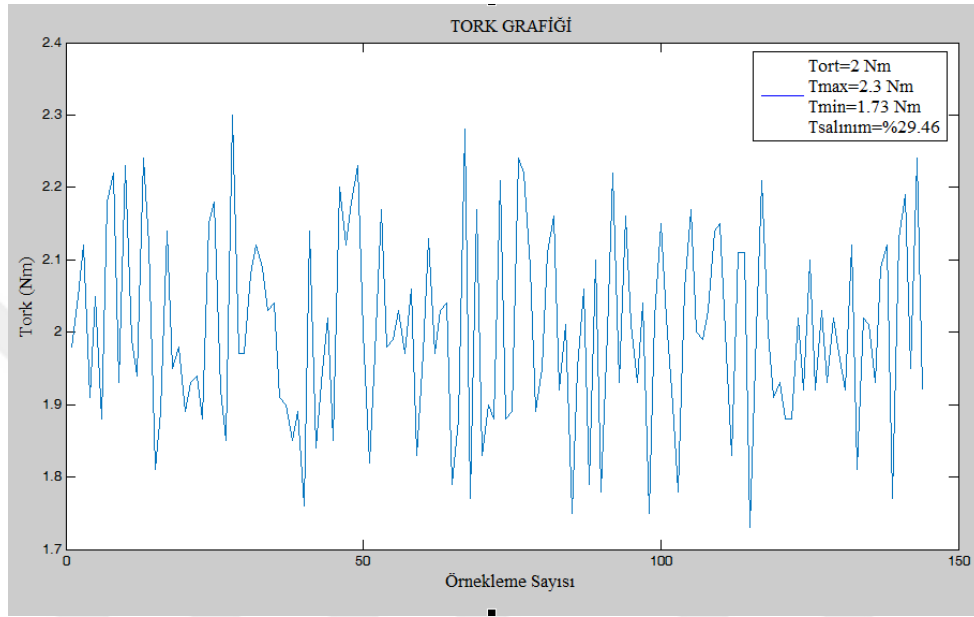
Şekil 6.19. ST-ARM'nin $\theta_1=6.4^\circ$, $\theta_2=10.6^\circ$, $\theta_3=15^\circ$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma osiloskop akım görüntüsü

ST-ARM elektriksel olarak dinamo ile 52 W yüklendiğinde 57 V'da 3.2 A akım çekmiştir. 52 W yüklü çalışma durumunda ST-ARM 1000 d/dk'da ortalama 1.87 Nm tork üretirken tork salınımının %26.64 olduğu görülmüştür. 52 W elektriksel yükle çalışan ST-ARM'nin tork grafiği Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.20. ST-ARM'nin $\theta_1=6.4^\circ$, $\theta_2=10.6^\circ$, $\theta_3=15^\circ$ tetikleme açılarıyla 52 W elektriksel yüklü çalışma tork grafiği

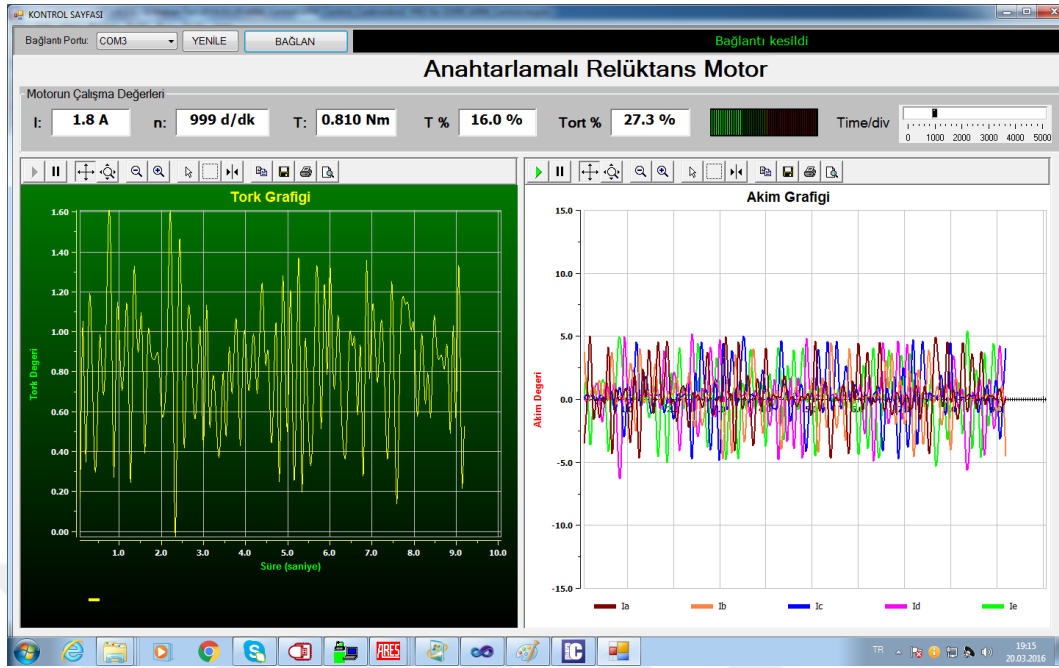
ST-ARM 110 W elektriksel yükle yüklendiğinde 75 V’da 4.3 A akım çekmiştir. 110 W yüklü çalışma durumunda ST-ARM 1000 d/dk’da ortalama 2 Nm tork üretirken tork salınımının %29.46 olduğu görülmüştür. Yüklü çalışma durumundaki tork salınımı Şekil 6.21’de verilmiştir.



Şekil 6.21. ST-ARM’nin $\theta_1=6.4^0$, $\theta_2=10.6^0$, $\theta_3=15^0$ tetikleme açılarıyla 110 W elektriksel yüklü çalışma tork grafiği

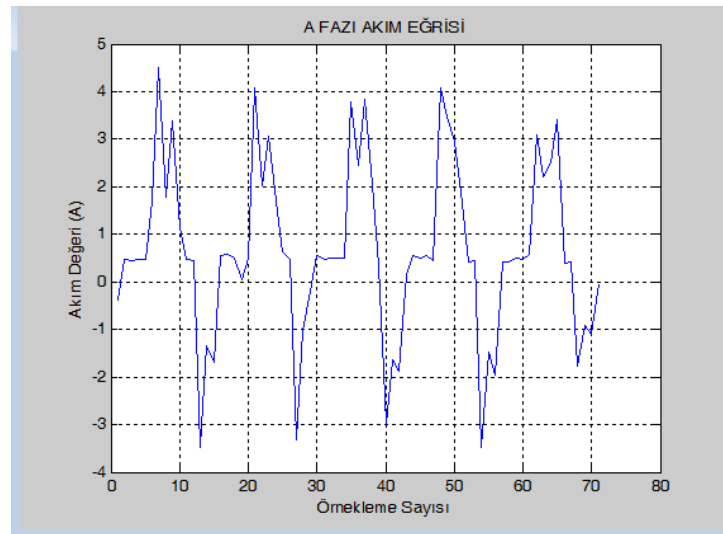
$\theta_1=6.8^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=14.4^0$ tetikleme açısı değerleriyle ST-ARM çalıştırılması

DGA_2 çalıştırılması sonucunda elde edilen $\theta_1=6.8^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=14.4^0$ tetikleme açılarıyla ST-ARM yüksüz çalıştırıldığında 40 V’da 1.8 A akım çekerken 0.810 Nm’lik tork üretmiştir. ST-ARM’nin $\theta_1=6.8^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=14.4^0$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma deneyinin verileri Şekil 6.17’de verilmiştir. Şekil 6.22’de görüldüğü gibi ST-ARM yaklaşık 1000 d/dk’da 1.8 A akımla çalışırken tork salınımı %27.3 değerinde olmuştur.

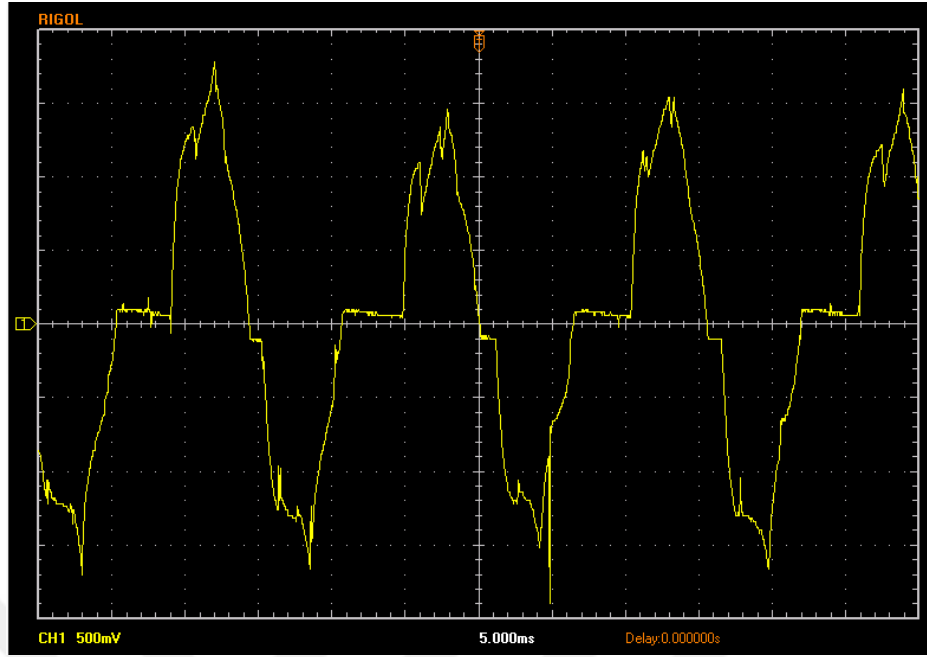


Şekil 6.22. ST-ARM'nin $\theta_1=6.8^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=14.4^0$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma tork grafiği

$\theta_1=6.80$, $\theta_2=110$, $\theta_3=14.40$ tetikleme açılarıyla çalışan ST-ARM'nin bir faz akım eğrisinin arayüzden elde edilen verilerle çizdirilmiş hali Şekil 6.23'de, osiloskop görüntüsü ise Şekil 6.24'de verilmiştir. ST-ARM'nin çektiği akımın tepe değeri Şekil 6.23'den ortalama 4 A olduğu görülmektedir. Ayrıca arayüzden elde edilen verilerle çizdirilen akım eğrisi ile osiloskop görüntüsündeki akım eğrisi şekilsel olarak benzerlik göstermektedir.

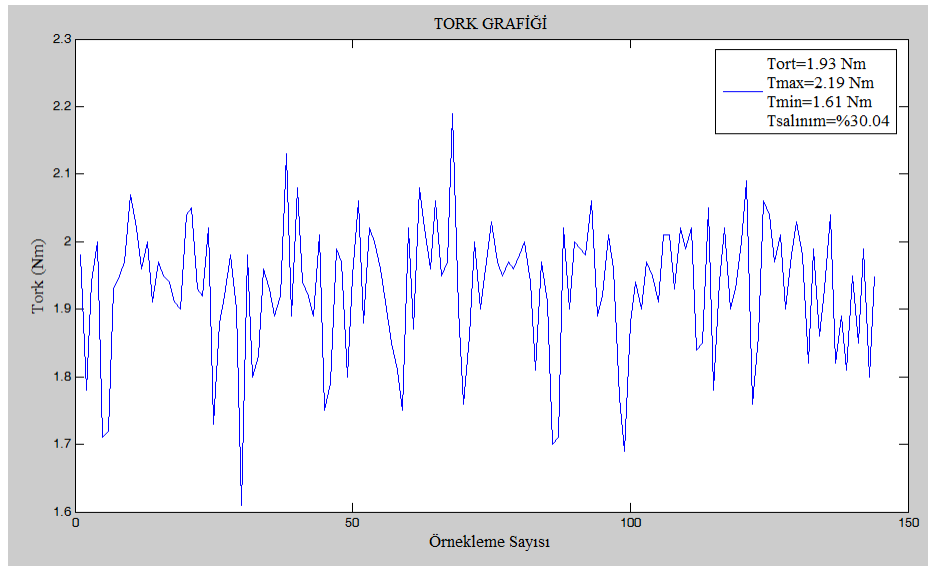


Şekil 6.23. ST-ARM'nin $\theta_1=6.8^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=14.4^0$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma arayüz akım grafiği



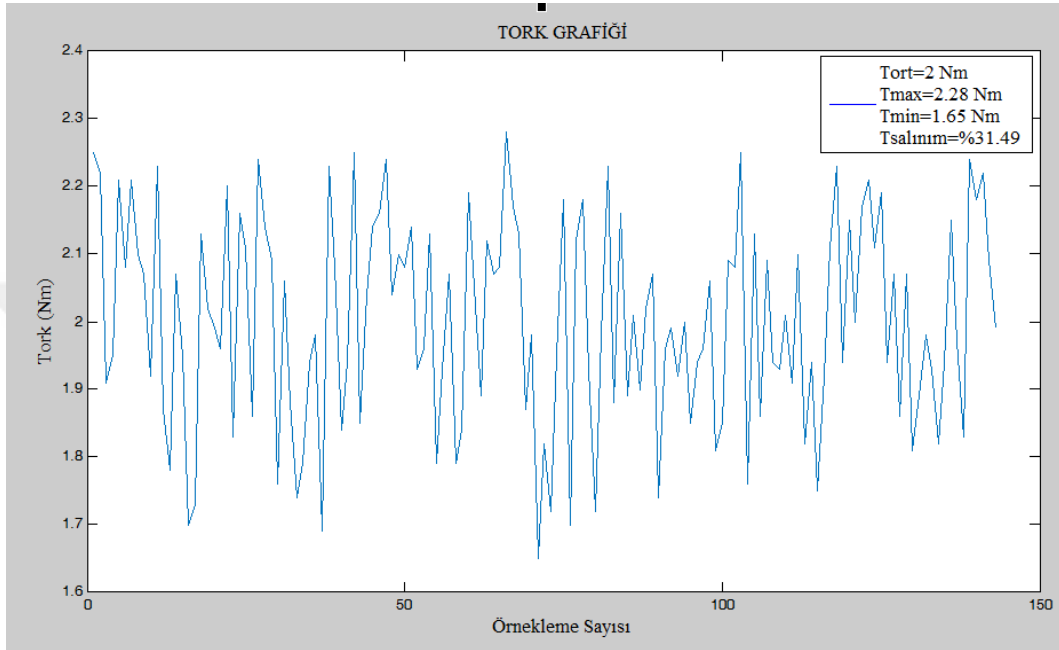
Şekil 6.24. ST-ARM'nin $\theta_1=6.8^\circ$, $\theta_2=11^\circ$, $\theta_3=14.4^\circ$ tetikleme açılarıyla yüksüz çalışma osiloskop akım görüntüsü

DGA_2 kullanılarak belirlenen $\theta_1=6.8^\circ$, $\theta_2=11^\circ$, $\theta_3=14.4^\circ$ tetikleme açılarıyla ST-ARM 72 W'lık yüklü çalışmasında 62 V'da 3.8 A akım çekmektedir. ST-ARM bu çalışmada 1.93 Nm'lik tork üretirken ortalama tork salınım değerinin %30.04 olduğu Şekil 6.25'den görülmektedir.



Şekil 6.25. ST-ARM'nin $\theta_1=6.8^\circ$, $\theta_2=11^\circ$, $\theta_3=14.4^\circ$ tetikleme açılarıyla 72 W elektriksel yüklü çalışma tork grafiği

DGA_2 kullanılarak belirlenen $\theta_1=6.8^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=14.4^0$ tetikleme açılarıyla ST-ARM'nin 100 W'lık yüklü çalışmasında 71 V'da 4.4 A akım çekmektedir. ST-ARM bu çalışmada 2 Nm'lik tork üretirken ortalama tork salınım değerinin %31.49 olduğu Şekil 6.26'dan görülmektedir.



Şekil 6.26. ST-ARM'nin $\theta_1=6.8^0$, $\theta_2=11^0$, $\theta_3=14.4^0$ tetikleme açılarıyla 100 W elektriksel yüklü çalışma tork grafiği

Sezgisel algoritmalarla üretilen tetikleme açılarıyla yüksüz ve farklı yüklerde gerçekleştirilen deneylerin hepsinde ST-ARM'nin tork salınımlarının %56 değerinin altında olduğu görülmüştür. Bu da bulunan değerlerin ve algoritmaların başarılı olduğu anlamını taşımaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde üretim maliyeti düşük, performansı yüksek ve kolay denetlenebilen motorların kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bundan dolayı basit ve dayanıklı yapısı, ucuz maliyeti, düşük ataleti, yüksek hızı ve verimi ile ST-ARM'ler günümüzde giderek kullanımı artmaya başlayan elektrik makineleridir. ST-ARM'leri klasik ARM'lerden ayıran en önemli özellik rotor yapısının parçalı olarak tasarlanmasıdır. ST-ARM'ler, ARM'lere göre manyetik akı yollarını kısalttıkları için daha fazla tork üretmektedirler. ST-ARM'lerin birçok avantaja sahip olmalarına rağmen halen endüstrideki kullanım alanları çok fazla artmamıştır. Bunun en önemli nedenleri arasında rotor konumunun bilinmesinin gerekliliği ve dolayısıyla bir pozisyon sensörüne gereksinim duyulması, torkta meydana gelen ani çökmeler ve dolayısıyla oluşan tork dalgalılığı ve akustik gürültü gösterilebilir. ARM'lerin en büyük dezavantajı olan tork dalgalılığı üzerine yapılan birçok çalışmada bu problem, motorun fiziksel yapısı, sürme devresi ya da kontrol devresi üzerinden çözülmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasında ST-ARM'nin tork salınımlarının azaltılması üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma da seri üretim olmayan yine akademik olarak üretilmiş ST-ARM kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan ST-ARM bipolar olarak kontrol edilmiştir. Bundan dolayı ST-ARM'nin sürücü devresi olarak kontrol edilmesi kolay, her fazın bağımsız olarak kontrol edildiği, hataların daha kolay tolere edilebildiği H-köprü sürücüsü tercih edilmiştir. Sürücünün kontrol devresi olarak üzerinde dsPIC33EP512MU810 olan SnadPIC PIC Microchip Geliştirme Kartı kullanılmıştır. Kontrol kartının yazılımı MicroC programında gerçekleştirilmiştir. ST-ARM'nin torkunun ölçülmesinde FUTEK marka 0-10 Nm ölçüm aralığına sahip tork sensörü kullanılmıştır. Ayrıca Visual Studio programındaki C# programında tasarlanan arayüz programı ile deneysel çalışmalarda veriler veri tabanına kaydedilmiş ve ekranda çizdirilmiştir.

ST-ARM'nin kontrolü için transistörlerden oluşan ve dsPIC ile kontrol edilen bir sürme devresi tasarlanmıştır. ARM'nin tork denkleminde tork değerinin akımın karesiyle değiştiği görülmektedir. Bu da akımda meydana gelecek salınımların karesel olarak tork salınımlarına yansıtacağı anlamı taşımaktadır. Bundan dolayı akımdaki salınımların minimize edilmesi tork salınımlarının da minimize edilebileceği anlamını taşımaktadır. Akımdaki salınımları belirleyen unsur, enerjili fazdaki gerilimin

kontrolünü sağlayan tetikleme açılarıdır. Bundan dolayı uygun tetikleme sinyallerinin belirlenmesiyle tork salınımları azaltılabilmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda tetikleme sinyali belirli bir zamana göre oluşturulmuş ya da enerjili fazda sadece on ve off açıları belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında tetikleme sinyalleri 3 parçaya ayrılmış ve rotor açısına göre değerleri belirlenmiştir. Böylece motor hangi hızda dönerse dönsün açı değeri değişmeyeceği için hızdan bağımsız bir tetikleme sinyali oluşturulmuştur. Burada önemli olan nokta tetikleme sinyalindeki açı değerlerinin doğru olarak bulunmasıdır. Bundan dolayı son dönemde birçok alanda ve mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan sezgisel algoritmalarından PSO ve DGA tercih edilmiştir. PSO ve DGA'dan elde edilen optimum tetikleme açıları ile ST-ARM kontrol edilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonucunda ST-ARM'nin tork salınımlarının %56'lık hedefin altına düşürüldüğü görülmüştür.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen değerler çizelgelerle kısaca özetlenecektir:

Çizelge 7.1'de sezgisel algoritmalarından elde edilen açısal değerlerin deneysel sonuçlarıyla algoritmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi PSO'nun ortalama hatası %7.72 iken DGA'nın ortalama hata oranı %7.02 olarak belirlenmiştir. ST-ARM gibi dinamik modellemesi zor olan bir motor için bu hata oranları kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Ayrıca deneysel çalışmalarda ST-ARM'nin tork salınımlarına dolaylı olarak etki eden fiziksel bağlantılar, gerilim düşümleri, sinyal gecikmeleri gibi etkenler hata oranını etkileyebilmektedir.

Çizelge 7.1. Algoritma ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Tetikleme Açıları	PSO_1	PSO_2	DGA_1	DGA_2
θ_1 (Derece)	6.4	7.2	6.4	6.8
θ_2 (Derece)	12	11	10.6	11
θ_3 (Derece)	15	16.4	15	14.4
$T_{Salınım}$ (Algoritma)	32.6	33.4	26	30.4
$T_{Salınım}$ (Deneysel)	30.7	31.9	23.5	27.5
Hata Oranı (%)	9.62	5.83	9.54	4.49
Ortalama Hata (%)	7.72		7.02	

Çizelge 7.1 incelendiğinde DGA'nın PSO'ya göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Tez çalışmasının tork salınımindaki hedefi dikkate alındığında, hem

PSO'nun hem de DGA'nın başarılı sonuçlar ürettiği ve tork salınımlarının hedef değerinin altında kaldığı görülmektedir.

Sezgisel algoritmalarından PSO_1 ve PSO_2 arasındaki fark, algoritmadaki öğrenme faktörünün değerinin farklı olmasındandır. PSO_1'de öğrenme faktörleri 1.5 seçilirken, PSO_2'de bu değer 2 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmadaki PSO_2'nin deneysel çalışmayla karşılaştırıldığında %5.83'lük hata oranıyla PSO_1'e göre daha doğru bir çözüm ürettiği Çizelge 7.1'de görölse de tezin amacı olan tork salınımları bakımından incelendiğinde PSO_1'in PSO_2'den daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bundan dolayı bu tez çalışmasındaki yazılımda öğrenme faktörünün 1.5 seçilmesi 2 olmasına göre daha iyi bir sonuç ürettiği söylenebilir.

DGA_1 algoritmasında çaprazlama oranı ve ölçekleme faktörü 0.8 seçilirken, DGA_2'de çaprazlama oranı 0.75, örnekleme oranı 1.5 olarak seçilmiştir. DGA_2 yazılımının hata oranı DGA_1'e göre iyi olmakla birlikte tork salınımlarındaki başarısı DGA_1'den kötüdür. Bu tez çalışmasında DGA_1 algoritmasının tork salınım değeri %23.5 ile en iyi performansa sahip olduğu Çizelge 7.1'den görülmektedir. Bu da bu çalışmada gerçekleştirilen sezgisel algoritma yazılımları içerisinde tork salınımlarını minimize eden tetikleme açılarını belirleyen algoritmanın DGA_1 olduğunu göstermektedir.

Tez çalışmasında ST-ARM PSO ve DGA'dan üretilen tetikleme açlarına göre yüksüz ve yükte çalıştırılmıştır. ST-ARM'nin PSO ve DGA kullanılarak belirlenen tetikleme açlarına göre elde edilen elektriksel değerleri toplu olarak Çizelge 7.2'de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi ST-ARM farklı yük değerlerinde çalıştırılmıştır.

Çizelge 7.2 incelendiğinde sezgisel algoritmalarından elde edilen tetikleme açılarıyla çalıştırılan ST-ARM'nin yüklü ve yüksüz çalışmasındaki tork salınımlarının tamamının tez çalışmasında belirlenen hedefin altında olduğu görülmektedir. Bu da tez çalışmasında gerçekleştirilen sezgisel algoritmalarından PSO ve DGA'nın bu uygulamada başarılı olduğu anlamına gelmektedir. Sezgisel algoritmalarından DGA'nın PSO'ya göre tork salınımları bakımından daha iyi sonuç ürettiği görülmektedir. DGA'da çaprazlama oranı ve öğrenme faktörünün değiştirilmesi algoritmanın başarısını etkilemiş ve bu çalışmada DGA_1 daha iyi bir sonuç üretmiştir. DGA_1'den belirlenen tetikleme açılarıyla çalışan ST-ARM için yüklü çalışma durumunda %29.46 tork salınım değeri elde edilmiştir. Çizelge 7.2'de çeşitli yüklerde çalışan ST-ARM'nin tetikleme açılarının motorun ortalama tork, akım ve tork salınım değerlerini etkilediği görülmektedir.

Örneğin PSO_2 ile belirlenen tetikleme açısı değerleriyle ST-ARM 55 V, 3.7 A'de 1.54 Nm'lik tork üreterek 42 W'lık bir yükü karşılar.ken, DGA_1'de 57 V, 3.2 A'de 1.87 Nm tork ile 51.87 W'lık bir yükü 1000 d/dk hıza ulaşabilmektedir. Bu da tetikleme açılarının ST-ARM'nin performansı üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Çizelge 7.2. ST-ARM'nin yüksüz ve yüklü çalışma deneysel sonuçları

	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ (Derece)	n (d/dk)	U (V)	I (A)	TORK (Nm)	T _{salınım} (%)	Elektriksel Yük (W)
PSO_1	6.4-12-15	1002	42	1.5	0.622	30.7	0
		999	52	2.9	1.25	32.52	34.04
		1004	62	3.4	1.92	34.24	69.506
		1004	68	3.7	1.98	34.86	90.75
		992	75	4.1	2.05	36.55	120
		Ortalama Tork Salınımı (%)				33.77	
PSO_2	7.2-11-16.4	1005	41	1.8	0.648	31.9	0
		988	55	3.7	1.54	33.8	42.686
		991	62	4.2	1.91	37.1	66.214
		992	73	5	2.02	39.17	100
		Ortalama Tork Salınımı (%)				35.5	
DGA_1	6.4-10.6-15	1030	42	1.6	0.586	23.5	0
		1010	47	2.6	0.95	24.2	17.086
		993	57	3.2	1.87	26.64	51.87
		1004	66	3.7	1.93	26.81	81.103
		1009	75	4.3	2	29.46	110.2
		Ortalama Tork Salınımı (%)				26.12	
DGA_2	6.8-11-14.4	1010	40	1.7	0.59	27.5	0
		998	52	3.2	1.5	28.2	40.847
		995	62	3.8	1.92	30.04	72.36
		998	71	4.4	2	31.49	102.03
		Ortalama Tork Salınımı (%)				29,3	

Çizelge 7.2'deki ortalama salınım değerlerine bakıldığında uygulanan tüm yöntemlerin pratikte kullanılabileceği, ancak en iyi sonuçların %26.12 değeri ile DGA_1'den elde edilmiştir.

ST-ARM'lerin kullanım alanları giderek artmaya başladığı için motorların yaygınlaşma hızı tork salınımlarının azaltılması üzerine yapılan çalışmaların başarısıyla doğru orantılı olacaktır. Bu tez çalışmasında sezgisel algoritmalarından PSO ve DGA kullanılarak ST-ARM'nin kontrol sinyalinin oluşturduğu tetikleme açıları için optimum sonuçlar üretilmiştir. PSO ve DGA offline olarak çalıştırılmış ve sonuçlar üretilmiştir.

Sezgisel algoritmalarından üretilen bu sonuçlar tezin hedefi olan tork salınım değerini daha önceki çalışmalara göre yaklaşık olarak %50 oranında iyileştirmiştir.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneylerde en iyi tork salınım değeri yüksüz çalışmada %23.5, yüklü çalışma da %29.46 olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin daha da azaltılması için aşağıdaki çalışmaların denenebileceği tez sırasındaki deneyim ve araştırmalarımız sonucunda ifade edilebilir.

Sezgisel algoritmalarından PSO ve DGA yerine farklı algoritmalar denenerek daha iyi sonuç verecek bir algoritma ST-ARM'nin kontrolünde kullanılabilir. Bu da tork salınımlarının azaltılmasını sağlayabilecek bir çalışma olabilir.

Tez çalışmasında hem PSO hem de DGA'nın parametreleri değiştirildiğinde sonuçların değiştiği ve bunun tork salınımlarına olumlu yansıdığı görülmüştür. Bundan dolayı en iyi sonuç verecek parametre değerlerinin araştırılması olumlu bir çözüm olabilir. Bu parametrelerin belirlenmesinde yine farklı sezgisel algoritmalar (GA, Karınca Kolonisi v.b.) ya da Yapay Sinir Ağları (YSA) ve bulanık mantık kullanılabilir.

PSO ve DGA offline olarak çalıştırılmış ve tetikleme açıları belirlenmiştir. Burada hızlı işlemci özelliğine sahip olan FPGA, DSP ya da dsPIC'ler kontrolör olarak kullanılıp sezgisel algoritmalar online olarak çalıştırılabilir. Burada PSO ve DGA yazılımındaki parametrelerin sayısı çözüm süreci dikkate alınarak azaltılmalı ve yine çözümün belirlenen sürede üretilebildiği bir yazılım gerçekleştirilmelidir.

Kontrol bakımından en esnek yapıya sahip olan H-köprü sürücü devresinin tercih edildiği bu çalışmada bipolar sürücü devrelerden başka sürücülerle ST-ARM kontrol edilebilir. Bu durumda sürücülerin ST-ARM'nin tork salınımı üzerindeki etkileri incelenmiş olacaktır. Aynı çalışma şartlarında tork salınım değerleri farklı sürücü denemelerinde azaltılabilir.

Tez çalışmasında akademik bir çalışmada üretilen prototip bir ST-ARM kullanılmıştır. Bunun yerine seri üretimi yapılan bir ST-ARM kullanılması modellemesinin daha doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesini sağlayacaktır. Bu da sezgisel algoritmaların performansını daha da artıracaktır. Dolayısıyla elde edilen sonuçlarla kontrol edilen ST-ARM'nin tork salınımlarında da iyileşme gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, M., 2010, High Performance AC Drives: Modelling Analysis and Control, Springer Science & Business Media, p. 129-159.
- Akbulut, İ., 2009, Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Anten Tasarımı *İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü*, 82.
- Akkaya, A. E., 2012, Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Diferansiyel Gelişim Algoritmaları Kullanarak Optimum Protein Katlanması Belirlenmesi, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 136.
- Arslan, M., 2010, Diferansiyel Evrim Algoritmasının Yardımıyla Asenkron Motor Parametrelerinin Belirlenmesi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 82.
- Bal, G., 2011, Özel elektrik makinaları, Seçkin Yayıncılık, p. 197.
- Bal G. ve D., U., 2010a, A Novel Switched Reluctance Motor with U-type Segmental Rotor Pairs: Design, Analysis and Simulation Results, *Int. Conf. Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering (ICCESSE 2010)*, 686-690.
- Bal G. ve D., U., 2010b, An approach to obtain an advisable ratio between stator and rotor tooth widths in switched reluctance motors for higher torque and smoother output power profile, *Gazi University Journal of Science*, 23 (4), 457-463.
- Bay Ö. F., 1996, Anahtarlama Relüktans Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Modellenmesi ve Kontrolü, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü* 100.
- Bieńkowski, K., Bucki, B., Rogalski, A. ve Pochanke, A., 2006, Five phase switched reluctance motor with short flux path for low speed applications and mechatronics, *The State Committee for Scientific Research of Poland* 1-6.
- Bizkevelci E., 2008, A Control Algorithm to Minimize Torque Ripple and Acoustic Noise of Switched Reluctance Motors, *Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences*, 220.
- Cai, J., Deng, Z., Qi, R., Liu, Z. ve Cai, Y., 2011, A novel BVC-RBF neural network based system simulation model for switched reluctance motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 47 (4), 830-838.
- Cai, J. ve Deng, Z., 2012, Sensorless control of switched reluctance motor based on phase inductance vectors, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (7), 3410-3423.
- Cai, M., Li, X., Yang, M. ve Zhang, M., 2009, Improved differential evolution algorithm and its application in induction motor motion, *Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS), 2009 2nd International Conference on*, 108-111.
- Cantaş, Y., 2014, Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Tornalama İşlemlerinde Kesme Koşullarının Belirlenmesi, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 54.
- Caponio, A., Neri, F., Cascella, G. L. ve Salvatore, N., 2008, Application of memetic differential evolution frameworks to PMSM drive design, *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, 2113-2120.
- Cebolla, F. P., Martinez, A., Martin, B., Laloya, E., Pollan, T., Vicuna, J., Llado, J. ve Sanchez, B., 2006, Influence of Coil Arrangement and Current Polarity on the Output Torque of a Switched Reluctance Motor, *IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 1188-1193.

- Chai, J. ve Liaw, C., 2010, Reduction of speed ripple and vibration for switched reluctance motor drive via intelligent current profiling, *IET electric power applications*, 4 (5), 380-396.
- Chang, H.-C. ve Liaw, C.-M., 2011, An integrated driving/charging switched reluctance motor drive using three-phase power module, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (5), 1763-1775.
- Chang, H., Chen, C., Chiang, Y., Sean, W. ve Liaw, C., 2010, Establishment and control of a three-phase switched reluctance motor drive using intelligent power modules, *IET electric power applications*, 4 (9), 772-782.
- Chen, H. ve Jing, W., 2011, Flux linkage determination of the switched reluctance motor from measurable quantities at steady-state operations, *IET electric power applications*, 5 (2), 210-216.
- Chen, H., Xu, Y. ve Iu, H. H.-C., 2012, Analysis of temperature distribution in power converter for switched reluctance motor drive, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48 (2), 991-994.
- Chen, H. ve Lu, S., 2013, Fault diagnosis digital method for power transistors in power converters of switched reluctance motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (2), 749-763.
- Choi, J.-H., Ahn, J. ve Lee, J., 2005, The characteristic analysis of switched reluctance motor considering DC-link voltage ripple on hard and soft chopping modes, *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (10), 4096-4098.
- Choi, Y. K. ve Koh, C. S., 2006, Pole Shape Optimization of Switched Reluctance Motor for Reduction of Torque Ripple, *2006 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, 335-335.
- Civelek B., 2012, Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yönteminde İncelenmesi Ve Bulanık Mantık Hız Denetimi, *Tunceli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü*, 120.
- Congkun, Y., Chaobo, C. ve Yongsheng, F., 2016, Fractional Order Controller Based Fuzzy Control Algorithm for Switched Reluctance Motor, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* (9, 2), 864-883.
- Cui, Y.-L., Yu, X.-C., Fan, H.-L. ve Fan, J.-B., 2005, The simulation study for switched reluctance motor drives based on Matlab 6.5, *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 1076-1081.
- Daldaban, F. ve Ustkoyuncu, N., 2007, New disc type switched reluctance motor for high torque density, *Energy Conversion and Management*, 48 (8), 2424-2431.
- Daldaban, F. ve Ustkoyuncu, N., 2008, Multi-layer switched reluctance motor to reduce torque ripple, *Energy Conversion and Management*, 49 (5), 974-979.
- Dawson, G. E., Eastham, A. R. ve Mizia, J., 1987, Switched-Reluctance Motor Torque Characteristics: Finite-Element Analysis and Test Results, *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-23 (3), 532-537.
- De Doncker, R., Pulle, D. W. ve Veltman, A., 2010, Advanced electrical drives: analysis, modeling, control, Springer Science & Business Media, p. 361-433.
- Dehkordi, B. M., Parsapoor, A., Moallem, M. ve Lucas, C., 2011, Sensorless speed control of switched reluctance motor using brain emotional learning based intelligent controller, *Energy Conversion and Management*, 52 (1), 85-96.
- Delice, Y., 2008, Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Yapay Sinir Ağlarından Sınıflandırma Kuralı Çıkarımı, *Erciyes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*, 136.

- Demirci, H., 2011, Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Çoğalan Sürü Algoritmasının Yüzey Geri Çatımı Problemşnde Uygulanması ve Karşılaştırılması, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 69.
- Ding, W. ve Liang, D., 2008, Fourier series and ANFIS-based modeling and prediction for switched reluctance motor, *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, 3362-3366.
- Ding, W., Liang, D. ve Tang, R., 2011, A fast nonlinear variable structure equivalent magnetic circuit modeling for dual-channel switched reluctance machine, *Energy Conversion and Management*, 52 (1), 308-320.
- Diril O., 1999, Anahtarlmalı Relüktans Motorda Moment Dalgallılığının Enazlama Üzerine Bir Çalışma, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 150.
- Durak, B., Yeksan, A. ve Ergene, L., Anahtarlmalı Relüktans Motorlarda Sürücü Devrelerinin Karşılaştırılması Comparison of Driver Circuits for Switched Reluctance Motors.
- Edrington, C. S., Krishnamurthy, M. ve Fahimi, B., 2005, Bipolar switched reluctance machines: a novel solution for automotive applications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (3), 795-808.
- Eker, İ., 2005, Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Algorithms for Continuous Function Optimization Problems, *Istanbul Kultur University, Institute of Social Sciencs*, 93.
- Eldem, H., 2014, Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algortimaları Temelli Bir Hiyerarşik Yaklaşım Geliştirilmesi *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 100.
- Elmas, C., 1993, Position sensorless operation of a switched reluctance drive based on observer, *Power Electronics and Applications, 1993., Fifth European Conference on*, 82-87.
- Elmas, C., Sagiroglu, S., Colak, I. ve Bal, G., 1994, Modelling of a nonlinear switched reluctance drive based on artificial neural networks, *Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994. Fifth International Conference on*, 7-12.
- Elmas, C. ve Bay, O., 1995, Modeling and operation of a nonlinear switched reluctance motor drive based on fuzzy logic, *Proc. Eur. Power Electronics Applications Conf., Sevilla, Spain*, 3.592-593.597.
- Emire A., 2010, 2 x 6/4 Disk Tipi Anahtarlmalı Relüktans Motor Tasarımı ile Tork Dalgalanmasının Azaltılması, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 100.
- Erdoğan P. ve Yalcin, E., 2015, Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Kısıtsız Optimizasyon Test Probleminin Çözümü *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 4 (1).
- Fan, Y., Gu, L. ve Zhou, X., 2015, Optimization and thermal analysis of a new self-decelerating PM in-wheel motor for electric vehicles, *2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*, 1-1.
- Gameiro, N. S. ve Cardoso, A. J. M., 2012, A new method for power converter fault diagnosis in SRM drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48 (2), 653-662.
- Geldhof, K., Sergeant, P., Van den Bossche, A. ve Melkebeek, J., 2011, Analysis of hysteresis in resonance-based position estimation of switched reluctance drives, *IEEE Transactions on Magnetics*, 47 (5), 1022-1025.
- Guzzella, L. ve Sciarretta, A., 2013, Electric and hybrid-electric propulsion systems, In: *Vehicle Propulsion Systems*, Eds: Springer, p. 67-162.
- Güçüyetmez M., 2005, Anahtarlmalı Relüktans Motorlarda Akustik Gürültünün Azaltılması, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 100.

- Güvenç, U., 2007, Anahtarlamaalı Relüktans Motor Manyetik Akısının Yapay Sinir Ağı Tabanlı Modellenmesi, *IX Akademik Bilişim Konferansı, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya*, 609-612.
- Güvenç U., 2005, Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Denetimi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 109.
- Güvengir, U., 2014, Online Application of Shem to Grid-Connected Inverters with Variable DC Link Voltage by Particle Swarm Optimization, *Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences*, 179.
- Ha, K., Kim, R.-Y. ve Ramu, R., 2011, Position estimation in switched reluctance motor drives using the first switching harmonics through fourier series, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (12), 5352-5360.
- Hannoun, H., Hilaret, M. ve Marchand, C., 2011, High performance current control of a switched reluctance machine based on a gain-scheduling PI controller, *Control Engineering Practice*, 19 (11), 1377-1386.
- Hasanien, H. M. ve Muyeen, S., 2012, Speed control of grid-connected switched reluctance generator driven by variable speed wind turbine using adaptive neural network controller, *Electric Power Systems Research*, 84 (1), 206-213.
- Hasegawa, Y., Nakamura, K. ve Ichinokura, O., 2012, A novel switched reluctance motor with the auxiliary windings and permanent magnets, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48 (11), 3855-3858.
- Henriques, L. O. d. A. P., Rolim, L. G. B., Suemitsu, W. I., Dente, J. ve Branco, P. C., 2011, Development and experimental tests of a simple neurofuzzy learning sensorless approach for switched reluctance motors, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26 (11), 3330-3344.
- Hong, J.-P., Ha, K.-H. ve Lee, J., 2002, Stator pole and yoke design for vibration reduction of switched reluctance motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 38 (2), 929-932.
- Hrstka, O. ve Kučerová, A., 2004, Improvements of real coded genetic algorithms based on differential operators preventing premature convergence, *Advances in Engineering Software*, 35 (3), 237-246.
- Hudson, C. A., Lobo, N. S. ve Krishnan, R., 2008, Sensorless control of single switch-based switched reluctance motor drive using neural network, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (1), 321-329.
- Husain, I. ve Hossain, S. A., 2005, Modeling, simulation, and control of switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52 (6), 1625-1634.
- Jeyabharath, R., Veena, P. ve Rajaram, M., 2005, A new converter topology for switched reluctance motor drive, *2005 Annual IEEE India Conference-Indicon*, 580-584.
- Karaboğa, D., 2014, Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, *Nobel Akademik Yayıncılık*, p. 245.
- Kazan F.A., Ağaayak A. C., Arslan C. ve M., S., 2014, MikroC ile PIC18F4550 Uygulamaları, *Mesleki Akademi*, p. 281.
- Keskintürk, T., 2006, Diferansiyel gelişim algoritması, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5 (9), 85-99.
- Kioskeridis, I. ve Mademlis, C., 2005, Maximum efficiency in single-pulse controlled switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20 (4), 809-817.

- Kiranyaz, S., Ince, T. ve Gabbouj, M., 2014, Multidimensional particle swarm optimization for machine learning and pattern recognition, Springer, p. 1-80.
- Kjaer, P. C., Gribble, J. J. ve Miller, T. J. E., 1997, Dynamic testing of switched reluctance motors for high-bandwidth actuator applications, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2 (2), 123-135.
- Kosaka, T. ve Matsui, N., 2000, Position sensorless control of general purpose inverter-fed fully-pitched winding reluctance motor drives, *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, 1745-1750.
- Krishnan, R., 2001, Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, CRC press, p. 398.
- Kumar, S. S. ve Jayakumar, J., 2016, Torque modeling of Switched Reluctance Motor using LSSVM-DE, *Neurocomputing*.
- Liang, D. ve Ding, W., 2009, Modelling and predicting of a switched reluctance motor drive using radial basis function network-based adaptive fuzzy system, *IET electric power applications*, 3 (3), 218-230.
- Lin, Z., Reay, D. S., Williams, B. W. ve He, X., 2006, Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Drives Using B-Spline Neural Networks, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42 (6), 1445-1453.
- Liptak, M., 2004, Principle of Design of Four-phase Low-power Switched Reluctance Machine Aimed: to the Maximum Torque Production, *Journal of Electrical Engineering-Bratislava*, 55, 138-143.
- Makino, H., Nagata, S., Kosaka, T. ve Matsui, N., 2015, Instantaneous current profiling control for minimizing torque ripple in switched reluctance servo motor, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*, 3941-3948.
- Malagoli, J. A. ve Camacho, J. R., 2015, Automatic Optimized Design of a Stator of Induction Motor Using CAD Generator (Gmsh), *IEEE Latin America Transactions*, 13 (9), 2908-2914.
- Mao, S.-H. ve Tsai, M.-C., 2005, A novel switched reluctance motor with C-core stators, *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (12), 4413-4420.
- Mayer, D., Kinghorn, B. ve Archer, A., 2005, Differential evolution—an easy and efficient evolutionary algorithm for model optimisation, *Agricultural Systems*, 83 (3), 315-328.
- Miller, T. J. E., 1993, Switched reluctance motors and their control, Magna Physics Pub., p.
- Moron, C., Garcia, A., Trempe, E. ve Somolinos, J., 2012, Torque control of switched reluctance motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48 (4), 1661-1664.
- Muthulakshmi, S. ve Dhanasekaran, R., 2016a, A New Front End Capacitive Converter Fed Switched Reluctance Motor for Torque Ripple Minimization, *Circuits and Systems*, 7 (05), 585.
- Muthulakshmi, S. ve Dhanasekaran, R., 2016b, Speed Control of Switched Reluctance Motor Using Soft Computing Technique for Industrial Applications, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 75, 285-288.
- Mutlu Ü., 2006, Anahtarlamaalı Relüktans Motor Sürücü Devre Tasarımı, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 74.
- Nagel, N. J. ve Lorenz, R. D., 2000, Modeling of a saturated switched reluctance motor using an operating point analysis and the unsaturated torque equation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36 (3), 714-722.
- Namazi, M. M., Rashidi, A., Saghaian-Nejad, S. M. ve Ahn, J.-W., 2016, Chattering-free robust adaptive sliding-mode control for switched reluctance motor drive,

- 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 474-478.
- Omac Z. ve Kürüm H., Anahtarlamalı Relüktans Motorun Sayısal Hız Kontrolü.
- Ortakçı, Y., 2011, Parçacık Sürü Optimizasyonu Yöntemlerinin Uygulamalarla Karşılaştırılması, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 78.
- Özsağlam, M. Y. ve Cunkaş, M., 2008, Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması, *Politeknik Dergisi*, 11 (4).
- Patil, D., Wang, S. ve Gu, L., 2016, Multilevel converter topologies for high-power high-speed switched reluctance motor: Performance comparison, *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2889-2896.
- Pavlitov, C., Chen, H., Gorbounov, Y., Tashev, T., Georgiev, T. ve Xing, W., 2010, Switched Reluctance Motor Torque Ripples Reduction by the Aid Of Adaptive Reference Model, *SPEEDAM 2010*, 1276-1279.
- Piña, A. J. ve Xu, L., 2014, A differential evolution algorithm for designing inverter-driven induction motors, *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 279-286.
- Polat K., 2010, Anahtarlamalı Relüktans Motor için Mikrodenetleyici ile Ekonomik Bir Sürücü Gerçekleştirilmesi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 75.
- Prasad, E. S. ve Ram, B. S., 2016, Multi-Objective Optimized Controller for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motor Drive System, *Indian Journal of Science and Technology*, 9 (20).
- Pratapgiri, S., 2016, Comparative Analysis of Hysteresis Current Control and Direct Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motor, *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*.
- Price, K. V., 1996, Differential evolution: a fast and simple numerical optimizer, *Fuzzy Information Processing Society, 1996. NAFIPS., 1996 Biennial Conference of the North American*, 524-527.
- Rafiq, M., Rehman, S.-u., Rehman, F.-u., Butt, Q. R. ve Awan, I., 2012, A second order sliding mode control design of a switched reluctance motor using super twisting algorithm, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 25, 106-117.
- Rajasekhar, A., Pant, M. ve Abraham, A., 2011, A Hybrid Differential Artificial Bee Algorithm based tuning of fractional order controller for PMSM drive, *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2011 Third World Congress on*, 1-6.
- Saha, A., Konar, A., Dan, M. ve Ghosh, S., 2015, Decoding of motor imagery potentials in driving using DE-induced fuzzy-neural classifier, *Recent Trends in Information Systems (ReTIS), 2015 IEEE 2nd International Conference on*, 416-421.
- Sahoo, S. K., Dasgupta, S., Panda, S. K. ve Xu, J.-X., 2012, A Lyapunov function-based robust direct torque controller for a switched reluctance motor drive system, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (2), 555-564.
- Salvatore, N., Cascella, G., Caponio, A., Stasi, S. ve Neri, F., 2008, Optimization of DSKF-based algorithm for sensorless SFO-SM control of IMs using differential evolution, *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, 1-6.
- Sanches, E. S. ve Santisteban, J. A., 2015, Mutual Inductances Effect on the Torque of an Axial Magnetic Flux Switched Reluctance Motor, *IEEE Latin America Transactions*, 13 (7), 2239-2244.

- Sato, Y., 2007, Development of a 2-Degree-of-Freedom Rotational/Linear Switched Reluctance Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 43 (6), 2564-2566.
- Sholahuddin, U., Purwadi, A., Heryana, N. ve Hindersyah, H., 2013, Modelling and Simulation of Switched Reluctance Motor Based on Comsol, *Artificial Intelligence, Modelling and Simulation (AIMS), 2013 1st International Conference on*, 365-369.
- Storn, R. ve Price, K., 1997, Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal of global optimization*, 11 (4), 341-359.
- Syed, A. H. ve Abido, M., 2013, Differential Evolution based intelligent control for speed regulation of a PMDC motor, *Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on*, 1451-1456.
- Takeno, M., Chiba, A., Hoshi, N., Ogasawara, S., Takemoto, M. ve Rahman, M. A., 2012, Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48 (4), 1327-1334.
- Terzi, Ü., 2009, Gezin Satıcı Problemi için Diferansiyel Gelişim Algoritması Tabanlı Bir Metasezgisel Önerisi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 106.
- Terzioğlu H., Bal G. ve Herdem S., 2013, The Modelling of Variation Inductance For Segmental Type Switched Reluctance Motors. 7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13). Istanbul, Turkey: 86-90.
- Tomczewski, K. ve Wrobel, K., 2012, Quasi-three-level converter for switched reluctance motor drives reducing current rising and falling times, *IET Power Electronics*, 5 (7), 1049-1057.
- Torkaman, H. ve Afjei, E., 2013, Comprehensive detection of eccentricity fault in switched reluctance machines using high-frequency pulse injection, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28 (3), 1382-1390.
- Torrey, D. ve Lang, J., 1990, Modelling a nonlinear variable-reluctance motor drive, *IEE Proceedings B-Electric Power Applications*, 314-326.
- Tseng, C.-L., Wang, S.-Y., Chien, S.-C. ve Chang, C.-Y., 2012, Development of a self-tuning TSK-fuzzy speed control strategy for switched reluctance motor, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (4), 2141-2152.
- Ursem, R. K. ve Vadstrup, P., 2003, Parameter identification of induction motors using differential evolution, *Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on*, 790-796.
- Uygun, D., Bal, G. ve Sefa, I., 2014, Linear Model of a Novel 5-Phase Segment Type Switched Reluctance Motor, *Elektronika ir Elektrotehnika*, 20 (1), 3-7.
- Uygun D., 2012, 5-Fazlı U-Tipi Segmental Rotorlu Bipolar Uyartımlı 10/8 Anahtarlama Relüktans Motorun Tasarımı Ve Uygulaması, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 179.
- Üstün, O., 2009, Anahtarlama Relüktans Makinaların Akı Ve Endüktans Ölçüm Metotlarının İncelenmesi, *SDU International Journal of Technological Science*, 1 (2).
- Vandana, R., Nikam, S. ve Fernandes, B., 2012, High torque polyphase segmented switched reluctance motor with novel excitation strategy, *IET electric power applications*, 6 (7), 375-384.
- Vasak, M., Zarko, D., Peric, N., Kolonic, F. ve Hao, C., 2007, Bounding the torque ripple in switched reluctance motors using polyhedral invariant set theory, *Decision and Control, 2007 46th IEEE Conference on*, 6106-6111.

- Vishal, V., Kumar, V., Rana, K. ve Mishra, P., 2014, Comparative study of some optimization techniques applied to DC motor control, *Advance Computing Conference (IACC), 2014 IEEE International*, 1342-1347.
- Viswanathan, P. ve Thathan, M., 2015, Hybrid Controller Based Instantaneous Torque Control of Four Phase Switched Reluctance Motor, *Middle-East Journal of Scientific Research*, 23 (11), 2736-2747.
- Vujičić, V. P., 2012, Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (1), 388-399.
- Wang, H., Lee, D.-H., Park, T.-H. ve Ahn, J.-W., 2011, Hybrid stator-pole switched reluctance motor to improve radial force for bearingless application, *Energy Conversion and Management*, 52 (2), 1371-1376.
- Wang, S.-C. ve Liu, Y.-H., 2011, A modified PI-like fuzzy logic controller for switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (5), 1812-1825.
- Wang, S.-C., 2012, An fully-automated measurement system for identifying magnetization characteristics of switched reluctance motors, *Measurement*, 45 (5), 1226-1238.
- Wang, S.-Y., Tseng, C.-L. ve Chien, S.-C., 2012, Adaptive fuzzy cerebellar model articulation control for switched reluctance motor drive, *IET electric power applications*, 6 (3), 190-202.
- Wichert, T., KUß, H. ve Schuffenhauer, U., 2001, Modern Dimensioning of Switched Reluctance Machines, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1-12.
- Xu, Y. ve Torrey, D., 2002, Study of the mutually coupled switched reluctance machine using the finite element-circuit coupled method, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 149 (2), 81-86.
- Xue, X., Cheng, K. ve Ho, S., 2009, Optimization and evaluation of torque-sharing functions for torque ripple minimization in switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24 (9), 2076-2090.
- Yaşar, Y., 2014, Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Yem Maliyet Optimizasyonu *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* 95.
- Yiğit T., 2005, Anahtarlamalı Relüktans Motorun Genetik Uyarmalı Denetleyici ile Hız Denetiminin Gerçekleştirilmesi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 218.
- Yılmaz, A. R., 2014, FPGA Üzerinde Diferansiyel Gelişim Algoritması İle Yapay Sinir Ağı Eğitimi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 77.
- Zaimeddine, R. ve Undeland, T., 2010, DTC control schemes for induction motor fed by three-level NPC-VSI using Space Vector Modulation, *SPEEDAM 2010*, 966-971.
- Zhang, P., Cassani, P. A. ve Williamson, S. S., 2010a, An accurate inductance profile measurement technique for switched reluctance machines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (9), 2972-2979.
- Zhang, Z., Pian, Z. ve Feng, G., 2010b, Research on new control model for switched reluctance motor, *Computer Application and System Modeling (ICCSM), 2010 International Conference on*, V5-198-V195-202.
- Zhong, R., Wang, Y. ve Xu, Y., 2012, Position sensorless control of switched reluctance motors based on improved neural network, *IET electric power applications*, 6 (2), 111-121.
- Zhou, H., Ding, W. ve Yu, Z., 2005, A nonlinear model for the switched reluctance motor, *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 568-571.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hakan TERZİOĞLU
Uyruğu : TC
Doğum Yeri ve Tarihi : Karabük-1982
Telefon : 0 544 567 72 08
Faks :
e-mail : hterzioglu@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Karabük Anadolu Meslek Lisesi	2000
Üniversite	: Gazi Üniversitesi TEF Elektrik Eğitimi	2005
Yüksek Lisans	: Gazi Üniversitesi FBE Elektrik Eğitimi ABD	2008
Doktora	: Selçuk Üniversitesi FBE Elektrik-Elektronik Mühendisliği	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2005	Ediz Elektrik	Yazılım ve Proje
2005	Selçuk Üniversitesi TBMYO	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Elektrik Makineleri, Kontrol Sistemleri, PLC, HMI, PIC/dsPIC

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

1. Coşkun, İ., **Terzioğlu, H.**, “Hız Performans Eğrisi Kullanılarak Kazanç (PID) Parametrelerinin Belirlenmesi”, *ISSN 1302/6178 Journal of Technical-Online*, 180-205 (2007). (Yüksek Lisans)
2. Sungur, C., **Terzioğlu, H.**, Anadol, M.A., “PV Beslemeli PIC Kontrollü Trafik Sinyalizasyonu”, *IV. Ege Enerji Sempozyumu*, 239-245 (2008)
3. Coşkun, İ., **Terzioğlu, H.**, “Gerçek Zamanda Değişken Parametrelili PID Hız Kontrol”, *IV. International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, Karabük, TURKEY, May 13-15, 2009. (Yüksek Lisans)
4. Coşkun, İ., **Terzioğlu, H.**, “Hız Performans Eğrisi Kullanılarak PID Parametrelerinin Gerçek Zamanda Belirlenmesi”, *ISSN 1302/6178 Journal of Technical-Online*, 169-183 (2011). (Yüksek Lisans)
5. Sungur C, Altun A. A., **Terzioğlu H.**, " A microcontroller-based real time two-axes sun tracking system for maximum PV Energy" *Energy Science and Research*, Volume 28. Issue 2, January 2012
6. **Hakan Terzioğlu**, Fatih Alpaslan Kazan, Murat Selek, “The Use of dsPIC in the Identification of Inertia Moment and Friction Coefficient of PMS and DC Motors”, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 446 - 447, pp. 1197-1201.
7. **Terzioğlu, H.**, Bal G., Herdem S. “Segmental Tip Anahtarlama Relüktans Motorun Endüktans Değişiminin Modellenmesi”, *7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13)*, 30 October-1 November 2013, Istanbul, Turkey (Doktora)
8. **Terzioğlu, H.**, S. Herdem, and G. Bal, The Designing of Data Acquisition Card Through PIC18f4550 and an Interface Study. *Applied Mechanics & Materials*, 2015. (Doktora)