

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ADIM MOTORLARININ MİKROADIM SÜRME TEKNİĞİ İLE KONTROLÜ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
OZAN ÇAKMAK
(111113104)**

**Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Program: Devreler Sistemler**

Danışman: Doç. Dr. Melih Cevdet İNCE

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04 Ekim 2016

EKİM-2016

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ADIM MOTORLARININ MİKROADIM SÜRME TEKNİĞİ İLE KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan ÇAKMAK

111113104

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Ekim 2016

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Ekim 2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Melih Cevdet İNCE (F.Ü)



Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Turgay KAYA (F.Ü)



Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (Bingöl Ü.)



EKİM-2016

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını yürüten ve tezin hazırlanma aşamasında bilgi birikimini, tecrübesini ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Melih Cevdet İNCE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Melike ESEN, Ahmet TOP ve Murat SERHATLIOĞLU'na teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

Ozan ÇAKMAK

Elazığ-2016

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLOLAR LİSTESİ	XI
SEMBOLLER.....	XII
KISALTMALAR.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bilgi.....	1
1.2. Tezin İçeriği.....	5
2. ADIM MOTORLARI	7
2.1. Adım Motorlarının Prensibi	7
2.2. Değişken Relüktanslı Adım Motorları	8
2.3. Sabit Mıknatıslı Adım Motorları	10
2.4. Hibrit Adım Motorları	12
2.5. Adım Motorlarının Karşılaştırılması	14
2.6. Adım Motorlarının Sargı Yapıları	16
2.6.1. Unipolar Sargı	16
2.6.2. Bipolar Sargı Yapısı	16
2.6.3. Bifilar Sargı Yapısı.....	17
2.7. Adım motoruna ait kavramlar.....	18
2.7.1. Adım Açısı.....	18
2.7.2. Adım Açısı Doğruluğu	18
2.7.3. Adım Sayısı	18
2.7.4. Çözünürlük	19
2.7.5. Tutma Momenti	19
2.7.6. Aşma.....	19
2.7.7. Kararlılık.....	20
2.8. Adım motorunun teorisi	21
2.8.1. Elektriksel eşdeğer devre.....	22
2.8.1.1. Düşük Frekanslı RL Faz Modeli	22

2.8.1.2. Yüksek Frekanslı Faz Modeli	23
2.8.2. Mekanik Model	24
3. ADIM MOTORU SÜRME YÖNTEMLERİ, ADIM TEKNİKLERİ VE SÜRME DEVRELERİ	26
3.1. Adım Motoru Sürme Yöntemleri	26
3.1.1. L/R Sürme Devresi	27
3.1.2. Çift Gerilim Seviyeli Sürme Devresi.....	28
3.1.3. Akım Kısıyıcı Sürme Devresi	30
3.2. Sargı Yapılarına Göre Sürme Devreleri	32
3.2.1. Unipolar Sargı Yapısına Sahip Adım Motoru Sürme Devresi	32
3.2.2. Bipolar Sargı Yapısına Sahip Motorların Sürme Devresi	33
3.3. Adım Motoru Sürme Devrelerinde Adım Teknikleri	34
3.3.1. Tam ve Yarım Adım Sürme Yöntemi	34
3.3.2. Mikroadım Sürme Tekniği	37
4. DENEYSEL SİSTEM	40
4.1. Kullanılan Donanımlar	40
4.1.1. Arduino	40
4.1.2. Sürücü Devresi	40
4.1.3. MC33926 H Köprülü Motor Sürücü Entegresi	41
4.1.4. Pololu MC33926 Arduino Uno Kart	42
4.1.5. Nema 17 42STH47-1206 Adım Motor.....	42
4.1.6. Sistem İçin Tasarlanan Devre Kartları	43
4.1.6.1. Akım Ölçme Kartı	43
4.1.6.2. DC Offset Kartı	46
4.2. Kurulan Sistem	49
4.2.1. Sistemin Tanımı.....	49
4.2.2. Akım Ölçme Kartı ve DC Offset Kartından Elde Edilen Sinyaller.....	51
4.2.3. Sistemin Kontrol Algoritması ve Yazılımı.....	51
4.3. DeneySEL Sonuçlar	52
4.3.1. Yükselme Zamanının İncelenmesi	53
4.3.2. Motor Hızının Sabit Olduğu Durumda Faz Akımlarının Farklı Adım Bölme Oranına Göre İncelenmesi	55
4.3.3. Eşit Zaman Aralıklarla Gönderilen Adım Sinyalinin Farklı Adım Bölme Oranlarına Göre Karşılaştırılması.....	57
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	59

5.1. Sonuçlar	59
5.2. neriler.....	59
KAYNAKLAR.....	61
EKLER	65
Ek 1. LEM la 55-p Teknik Bilgileri	65
Ek 2. 42STH47-1206 Adım Motoru.....	66
Ek 3. Sistemin Kontrolüne Ait Arduino Yazılımı	67
ÖZGEÇMİŞ	72

ÖZET

Günümüzde adım motorları özellikle hassas konumlama gerektiren uygulamalarda kolay kontrol edilebilir olması nedeni ile tercih edilmektedir. Birçok sistemde, açık çevrim kontrol edilebilir olması adım motorlarını, diğer motorlardan üstün kılmaktadır.

Bu çalışmada, bir adım motorunun mikro-adım sürme tekniği ile kontrolü hazırlanan deneysel düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Seçilen adım motorunun, adım sayısının arttırılabilmesi için mikro adım sürme tekniği ile kapalı çevrim bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. Mikro adımlama tekniği, adım motorunun fazlarındaki akımın ölçülerek tork kontrolü yapılması mantığına dayanmaktadır. Faz akımlarının ölçülmesi için, her bir faz için bir adet akım ölçme devresi mevcuttur. Ölçülen akım değeri Arduino mikro kontrolör kartı ile değerlendirilip fazlar için PWM sinyali üretilmiştir. Sistemde iki adet dört bölgeli DC motor sürücü MC33926 kullanılmıştır. Ayrıca negatif geri besleme gerilimini Arduino'nun ölçüm aralığına uyarlayabilmek için bir DC Offset kartı tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem ile adım motorunun 1/4, 1/8, 1/16 ve 1/32 gibi farklı adım bölme değerleri için sistemin kontrolü sağlanarak cevabı elde edilmiştir. Her bir adım bölme değeri ve farklı kaynak gerilimi için faz akım değerleri ölçülerek karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Adım motoru, Mikroadımlama, Kontrol.

SUMMARY

Step Motor Control with Microstepping Technique

Nowadays, step motors have especially been preferred in some applications requiring precise positioning since they can easily be controlled. Being open loop controllable in many systems makes step motors superior to other motors.

In this study, control of a step motor via micro-step driving technique is realized by the experimental setup. Closed loop control system is designed by micro-step driving technique in order to increase the number of steps of the selected stepper motor. Microstepping technique is based on torque control logic performed by measuring the current in the phase of the motor. To measure the phase currents, a current measuring circuit is used for each phase. PWM signal is generated for the phases by evaluating the measured current value via Arduino microcontroller board. Two four-quadrant DC motor drivers called as MC33926 are used in the system. In addition, DC Offset card is designed for adapting the negative feedback voltage to the measurement range of Arduino. The system response for different step splitting values of the step motor such as $1/4$, $1/8$, $1/16$, and $1/32$ is obtained by ensuring the control of the designed system. The phase currents are measured and compared for each step splitting value and different supply voltages.

Key Words: Step motor, Microstepping, Control.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. İki manyetik geçirgen diş arasındaki kuvvet bileşenleri	7
Şekil 2.2. Üç fazlı değişken relüktanslı adım motoru stator faz dizilimi	8
Şekil 2.3. Değişken relüktanslı adım motoru sargı bağlantı şekli	9
Şekil 2.4. Üç fazlı değişken relüktanslı adım motorunun tam adım dönüşü.....	9
Şekil 2.5. Sabit mıknatıslı adım motorunun tam adım sürme tekniğinde rotor konumları .	11
Şekil 2.6. Hibrit adım motoru stator ve rotoru	12
Şekil 2.7. Hibrit adım motorunun a) Boyuna kesiti b) N kutbu tarafından enine kesiti c) S kutbu tarafından enine kesiti	13
Şekil 2.8. Ticari bir adım motor rotor ve statoru.....	14
Şekil 2.9. Sabit mıknatıslı adım motoru	15
Şekil 2.10. a) Altı sargı uçlu adım motoru sargı yapısı b) Beş sargı uçlu adım motoru sargı yapısı.....	16
Şekil 2.11. Bipolar adım motorunun sargı yapısı.....	17
Şekil 2.12. Bifilar Sargı Yapısı	17
Şekil 2.13. Bifilar sargı yapısı bağlantı şekilleri a) Paralel bağlantı b) Seri bağlantı c) Unipolar bağlantı.....	17
Şekil 2.14. Adım motorunun adım cevabı.....	19
Şekil 2.15. Adım motorunun osilasyonlu tek adım cevabı	20
Şekil 2.16. İki farklı uyartım sıklığı için adım motorunun ardışık adım cevabı	21
Şekil 2.17. Adım motoru faz eşdeğer modeli.....	22
Şekil 2.18. Motor fazının demir kayıplarını da içeren yüksek frekans eşdeğer devresi.....	24
Şekil 2.19. Motor eksenine uygulanan kuvvetler	24
Şekil 3.1. Faz akımı değişiminde elektriksel zaman sabitinin a) Yeterli olması b) Yetersiz olması	27
Şekil 3.2. L/R Sürme devresi.....	27
Şekil 3.3. Çift gerilim seviyeli sürücü devresi	28
Şekil 3.4. İki farklı seviyedeki gerilim kaynağı için akım yükselme eğrileri	29
Şekil 3.5. Çift seviyeli sürücü ile akımın nominal değere ulaşma grafiği.....	29
Şekil 3.6. PWM tekniği ile akım kısıyıcı sürme devresi.....	30

Şekil 3.7. PWM'in OPAMP ile üretildiği kıyıcı devre	31
Şekil 3.8. Akım kıyıcı sürme devresi grafiği	31
Şekil 3.9. Unipolar motor sargı yapısı.....	32
Şekil 3.10. Unipolar sargı yapısına sahip adım motorü sürme devresi	32
Şekil 3.11. Bipolar motor sargı yapısı.....	33
Şekil 3.12. Bipolar sargı yapısı faz sarımları	33
Şekil 3.13 Bipolar sargı yapısına sahip adım motoru sürme devresi	34
Şekil 3.14. Bipolar adım motoru tam adım sürme tekniği akım-adım grafiği	35
Şekil 3.15. Bipolar adım motoru yarım adım sürme tekniği akım-adım grafiği	36
Şekil 3.16. Bipolar motor mikroadım tekniği akım-adım grafiği	38
Şekil 3.17. Ortalama faz akım diyagramı.....	38
Şekil 3.18. 1/4 bölme oranına sahip sürme yöntemine akım-adım grafiği	39
Şekil 4.1. Arduino pinleri	40
Şekil 4.2. MC33926 entegresi blok diyagramı.....	41
Şekil 4.3. MC33926'nın basit bir uygulama bağlantısı	41
Şekil 4.4. Pololu MC33926 kartının mikrokontrolör ile kullanımı ve güç bağlantıları	42
Şekil 4.5. 42STH47-1206a adım motor.....	43
Şekil 4.6. Akım ölçme kartı devre şeması.....	44
Şekil 4.7. Akım ölçme kartının kısımları	45
Şekil 4.8. a) Akım ölçme kartı PCB ön yüz b) Akım ölçme kartı PCB arka yüz	46
Şekil 4.9. DC offset kartı devre şeması	47
Şekil 4.10. DC offset ekleme kartı kısımları	48
Şekil 4.11. a) DC offset kartı PCB ön yüz b) DC offset kartı PCB arka yüz.....	49
Şekil 4.12. Sistemin blok diyagramı	50
Şekil 4.13. A ve B faz akımlarının ölçme kartı ve DC offset kartı çıkışlarındaki gerilimlerinin grafiği	51
Şekil 4.14. Sistemin kontrol yazılımına ait akış diyagramı.....	52
Şekil 4.15. Kaynak gerilimi 6.5 V ve $K_p=0.1$ durumunda tam adım sürme yöntemi faz akımı-zaman grafiği	53
Şekil 4.16. Kaynak gerilimi 6.5 V ve $K_p=0.2$ durumunda tam adım sürme yöntemi faz akımı-zaman grafiği	53
Şekil 4.17. Kaynak gerilimi 6.5 V ve $K_p=0.3$ durumunda tam adım sürme yöntemi faz akımı-zaman grafiği	54

Şekil 4.18. Kaynak gerilimi 12 V ve $K_p=0.1$ durumunda tam adım sürme yöntemi faz akımı-zaman grafiği	54
Şekil 4.19. Tam adım sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği	55
Şekil 4.20. Yarım adım sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği	55
Şekil 4.21. 1/4 adım bölme oranında sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği	56
Şekil 4.22. 1/8 adım bölme oranında sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği	56
Şekil 4.23. 1/16 adım bölme oranında sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği	56
Şekil 4.24. 1/32 adım bölme oranında sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği	57
Şekil 4.25. Tam adım ve 50 ms'lik aralıklarla adım sinyali durumunda faz akımı-zaman grafiği	58
Şekil 4.26. 1/32 adım bölme oranında ve 50 ms'lik aralıklarla adım sinyali durumunda faz akımı-zaman grafiği.....	58

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Üç fazlı DRAM'ın tam ve yarım adım için faz enerjilendirme sırası	10
Tablo 2.2. İki fazlı SAM'ın yarım adım ardışık faz akım darbeleri.....	11
Tablo 3.1. Adım motorunun tam adım sürme yönteminde faz enerjilendirme sırası	35
Tablo 3.2. Adım motorunun yarım adım sürme yönteminde faz enerjilendirme sırası	36

SEMBOLLER

B	:Sürtünme katsayısı
i_a, i_b	:Faz akımları
J	:Atalet momenti
K_m	:Motor sabiti
K_T	: Moment sabiti
θ_s	: Stator diş açısı
θ_r	: Rotor diş açısı
n_s	: Stator diş sayısı
n_r	: Rotor diş sayısı
$\Delta\theta$	: Adım açısı
r	: En büyük uygun pozitif sayı
R_w	:Faz direnci
L_w	:Faz indüktansı
u_a, u_b	:Faz uç gerilimleri
p	:Motorun kutup çifti sayısı
w_m	:Rotorun açısal hızı
θ_m	:Mekanik açısı
L_{eq}	:Çekirdek kayıplarına neden olan endüktans
R_{eq}	:Çekirdek kayıplarına neden olan direnç
τ_{em}	:Motorun elektromanyetik momenti
J	:Atalet momenti
T_{dm}	:Tutma torku genliği
φ	:Faz kayma açısı
I_{gb}	:Geri besleme akımı
V_{gb}	:Geri besleme gerilimi
R_{gb}	:Geri besleme direnci
θ_e	: Elektriksel açı
T_{ma}	: A fazında üretilen moment
T_{mb}	: B fazında üretilen moment

KISALTMALAR

DRAM	:Değişken relüktanslı adım motoru
HAM	:Hibrit adım motor
SMAM	:Sabit mıknatıslı adım motoru

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgi

Adım motorları diğer elektrik motorları içerisinde hassas konumlama, açık çevrim kontrol ve kolay kullanım açısından ayrı bir öneme sahiptir. Pozisyon kontrolü için servo sistemlere gereksinim duyulur. Servo sistemler genellikle geri besleme elemanına ihtiyaç duydukları için ek donanımlara ve yüksek maliyetlere sahip olabilir. Bu bakımdan adım motorlarının açık çevrim özelliği, otomasyon ve kontrol sistemleri için önemli bir avantaj sağlar.

Adım motorları basit elektronik ürünlerden çok karmaşık sistemlere ve çok hassas konumlama gerektiren alanlara kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Bunlara örnek; yazıcılar, disket sürücüler, CNC tezgahlar, endüstriyel robotlar, biyomedikal cihazlar, mikro fabrikasyon, mikro akışkanlardır [1,2].

Adım motorlarının genel olarak üç türü vardır. Bunlar; Değişken relüktanslı adım motorları, sabit mıknatıslı adım motorları ve hibrit adım motorlarıdır. Tezin içeriğinde bu adım motorlarının özelliklerinden bahsedilecektir. Tez çalışmasında hibrit adım motorunun kullanılma nedeni diğer adım motorlarına göre yüksek çözünürlüklü olması, hızlı adım cevabı ve düzgün bir moment-hız karakteristiğine sahip olmasıdır. Piyasada kullanılan motorların çoğunluğu hibrit adım motorudur.

Teknik detayları tezin ileriki bölümlerinde anlatılacak olan hibrit adım motorlarının yapısı için kısaca şu şekilde bahsedilebilir. Statoru iki faz olacak şekilde sarılmış sargılardan oluşur. Rotor ise sabit mıknatıslardan oluşur.

Bu motor türü sürekli hareket eden motorların aksine sabit açılı bir şekilde adım adım dönüşünü gerçekleştirir. Elektriksel sinyalleri, açısal veya doğrusal yer değiştirmeye dönüştüren elektromanyetik mekanik bir motordur [3,4]. Dijital elektronik sistem arayüzü ile yüksek doğruluk ve kolay kullanım avantajı sunar [5]. Açısal yer değiştirmesi, giriş darbelerinin toplamıyla, dönüş hızı ise darbelerin frekansı ile doğru orantılıdır [6].

Adım motorlarının her bir sinyal ile sabit açıda bir adım dönerek durması konum kontrolü açısından avantajlıdır, fakat sürekli dönüş durumunda bu adımlardan kaynaklı rotor milinde, dolayısıyla yükün dönüşü esnasında titreşimler olacaktır. Bu durum hız kontrolü veya konum kontrolünde istenilen konuma gelene kadar geçen sürede bir dezavantaj

sağlamaktadır. Adım motorlarının sürülme yöntemi ile bu sorunlara çözüm üretilmeye çalışılmıştır.

Adım motorlarının sürülmesi lojik sistemlerle yapıldığı durumda iki şekilde sürme yönteminden bahsedilebilir. Bunlar tam adım ve yarım adım sürme yöntemi. Bu sürme yöntemlerinde stator fazları ya enerjili ya da enerjisizdir durumdadır. Tam adım sürme yöntemi ile motor bir turunu etiketinde verilen adım sayısı kadar, yarım adım sürme yönteminde ise etiket değerinin iki katı kadar adım atarak tamamlar. Bu yöntemlerde adım sayısı az olduğu için adımlamadan kaynaklı titreşimler fazlasıyla hissedilir. Bunu engellemek için mikro adımlama tekniği geliştirilmiştir. Bu yöntem ile motor lojik olarak sürülmesi yerine akım kontrolü yapılarak sürülür. Akım kontrolünde, fazların akımı kontrol edilerek her adım arasında iki taraflı moment üretilir ve birden fazla adım oluşması sağlanır. Bu şekilde motor sabit bir hız ile dönerken daha fazla ve birbirine daha yakın adımlarla döneceği için titreşimler en aza indirgenmiş olur. Hatta bu adımla çok yüksek çözünürlükte yapılırsa, adım motoru sürekli dönen bir DC motor gibi davranır.

Bu tezde adım motorunun mikroadım tekniği ile sürülmesine dayalı kurulan sistem için devreler tasarlanmıştır. Daha sonra yazılan kontrol yazılımı ile sistemin performansı incelenmiştir.

Geçmiş yıllarda, farklı adım motorlarının çalışma yapısına, adım motorlarının farklı sürme devrelerine ve adımlama tekniklerine ilişkin birçok çalışma yapılmıştır.

Apaydın tarafından yapılan bir yüksek lisans tezi çalışmasında [7], adım motorlarının çalışma prensipleri, kontrol yöntemleri ve motora ilişkin statik ve dinamik karakteristikler ele alınarak, bir havalandırma sisteminin bilgisayar ile kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemde bir havalandırma sistemi için maket model oluşturularak, sistemde yer alan havalandırma kapağı konumu ortam sıcaklığına bağlı olarak kontrol edilmiştir. Sıcaklık sensörü vasıtası ile ortam sıcaklığı verisi kontrolör olarak kullanılan mikro denetleyicide değerlendirilmiştir ve bu sıcaklık değerine bağlı olarak adım motorunun kontrolü yapılarak havalandırma kapağının kontrolü sağlanmıştır. Bilgisayarın RS 232 seri haberleşme portu üzerinden, Visual Basic programında hazırlanan yazılım vasıtası ile adım motoru kontrol edilmiştir ve kapak pozisyonu 0-90° arasında değişen açılarla hareket ettirilerek ortam sıcaklığının sabit tutulması hedeflenmiştir.

Bir başka yüksek lisans tezi çalışmasında [8], bir bobin sarma makinası tasarımı için kalıcı mıknatıslı bir DA motor ile bir adım motorunun mikro kontrolör kullanılarak senkronize çalışması ele alınmıştır. Tasarlanan bobin sarma makinasında ana tahrik

makinası olan kalıcı mıknatıslı DA motorun hız kontrolü için PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) tekniği kullanılmıştır. Telin sarımı için gerekli olan çapraz sarım işlemi de bir adım motoru vasıtası ile gerçekleşmektedir. Doğru sarım işleminin gerçekleştirilebilmesi için PIC 16F877 mikrokontrolörü ile kontrol edilen sisteme ilave edilen tuş takımı ile toplam sarım sayısı, iletken çapı ve makara boyu gibi bazı verilerin kullanıcı tarafından girilmesi gerekmektedir. Hazırlanan yazılımla, bu verilerle ilişkili olarak step motorun, DA motorun bir turunda kaç adım atacağı hesaplanmaktadır.

Adım motorunun kontrolünün ele alındığı bir yüksek lisans tezi çalışmasında [9], kontrol edilen adım motorunun beslemesi sistemde kullanılan 10 W gücündeki fotovoltaiik panel kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaiik panelden elde edilen gerilim değerinin enerji depolama elemanı olarak sistemde kullanılan aküye aktarımı için DA-DA dönüştürücü devresi tasarlanmıştır ve panel çıkış gerilimi 6 V değerine düşürülmüştür. Kullanılan adım motorunun sürme devresi PIC16F84A ile gerçekleştirilmiştir. Motorun dönüş yönünün değiştirilmesi, adımlama modunun değiştirilmesi ve motorun durdurulması gibi işlemler için sürme devresine butonlar yerleştirilmiştir. MPLAB programında hazırlanan yazılım ile adım motorunun tam adım ve yarım adım yöntemleri ile sağa ve sola dönüşünün kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Adım motorunun Labview programı ile kontrolünü konu alan bir yüksek lisans tezi çalışmasında [10]; adım motorunun hızının, dönüş yönünün, adımlama modunun ve momentinin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Uygun algoritma hazırlanarak, sistem hem C dilinde yazılan yazılımla PIC18F2520 mikrokontrolörü kullanılarak hem de sürücü kartı üzerinden bilgisayardan görsel olarak Labview programı ile denetlenmiştir.

Hibrit bir step motorun mikro adımlama tekniği ile sürülmesini konu alan başka bir çalışmada ise [11]; hibrit step motor için PID kontrolörde bulanık kazanç planlaması konusu ele alınarak sistemin tasarımı ve gerçek zamanlı deneysel uygulaması yapılmıştır. Böylelikle, istenen konumlandırma probleminin takibi için geliştirilen mikro adımlama yöntemi tanımlanmıştır. Hibrit step motorun kontrolü için kullanılan PID kontrolörü tasarlamak ve gerçek zamanlı uygulamasını gerçekleştirmek için kullanılan yazılım; Gerçek Zamanlı Windows Target, Matlab-Bulanık Mantık Toolbox'ı ve Simulink'tir. Hazırlanan iki seviyeli kontrol sistemi ile PID kazanç parametreleri otomatik olarak belirlenmektedir. Hesaplanan kazanç değerleri PID kontrolöre uygulanarak step motorun miline bağlı encoder vasıtasıyla alınan konum bilgisini istenen konum bilgisi ile karşılaştırmaktadır. Tasarlanan kontrolörle farklı mikro adım değerleri ve hız değerleri için motorun kontrolü

gerçekleştirilmiştir ve tüm durumlarda sürekli durum hatasının sıfıra eşit olduğu ve sistemin çalışmasında bir kararsızlık olmadığı gözlemlenmiştir.

Mikro kontrolör kullanılarak adım motorunun kontrolünün temellerinin ele alındığı bir çalışmada [1], öncelikle yöntemin temeline ilişkin bilgi verilip daha sonra ise PIC16F877 işlemcisi ile sürücü devresi gerçekleştirilmiştir. Motor sürücüsü olarak L298 (H-Köprü) kullanılmıştır ve adım motorunun belirlenen adım oranında dönmesi için gereken elektriksel açı değerleri belirlenmiştir.

Bir beş fazlı adım motorunun sürme teknolojisinin ele alındığı bir çalışmada [12]; adım motorunun kontrolü dijital sinyal kontrolörü (dsPIC30F4011) kullanılarak yapılmıştır. Kurulum; motora bağlı analog konum sensörü, sürücü birimi, akım ölçme birimi ve kontrolörden oluşmaktadır. Adım motoru 1 dev/dak ve 60 dev/dak hız aralığında saat yönünde ve saat yönünün tersinde 4, 8, 32, 64, 100, 250, 500 ve 1000 adımda çalıştırılabilir. Yapılan çalışmada sabit akım kontrolü uygulanmıştır. Bu sebeple akımı istenen genlik değerine ulaştırmak için sürücünün görev periyodu için her dört adım doğrulanmaktadır. Farklı çalışma hızlarında ve farklı adım değerlerinde motorun sargı akımları, konum sensörü çıkışı ve sabit akım değeri kaydedilerek kıyaslanmıştır.

Mekatronik sistemleri öğretme ve eğitimi hedefleyen bir eğitim setinin gerçekleştirilmesini ele alan bir çalışmada [13], bir step motorun tam adım, yarım adım ve mikro adım sürme tekniklerini ele alan uygulamaları içeren bir öğrenme ve eğitim programı hazırlanmıştır ve bir arayüz tasarlanmıştır. Sistem emülasyonu mikrokontrolör tabanlı bir arayüz ile yerine getirilmiştir ve kullanılan mikrokontrolör olarak maliyetinin uygun olması ve iki adet PWM çıkışına sahip olması sebebi ile PIC16F877 işlemcisi tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde, simülasyon ve step motor sürücü arayüz ünitesi arasındaki iletişim RS232 arayüz portu ile sağlanmaktadır. Çalışmada verilen akış diyagramına uygun olarak hazırlanan yazılım ile motorun ileri ve geri dönüş yönleri, adımlama durumu (tam adım, yarım adım, 1/4, 1/8, 1/16 mikroadım) kullanıcı tarafından seçilerek motorun kontrolü sağlanmaktadır. Yapılan işlemler tasarlanan kullanıcı dostu görsellere sahip bir arayüz kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Adım motorları düşük maliyeti ve kolay kontrol edilebilir olması sebebi ile tıp alanında da kullanılmaktadır. Boyun ve baş bölgesindeki ekzofitik lezyonların çıkarılmasını konu alan bir çalışmada [14]; yapay zeka kullanılarak adım motorunun mikro adımlama yöntemi ile kontrolü sağlanmıştır. Önerilen kontrolörle adım motorunun daha hassas

alışması sağlanarak tümöre, etrafındaki dokulara zarar vermeden ulaşılma imkanı sağlanmıştır.

Adım motorunun modellenmesi ve benzetiminin ele alındığı bir çalışmada [15]; bipolar hibrit adım motorunun Matlab/Simulink programında Simpower elemanları kullanılarak benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Motor fazları H- Köprü Mosfet PWM dönüştürücüleri kullanılarak beslenmiştir. Farklı yük koşullarında motor faz akımları, gerilimleri, indüklenen moment, motor hızı ve konumuna ilişkin geçici durum karakteristikleri elde edilmiştir.

Adım motorlarının mikro kontrolör ile kontrolünü ele alan bir çalışmada [2]; mikro kontrolör olarak STC12C5624AD kullanılmıştır. Tasarlanan donanım; tuş takımı kontrol modülünü, LED Display modülünü, D/A dönüştürücü modülünü, sürücü modülünün yanı sıra koruma ve g  modüllerini ihtiva etmektedir. Çalışmada ayrıca sisteme ait devre şemalarının yanı sıra, C dilinde yazılan ana program, kesme programı ve bölme programına ait akış diyagramı da yer almaktadır.

Adım motorlarının FPGA ile kontrolü konusu, kontrolörün hızlı cevabı, esnekliği, kolay programlanabilir olması gibi sebeplerle literatürde oldukça sık yer almaktadır [6, 16-19]. Böyle bir çalışmada [17], kalıcı mıknatıslı bir adım motorunun hız regülasyonu adaptif yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen tasarıma ilişkin benzetim ve deneysel çalışmalar yapılarak, sistemin hızı tam yük moment koşulları ve y k moment dengesizlikleri altında incelenmiştir. Yapay sinir ağları kullanılarak yapılan kontrol işleminde, geleneksel PI kontrolöre göre hız cevabının daha yumuşak olduğu ve hız cevabındaki aşma miktarının daha küçük değerlere azaltıldığı gözlemlenmiştir.

Bu yüksek lisans tezi çalışmasında ise adım motorunun mikroadım tekniği ile sürülmesine dayalı bir devre tasarlanmıştır. Daha sonra bu devrenin performansı incelenmiştir.

1.2. Tezin İçeriği

Tezin ilk bölümünde, adım motorları hakkında genel bir bilgi verilerek, tezin amacı hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca farklı adım motorları, sürücü devreleri, adım motorlarının kontrol yöntemleri hakkında daha önce yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

İkinci bölümde, adım motorlarının tanımı yapılarak adım motoru türleri verilmiştir ve bu adım motorları arasında kıyaslama yapılmıştır. Adım motorlarının sargı yapılarına

değinilmiş ve adım motoruna ait kavramlardan bahsedilmiştir. Son olarak adım motorunun eşdeğer devresi ve mekanik modeli verilmiştir.

Üçüncü bölümde, adım motorlarında sürme yöntemleri ele alınarak; tam adım, yarım adım ve mikro adım sürme teknikleri hakkında bilgi verilmiştir.

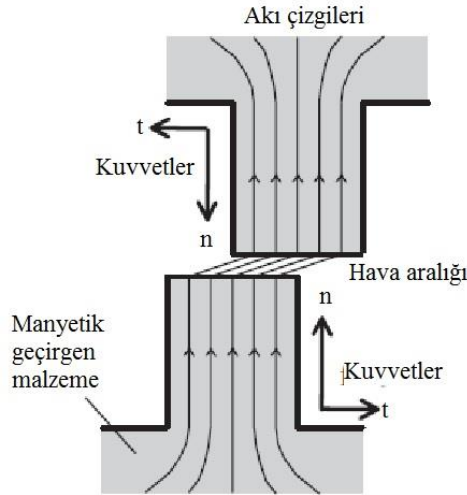
Altıncı bölümde ise, deneysel sistemde kullanılan donanımlar olan Arduino ve sürücü devresi ele alınmıştır. Deneysel sistem için tasarlanan devre kartları olan akım ölçme ve DC offset kartlarına değinilmiştir. Adım motorunun farklı besleme gerilimleri ve farklı bölme oranlarına göre, sargı akımlarının zamana göre değişim karakteristikleri verilerek, alınan sonuçlar kıyaslanmıştır.

Tezin son bölümünde ise, gerçekleştirilen çalışma ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. ADIM MOTORLARI

2.1. Adım Motorlarının Prensibi

Adım motorunun temel özelliği fazlarına gelen anahtarlamalı uyartım ile rotor pozisyonunu tam olarak belli bir açıda değiştirmesidir [20]. Bu şekilde uygulanan sıralı darbeler yardımıyla, adım kaybı olmadığını varsayarsak, rotorun adım adım dönüşü ile her bir darbe eşzamanlı bir biçimde sağlanabilir. Dolayısıyla açık çevrim bir şekilde motor hareketi giriş sinyaline tam olarak cevap verir. Bu açıdan bakınca adım motorlarından dijital aktüatör olarak bahsedilebilir. Yine de motorun sürekli olarak dönüşünden yola çıkarak aynı zamanda elektromanyetik enerjiyi mekanik enerjiye çeviren bir elektromanyetik aktüatör olarak da ifade edilebilir [21]. Bu açıklamalar doğrultusunda adım motorları için geri beslemeye bilgisine ihtiyaç duymadan konum kontrolü yapılabilen bir motor türü olduğu söylenebilir.



Şekil 2.1. İki manyetik geçirgen diş arasındaki kuvvet bileşenleri

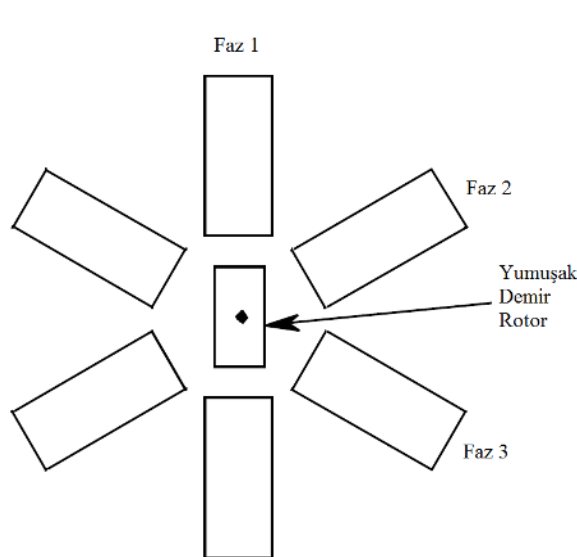
Adım motorlarının hem rotorunda hem de statorunda manyetik geçirgen malzemeden yapılmış dişlere sahip çıkık kutuplar bulunur. Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilen kısım, adım motorunun küçük bir bölümünün enine kesitidir. Manyetik akı, motorun rotor ve statorunun dişlileri arasındaki küçük hava boşluğundan geçer. Adım motor tiplerine göre motordan geçen akının kaynağı sabit mıknatıs, akım taşıyan sargı veya her ikisi birlikte olabilir. Bunların tümünde de etki aynıdır, dişler, aralarındaki hava aralığını en aza

indirmeye ve dişleri birbirine çekmeye çalışan eşit ve zıt yönlü kuvvetlere maruz kalırlar. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi ana bileşen normal kuvvet(n), hava boşluğuna doğru yönelir, fakat elektrik motorlarının daha yararlı kuvvet bileşeni diğerinin aksine dişlerden yana doğru hareket etmeye çalışan daha küçük teğet kuvvettir. Akı dişler arasında geçmeye başlar başlamaz, kuvvetlerin çekimi sıfır olana kadar dişler diğer diş grubuna doğru yönelir [20].

Adım motorları değişken relüktanslı(DRAM), sabit mıknatıslı(SMAM) ve hibrit(HAM) olmak üzere üç temel tip olarak tanımlanır. Hibrit motorlar için manyetik akının ana kaynağı sabit mıknatıs ve bir veya daha fazla sargıyı takip eden DC akımdır. Değişken relüktanslı adım motorlarda ise manyetik akı sadece sargılardan geçen akım tarafından üretilir.

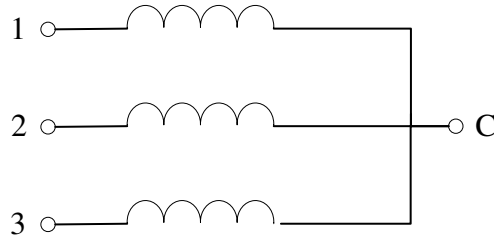
2.2. Değişken Relüktanslı Adım Motorları

Değişken relüktanslı adım motorları, adım motorlarının en temel ve en eski türüdür. Bu tür adım motorlarında rotor kutuplanmamış yumuşak demir malzemeden oluşur. Diğer tür adım motorlarının aksine iki fazlı değildir. Eğer bu motorların statoru iki fazlı kullanılırsa rotorun kutupsuz olması nedeniyle dönüş yönünde bir anlam karmaşası meydana gelecektir. Bu nedenle bu motorlar en az üç fazlı olarak imal edilirler. Şekil 2.2’de üç fazlı değişken relüktanslı bir adım motorunun rotor konumu ve stator faz dizilimi gösterilmiştir [21].

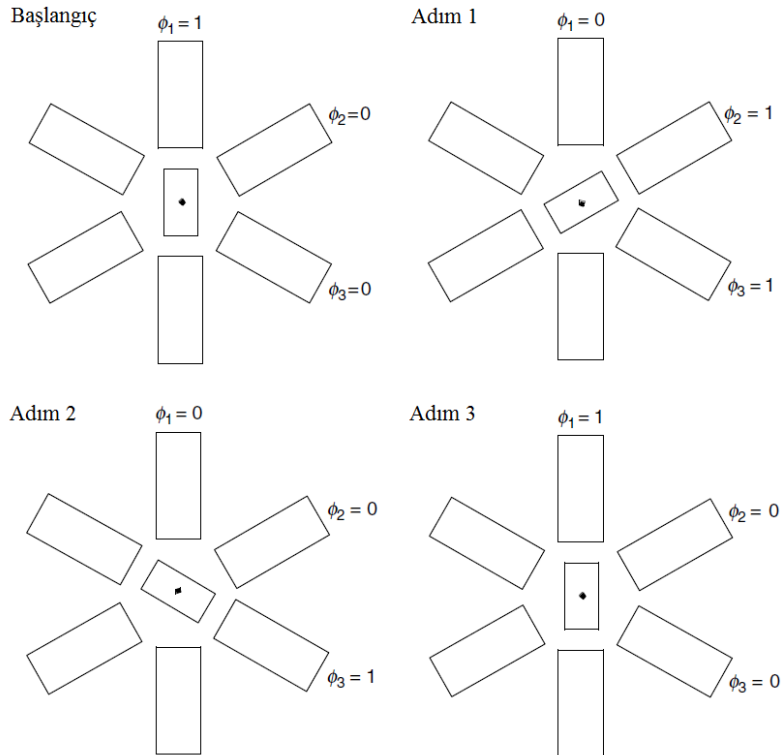


Şekil 2.2. Üç fazlı değişken relüktanslı adım motoru stator faz dizilimi

Üç fazlı değişken relüktanslı adım motorunun saat yönündeki dönüşü için faz enerjilendirme sırası şekil 2.4'te gösterilmiştir. Burada adım motorun rotor dönüşündeki her bir adım açışı 60° 'dir. Değişken relüktanslı adım motorlarında tam adım sürme yönteminde faz akımları ters yönde uygulanmaz. Yani her sargı enerjisizdir ya da tek yönde enerjilidir. Bu durumda, ileriki bölümlerde anlatılacak olan SMAM ve HAM'ların unipolar bağlantı şekli ile aynı sürme yöntemine sahiptir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi sargılar ortak olarak bağlanırlar. Yarım adım durumunda ise bazı adımlarda ardışık iki sargının aynı anda enerjilenmesi gerekmektedir. Böylelikle her bir adımda rotorun konum değiştirmesi 30° 'ye karşılık gelir.



Şekil 2.3. Değişken relüktanslı adım motoru sargı bağlantı şekli



Şekil 2.4. Üç fazlı değişken relüktanslı adım motorunun tam adım dönüşü için fazların enerjilenme durumu ve rotor konumu

Tablo 2.1’de üç fazlı DRAM’ın tam ve yarım adım dönmesi için gerekli faz enerjilenme sırası verilmiştir. ‘+’ simgesi olan fazlar enerjili boş olanlar ise enerjisiz fazlar olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.1. Üç fazlı DRAM’ın tam ve yarım adım için faz enerjilendirme sırası

	Tam Adım			Yarım Adım		
	Faz A	Faz B	Faz C	Faz A	Faz B	Faz C
1	+			+		
2	+			+	+	
3		+			+	
4		+			+	+
5			+			+
6			+	+		+

2.3. Sabit Mıknatıslı Adım Motorları

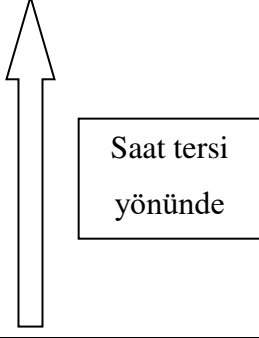
Sabit mıknatıslı adım motorlarında stator 90°lik açı ile yerleştirilmiş iki sargıya sahiptir. Bu dizilim statorda her biri bitişiğindeki göre 90° aralıklı dört tane çıkık kutuptur. Rotor ise iki kutuplu bir sabit mıknatıstan imal edilmiştir [21]. Bu adım motorunda statorda sargılar tarafından rotorda ise sabit mıknatıs tarafından bir manyetik alan üretilir.

Stator fazlarındaki akım için üç farklı durum mevcuttur. Bunlar, akımın tanımlanan yönde olması (1), akımın tanımlanan yönün aksine olması (1’) ve akımın olmaması (0 olması) durumudur [21].

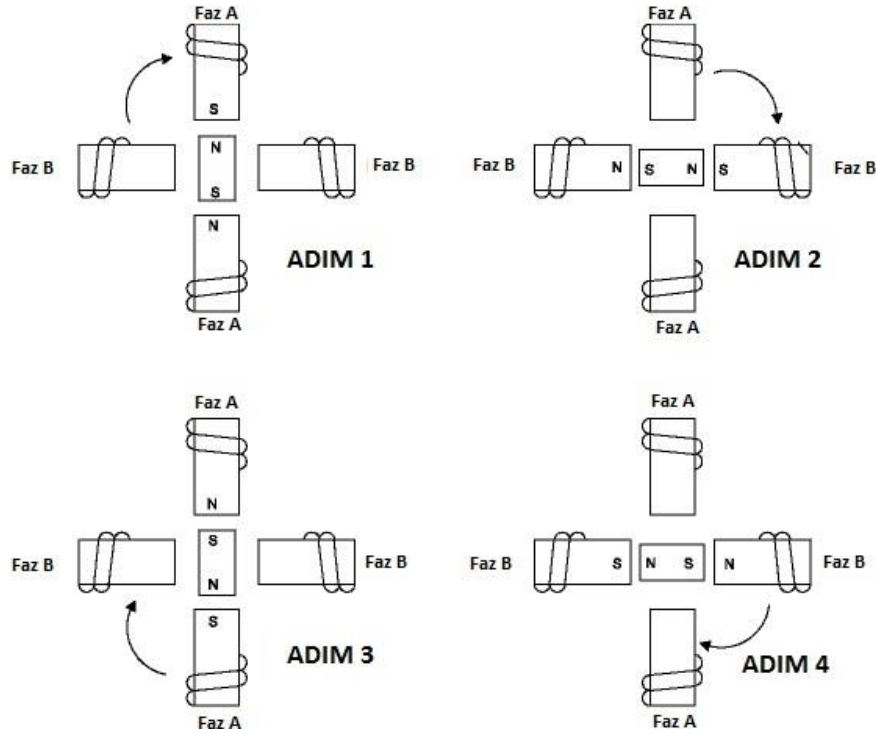
Her adım sonunda statorun manyetik kutuplaşma modeline bağlı olarak, rotor pozisyonu minimum relüktans durumuna gelir. Bu her adım için stabil denge konumudur ve kilit konum olarak bilinir. Bir sonraki stator fazı anahtarlandığında bu minimum relüktansın yönü değişir ve rotor yeni stabil denge konumuna gelerek, bir adım döndüğü kabul edilir. Saat yönünde tam bir tur dönüş için gerekli ardışık adımlamalar Tablo 2.2’de verilmiştir [21].

Tablo 2.2. İki fazlı SAM'ın yarım adım ardışık faz akım darbeleri

Adım Numarası	Saat yönünde	
	I_1	I_2
1	1	1
2	0	1
3	1'	1
4	1'	0
5	1'	1'
6	0	1'
7	1	1'
8	1	0



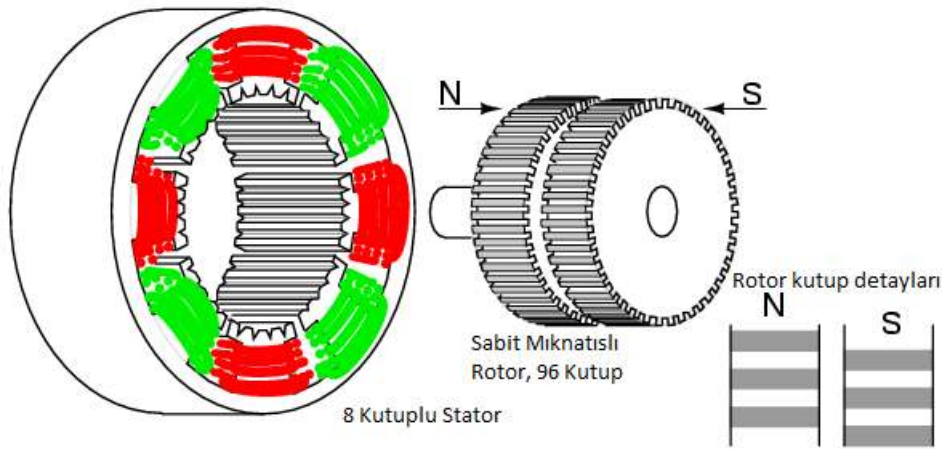
Adım motorları kutupların ardışık sıralanmasına göre tam ve yarım adım olarak dönüş gerçekleştirirler [21,22]. Yarım olarak gerçekleştirilen dönüş, adım motorlarının adım sayısını iki katına çıkarır. Bunun dışında mikro adımlama tekniği bulunmaktadır. Bu yöntemde ise 4, 8, 16 katı gibi sayılarda adımlama olanağı bulunmaktadır [1]. İki fazlı bir adım motorun tam adım sürülme tekniği ile bir tam dönüşü için statoruna verilen enerji ve rotor konumları şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Sabit mıknatıslı adım motorunun tam adım sürme tekniğinde rotor konumları

2.4. Hibrit Adım Motorları

Hibrit adım motorları mühendislik uygulamalarında kullanılan adım motorlarının en yaygınıdır [21]. Bu adım motoru sabit mıknatıslı ve değişken relüktanslı adım motorlarının çalışma prensibinin birleşimidir [23]. Çift çıkık kutuplu yapıya sahiplerdir ve manyetik devresinde sabit mıknatıs ve sargı yapısının birleşimi mevcuttur. Sargılar stator üzerindeki kutuplara yerleştirilmiştir, sabit mıknatıslar ise rotor üzerine yerleştirilmiştir [20].



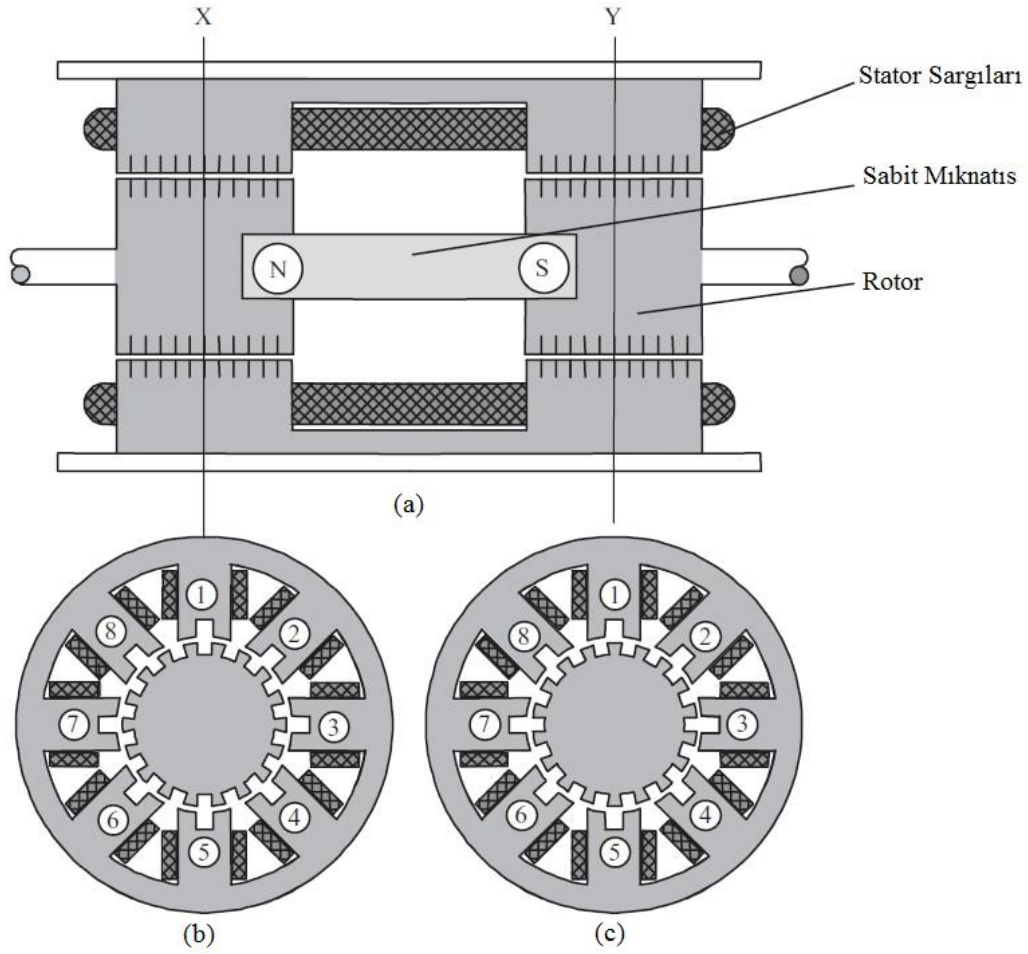
Şekil 2.6. Hibrit adım motoru stator ve rotoru

Şekil 2.6’da gösterildiği gibi hibrit adım motorunun rotoru iki gövdeden oluşur. Bu iki gövde birbirine zıt polarite olacak şekilde mıknatıslanmıştır. Hem rotorunda hem de statorunda eşit açılarla yerleştirilmiş dişler bulunur [12,23]. Statoru iki fazlıdır ve yapısı değişken relüktanslı adım motorlarının yapısına benzer. Değişken relüktanslı adım motorlarına göre farklılıkları ise şunlardır. Rotor gövdeleri mıknatıslanmıştır ve rotor ile stator gövdelerin dişlileri hiçbir zaman tamamı aynı anda birbirleri ile hizalı değildir [24]. Sabit mıknatıs akısı, şekil 2.7 (a)’da yandan kesiti gösterilen HAM’nun rotorunun N kutbundan başlayarak yumuşak demirden yapılmış rotor dişlerine doğru yönelir, X eksenini boyunca ilerleyen akı hava boşluğundan geçerek stator demir malzemesinden Y eksenine doğru yönelir buradan Y eksenini boyunca tekrar hava boşluğundan geçip S kutbuna ulaşarak akı yolunu tamamlar [20].

Hibrit adım motorlarının statorları genellikle iki faz sekiz kutup üretilir. Her bir faz dört kutba sarılır. Karşılıklı kutuplar aynı fazın ters yönde sarılması ile elde edilir. Böylelikle fazlar enerjilendiği zaman karşılıklı kutuplar zıt polariteye sahip olurlar. Örneğin şekil 2.7 (b)’de 1,3,5,7 numaralı kutupların A fazı için; 2,4,6,8 numaralı kutupların B fazı için olduğu

kabul edilirse; A fazı 1. veya 3. kutup N polariteye sahip olacak şekilde enerjilendiğinde 5. veya 7. kutup da S polariteye sahip olur [20].

Şekil 2.7’de gösterilen adım motorunun statoru sekiz kutba sahip ve her bir kutup ikişer tane olmak üzere toplamda 16 dişe sahiptir, rotoru ise toplamda 18 dişe sahiptir. Stator dişleri şekil 2.7 (b) ve (c)’de gösterilen X ve Y bölümleri için tamamen hizalıdır, fakat rotor dişleri tam olarak hizalı değildir. Eğer fazın uyarılmasından dolayı manyetik akı belirli kutuplarda yoğunlaşırsa, akı yolu hava aralığı manyetik direncinin minimize edilmesi için rotor kendisini hizalamaya çalışır.



Şekil 2.7. Hibrit adım motorunun a) Boyuna kesiti b) N kutbu tarafından enine kesiti c) S kutbu tarafından enine kesiti

Hibrit adım motorlar yüksek tutma torkuna sahiptir. Bu nedenle en yaygın uygulama alanları sabit pozisyon ve düzgün konumlamaya ihtiyaç duyulan alanlardır. Genellikle açık çevrim sürülmelerine rağmen, hem stator hem de rotorundaki diş serisinin kendine özgü dizilimi sayesinde motor fazlarına uygun akım uygulandığı takdirde etkin bir konum doğruluğuna sahip olur ve konum hatası birikimi olmaz. Hibrit adım motorlarındaki diş

yapısı sayesinde fazlara, önceden belirlenmiş akım değerleri uygulanması ile birbiri ardına gelen adımlar ile sağlanan bir mekanik dönüş, birçok elektriksel dönüş karşılık gelir [24]. Her bir adımın sahip olduğu dönme açısı rotorun diş sayısına göre hesaplanır. Hibrit adım motorunun dört mekanik adımı, elektriksel olarak bir tam tura karşılık gelir. Uyarım dört adım öncesi ve sonrasında aynı duruma gelir, yani ilk ve son durumda rotor ve stator dişlerinin hizası aynı stator kutbu hizasına gelir. Böylelikle dört adım, rotor kutup sayısı 'p' olmak üzere, $(360/p)^\circ$ 'lik diş açısı kadar rotor hareketine tekabül eder. Her bir adımdaki dönme açısı ise $(90/p)^\circ$ 'dir [20]. Şekil 2.7'deki motora göre adım açısı hesaplanırsa, rotor 18 tane dişe sahiptir ve bir adım açısı $(90/p)^\circ 5^\circ$ 'ye tekabül eder.

Şekil 2.8'de ticari bir step motorunun rotor ve statorunun görüntüsü verilmiştir. En yaygın adım motorları, şekil 2.8'de gösterilen motorunda bu özelliği taşıdığı, 1.8° 'lik adım motorlarıdır. 1.8° 'lik adım motorlarının rotor diş sayısı $(90/p)$ formülünden hesaplanırsa 50 olarak bulunur [20].



Şekil 2.8. Ticari bir adım motor rotor ve statoru

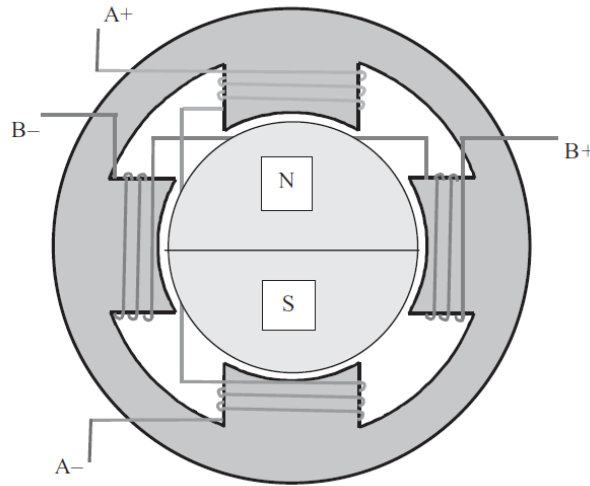
2.5. Adım Motorlarının Karşılaştırılması

Adım motorlarının herhangi bir türü için diğer türlerinden üstün olduğu seçimini yapmak mümkün değildir. Uygulamalara göre adım motoru türlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur [20].

Hibrit adım motorları yüksek hassasiyetli açısal pozisyon gerektiren uygulamalar için küçük adımlama açısına sahiptir. Ayrıca hibrit adım motoru yüksek torka sahiptir. Bu

nedenlerden dolayı küçük adım açısı ve yüksek tork gerektiren uygulamalar için tercih edilir. Hibrit adım motorunun fazları enerjisizken rotorun pozisyonunu korumaya çalışan, sabit mıknatıs tarafından üretilen manyetik akı ile küçük bir tutma torku üretilir. Buna rağmen bu tork fazlar tam enerjili durumdaki tutma torkuna göre küçük bir torktur. Yine de bu durum bazı uygulamalarda enerji kesilmesi durumunda bu süre boyunca son konumunu koruması açısından kullanışlı bir özelliktir [20].

Değişken relüktanslı adım motorları iki önemli avantaja sahiptir. Birincisi hibrit motorlara göre daha az adım açısına sahiptir. Dolayısıyla az adımla daha çok mesafe aldığı için daha hızlı konum değiştirir. Bu durum konum hassasiyetinin fazla olmadığı durumlar için avantajdır [20]. Diğer bir avantaj ise düşük ataletle sahip olmalarıdır, çünkü rotorunda sabit mıknatıs yoktur. Birçok durumda rotor ataleti motorun yükteki ataletine önemli ölçüde katkıda bulunarak daha hızlı ivmelenmelere olanak sağlar.



Şekil 2.9. Sabit mıknatıslı adım motoru

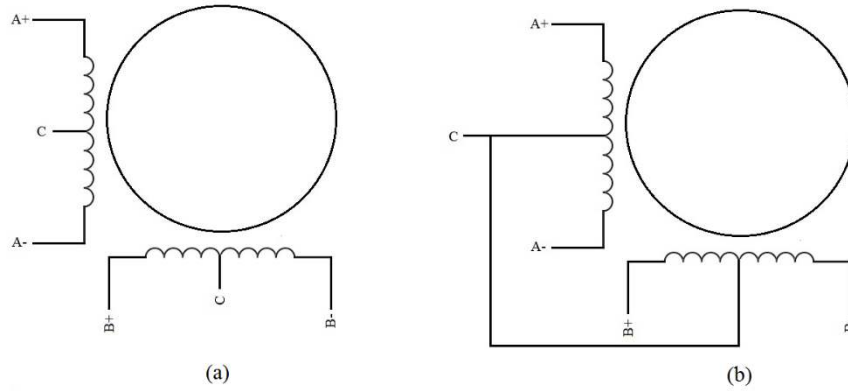
Sabit mıknatıslı adım motorunun statoru değişken relüktanslı adım motoruna benzer fakat rotoru dişlere sahip olmayan bir sabit mıknatıstır. Her bir fazın enerjilenmesi durumunda 90°'lik bir adım üretilir. Fazlardan akan akımın yönü bu motor için önemlidir. Rotor pozisyonu şekil 2.9'da gösterildiği gibi A sargısı için pozitif akım daha sonra B sargısı için pozitif akım uygulandığında rotor saat yönünde döner [20].

2.6. Adım Motorlarının Sargı Yapıları

2.6.1. Unipolar Sargı

Unipolar sargı yapısına sahip adım motorları beş veya altı sargı ucuna sahiptir. Şekil 2.10'da görülen adım motoru iki faza sahiptir, fakat orta noktalarından bağlantı noktası alınarak altı sargı uçlu adım motoru elde edilmiştir. Beş sargı uçlu adım motorları ise a ve b fazının orta noktalarının birleştirilmesi ile oluşur. Unipolar sargı yapısına sahip olan adım motorları genellikle altı sargı uçlu üretilir orta uçlar ortak bağlanarak beş sargı uçlu motor olarak kullanılabilir. Fakat beş sargı uçlu üretilmiş bir adım motorunun altı sargı uçlu olarak kullanılma imkânı yoktur.

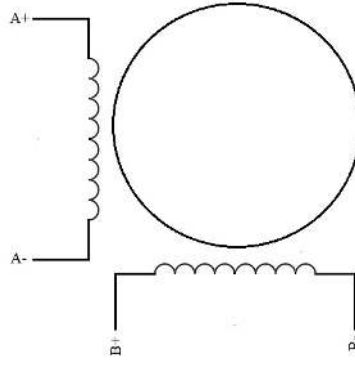
Unipolar motorlarda ortak uç genellikle pozitif besleme ucu olarak seçilir. Faz uçlarına bağlanan anahtarlama elemanı ile motorun kontrolü sağlanır.



Şekil 2.10. a) Altı sargı uçlu adım motoru sargı yapısı b) Beş sargı uçlu adım motoru sargı yapısı

2.6.2. Bipolar Sargı Yapısı

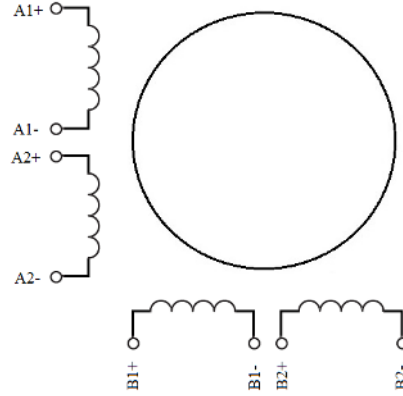
Bipolar sargı yapısında motor Şekil 2.11'de görüldüğü gibi a ve b fazlarının ikişer ucu olmak üzere toplam dört sargı ucuna sahiptir. Altı sargı uçlu adım motorlarının ortak uçları iptal edilerek bipolar olarak kullanılabilir. Bipolar sargı yapısına sahip adım motorları unipolar sargı yapısına sahip adım motorlarına göre daha fazla moment üretir. Bunun nedeni iki sargının seri olarak bağlanmasıdır. Fakat beş sargı uçlu unipolar adım motorlarında ortak uçlar motor içinde bağlı olduğu için bu uçlar ayırık bir şekilde devre dışı bırakılamaz; bu nedenle bipolar olarak kullanılamaz.



Şekil 2.11. Bipolar adım motorunun sargı yapısı

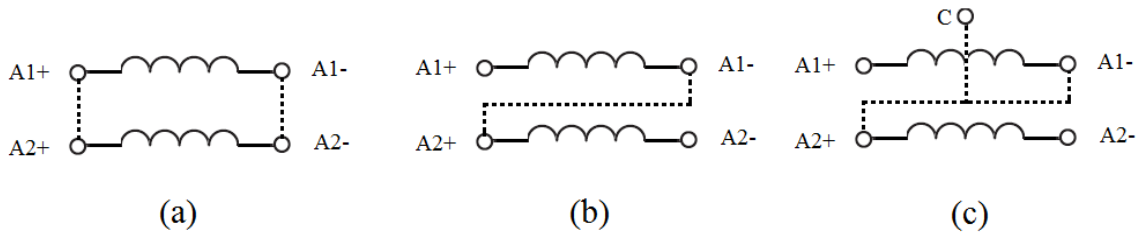
2.6.3. Bifilar Sargı Yapısı

Bifilar sargı yapısına sahip adım motorları sekiz sargı ucuna sahiptir. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi her faz iki sargıya sahiptir.



Şekil 2.12. Bifilar Sargı Yapısı

Bifilar adım motorları bipolar ve unipolar sargı yapısına sahip olacak şekilde rahatlıkla kullanılabilir. Bu nedenle adım motorunun sürme yöntemine göre sargı bağlantıları uyarlanarak tüm sürme yöntemleri ile kullanılabilir. Ayrıca bu sargı yapısına sahip motorlar bipolar sargı yapısında kullanıldığı zaman, sargıların seri veya paralel bağlantısına göre farklı bir avantaj sunar. Eğer sargılar şekil 2.13.a’da gösterildiği gibi seri bağlanırsa yüksek gerilim düşük akımla, şekil 2.13.b’deki gibi paralel bağlanırsa düşük gerilim yüksek akım ile sürülebilir.



Şekil 2.13. Bifilar sargı yapısı bağlantı şekilleri a) Paralel bağlantı b) Seri bağlantı c) Unipolar bağlantı

2.7. Adım motoruna ait kavramlar

2.7.1. Adım Açısı

Adım motorları her bir fazın ardışık enerjilenmesi ile bir adım atar. İki adım arasındaki rotor milinin dönme açısına adım açısı denir. Adım açısı; stator ve rotor kutup sayısına bağlıdır. Adım açısının bulabilmesi için öncelikle stator ve rotor dişlerinin açısı hesaplanmalıdır.

$$\text{Stator diş açısı } \theta_s = \frac{360^\circ}{n_s} \quad (2.1)$$

$$\text{Rotor diş açısı } \theta_r = \frac{360^\circ}{n_r} \quad (2.2)$$

Adım açısı $\Delta\theta$;

$$\Delta\theta = \theta_r - r\theta_s \quad (\theta_r > \theta_s) \quad (2.3)$$

$$\Delta\theta = \theta_s - r\theta_r \quad (\theta_s < \theta_r) \quad (2.4)$$

θ_s : Stator diş açısı

θ_r : Rotor diş açısı

n_s : Stator diş sayısı

n_r : Rotor diş sayısı

$\Delta\theta$: Adım açısı

r : En büyük uygun pozitif sayı

2.7.2. Adım Açısı Doğruluğu

Adım motoru yüksüz durumda ve fazı enerjili iken rotor konumunun hata oranıdır. Adım açısı doğruluğu adım motorları içinde en iyi olan hibrit adım motorudur.

2.7.3. Adım Sayısı

Rotorun bir tam turunu tamamlaması için attığı toplam adıma adım sayısı denir. Adım sayısı;

$$\text{Adım Açısı} = \frac{360^\circ}{\text{Adım Sayısı}} \quad (2.5)$$

2.7.4. Çözünürlük

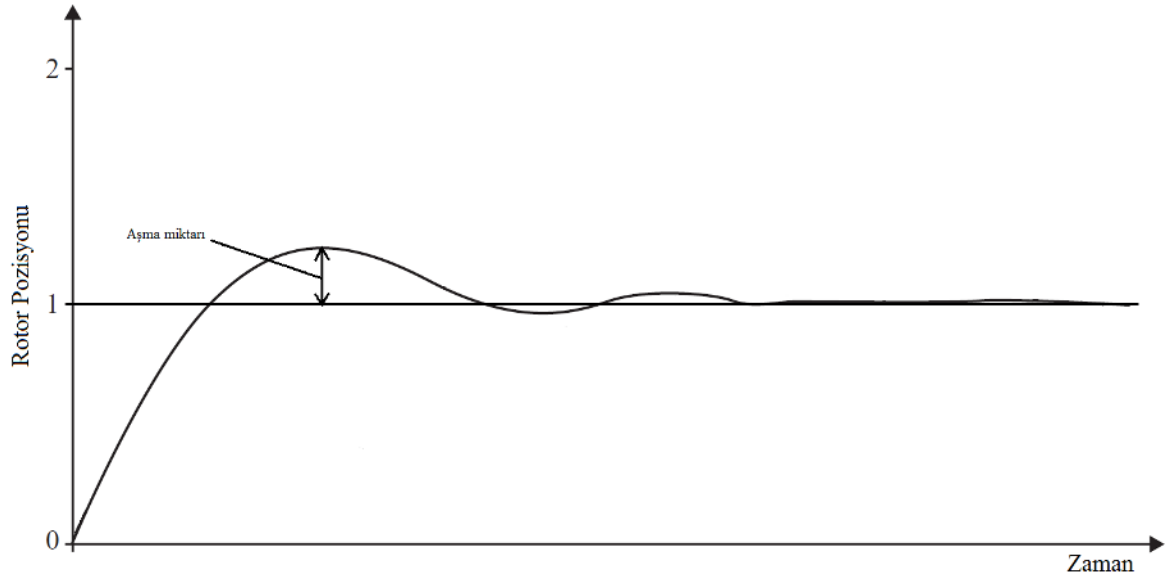
Bahsedilen adım sayısı ve adım açısı aynı zamanda adım motorunun çözünürlüğü olarak ifade edilir.

2.7.5. Tutma Momenti

Tutma momenti, adım motorunun sabit konumda ürettiği momenttir. Adım motorları için iki farklı tutma momentinden bahsedilir. Bunlar faz tam enerjili iken ve faz enerjisiz iken üretilen momenttir. Fazlardan biri tam enerjili iken sargılarda oluşan manyetik alandan dolayı yüksek bir moment oluşur. Bu “holding torque” diye adlandırılır. Fazlar enerjisiz iken ise rotordaki sabit mıknatısın ürettiği manyetik akıdan kaynaklı düşük bir moment oluşur. Bu da “detent torque” diye adlandırılır.

2.7.6. Aşma

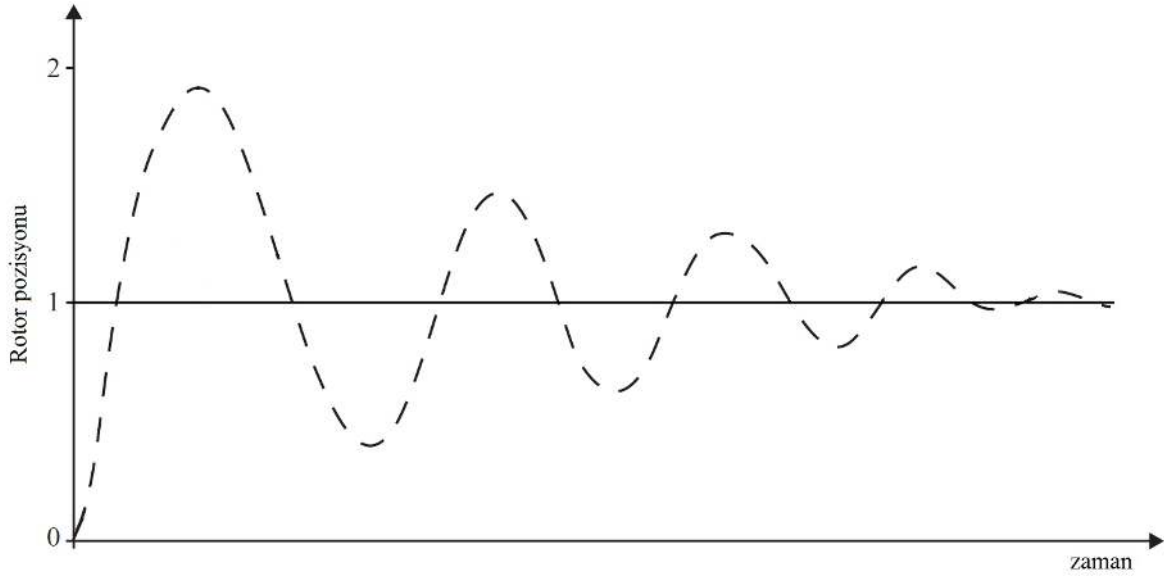
Adım motorunun rotoru sabit durumda iken, uyarımın gelmesi ile bir sonraki adıma geçme anında dönme ataletinden dolayı rotor durması gereken konumu bir miktar aşarak geri dönecektir. Bu durum rotorun aşma miktarıdır. Şekil 2.14’de görüldüğü gibi rotor 0 pozisyonundan referans pozisyon olan 1 pozisyonuna gelerek bu konumu bir miktar aşıp tekrar referans konuma geri döner.



Şekil 2.14. Adım motorunun adım cevabı

2.7.7. Kararlılık

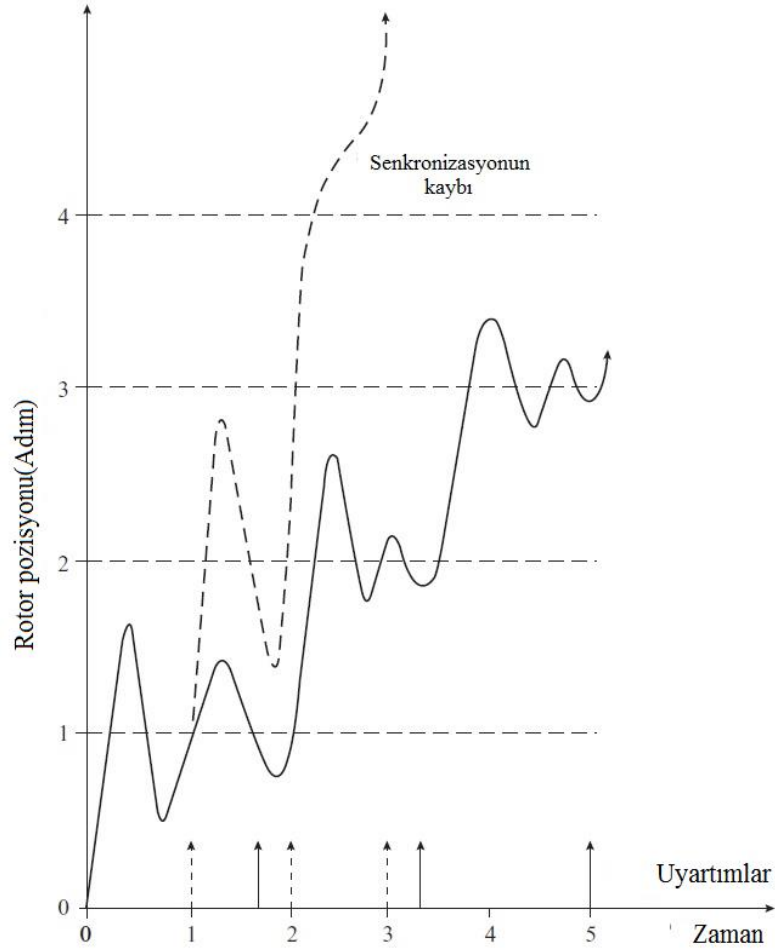
Adım motorunun her bir adım sinyaline karşılık yeni denge konumuna ulaşmasına kadar olan duruma tek adım cevabı denir. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi adım motorunun tek adım cevabında denge konumuna ulaşırken salınımlar yapar. Bu salınımlar adım cevabının kararlılığını belirler. Sistemin daha kararlı olması salınımların azaltılarak kısa sürede denge konumuna ulaşması anlamına gelmektedir



Şekil 2.15. Adım motorunun osilasyonlu tek adım cevabı

Sistemin ardı ardına gelen uyartımlara karşılık hızlıca denge konumuna ulaşarak, bir sonraki adım için hazır olması adım motorları için önemli bir konudur. Bu durum adım motorunun dönme hızı ile doğrudan alakalı olarak kısıtlayıcı bir etkidir. Eğer adım motorunun tek adım cevabı yeterince hızlı değil ise rotor denge konumuna ulaşmadan bir sonraki adım sinyali gelir ve adım kaybı olur. Bu durumda adım motoru senkronizasyonu kaybederek karasız bir duruma geçer. Şekil 2.16’daki grafikte bir adım motorunun iki farklı uyartım sıklığına göre adım cevabı verilmiştir. Grafikte sürekli çizgilerle gösterilen rotor pozisyonu; gelen uyartımlara karşılık denge konumuna ulaşmaktadır, fakat denge noktası etrafında salınımlar yapmaktadır. Buna rağmen adım motoru her bir uyartıma cevap vererek adımlar sorunsuz bir şekilde sağlanmaktadır. Kesikli olan rotor pozisyonu eğrisinde ise daha sık bir uyartım mevcuttur. 1. uyartımdan sonra rotor denge konumu etrafında salınım yaparken 2. uyartım gelmiştir ve rotor 3. adımın denge konumuna yöneldikten kısa bir süre sonra 3. uyartım gelmiş ve adım senkronizasyonu kaybolmuştur. Bu sebeple adım motorlarının senkronizasyonun bozulmaması için belli bir adımlama hızının üzerine çıkılmaması gerekir. Bu adımlama hızı adım motorunun yapısına, parametrelerine ve sürme

yöntemine göre değişiklik gösterir. Tek adım cevabında stabil denge konumuna ulaşma süresinin azalması, maksimum dönme hızını olumlu yönde etkiler.



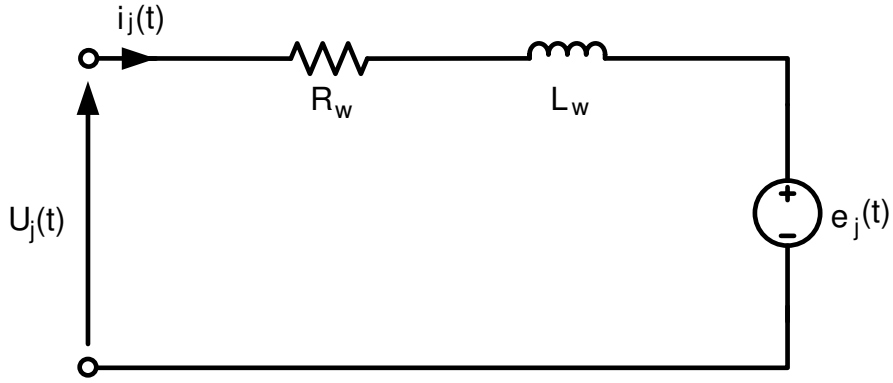
Şekil 2.16. İki farklı uyartım sıklığı için adım motorunun ardışık adım cevabı

2.8. Adım motorunun teorisi

Motor modeli elektriksel eşdeğer devre ve mekanik model olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Bunlar farklı zaman sabitlerine sahiptir ve elektriksel model daha hızlı bir dinamiğe sahiptir [24].

2.8.1. Elektriksel eşdeğer devre

2.8.1.1. Düşük Frekanslı RL Faz Modeli



Şekil 2.17. Adım motoru faz eşdeğer modeli

Adım motorunun her iki fazı da düşük frekans ve düşük akımda ters elektromotor kuvvetinde sahip bir RL devresi olarak modellenebilir [24-28].

$$\frac{di_a(t)}{dt} = -\frac{R_w i_a(t) - e_a(t) + u_a(t)}{L_w} \quad (2.6)$$

$$\frac{di_b(t)}{dt} = -\frac{R_w i_b(t) - e_b(t) + u_b(t)}{L_w} \quad (2.7)$$

R_w : Faz direnci

L_w : Faz indüktansı

i_a, i_b : Faz akımları

u_a, u_b : Faz uç gerilimleri

Ters elektromotor kuvveti ise denklem 2.8 ve 2.9’da tanımlandığı gibidir;

$$e_a(t) = -K_m w_m \sin p\theta_m \quad (2.8)$$

$$e_b(t) = -K_m w_m \cos p\theta_m \quad (2.9)$$

K_m : Motor sabiti

p : Motorun kutup çifti sayısı

w_m : Rotorun açısal hızı

θ_m : Mekanik açısı

Laplace dönüşümü alınırsa denklem 2.10 ve 2.11'den elde edilir;

$$I_a(s) = \frac{1}{Z_{mot}}(U_a(s) - E_a(s)) \quad (2.10)$$

$$I_b(s) = \frac{1}{Z_{mot}}(U_b(s) - E_b(s)) \quad (2.11)$$

Motorun elektriksel empedansı ise denklem 2.12'deki gibidir.

$$Z_{mot}(s) = L_w s + R_w \quad (2.12)$$

2.8.1.2. Yüksek Frekanslı Faz Modeli

Motor faz empedansının basit RL modeli yüksek frekanslarda, motor faz devresindeki ferromanyetik malzemelerin yüksek kayıplarından dolayı uygun değildir. Yaygın olarak benimsenmiş transformatör eşdeğer devresi gibi yüksek frekans eşdeğer devreleri, bir eşdeğer indüktansa paralel olan ve değeri nominal DC değerinden büyük ölçüde az olan ve harcanan aktif gücü modelleyen bir demir kayıpları direncine sahiptir. Demir kayıplı eşdeğer direncin varlığı motor faz empedansının yüksek frekanslı modelinin transfer fonksiyonunda kutup verme etkisine sahiptir. Şekil 2.18'de elektriksel devre şeması verilmiştir.

$$Z_{mot}^{HF} = \frac{R_w + sL_{eq}}{1 + s\tau_p} \quad (2.13)$$

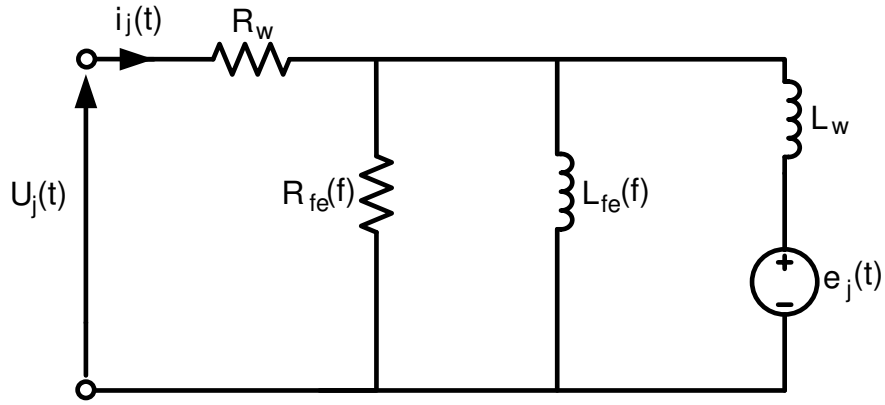
L_{eq} , paralel L_w ve L_{fe} 'nin eşitliğidir.

$$L_{eq} = \frac{L_{fe}L_w}{L_{fe} + L_w} \quad (2.14)$$

$$\tau_p = \frac{LR_{fe}}{L_{eq}} \quad (2.15)$$

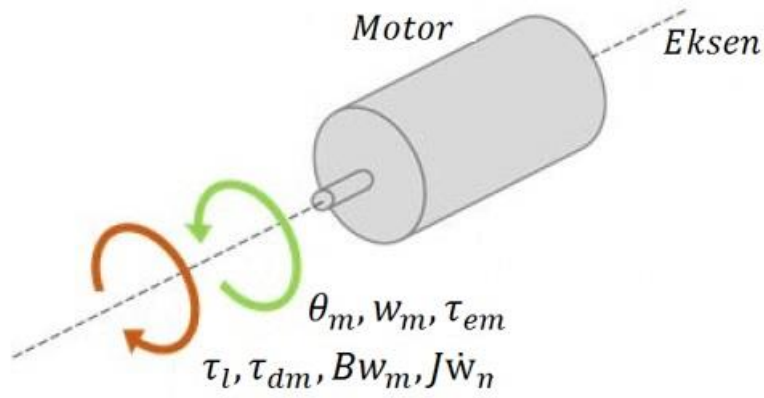
L_{eq} : Çekirdek kayıplarına neden olan endüktans

R_{eq} : Çekirdek kayıplarına neden olan direnç



Şekil 2.18. Motor fazının demir kayıplarını da içeren yüksek frekans eşdeğer devresi

2.8.2. Mekanik Model



Şekil 2.19. Motor eksenine uygulanan kuvvetler

Motorun mekanik kısmı şekil 2.19’da gösterilen değişken momente sahip katı bir gövdeden oluşur.

$$J \frac{dw_m}{dt} = \tau_{em} - Bw_m - \tau_{dm} - \tau_l \quad (2.16)$$

$$\tau_{em} = K_m(-i_{mota} \sin p\theta_m + i_{motb} \cos p\theta_m) \quad (2.17)$$

τ_{em} : Motorun elektromanyetik momenti

J : Atalet momenti

B : Sürtünme katsayısı

Motorun tutma torku ise;

$$\tau_{dm}: T_{dm} \sin(2p\theta_m + \varphi) \quad (2.18)$$

T_{dm} : Tutma torku genliği

φ : Faz kayma açısı

3. ADIM MOTORU SÜRME YÖNTEMLERİ, ADIM TEKNİKLERİ VE SÜRME DEVRELERİ

3.1. Adım Motoru Sürme Yöntemleri

Adım motoru eşdeğer devresi her biri seri direnç ve indüktanstan oluşan iki fazdan oluşur. Motorun fazına uyarım geldiğinde faz akımı eksponansiyel bir biçimde artar. Bu artışın hızı adım motorları için önemli bir parametredir. Artışın hızlı olması, adım motorunun kısa bir sürede adımını tamamlaması anlamına gelir. Eğer uyarımlar arasında yeteri süre olmazsa faz akımı istenilen değere ulaşamayacaktır. Bu süre RL devresinin zaman sabiti ile hesaplanır. Adım motorunun elektriksel zaman sabiti denklem 3.1'deki gibidir.

$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (3.1)$$

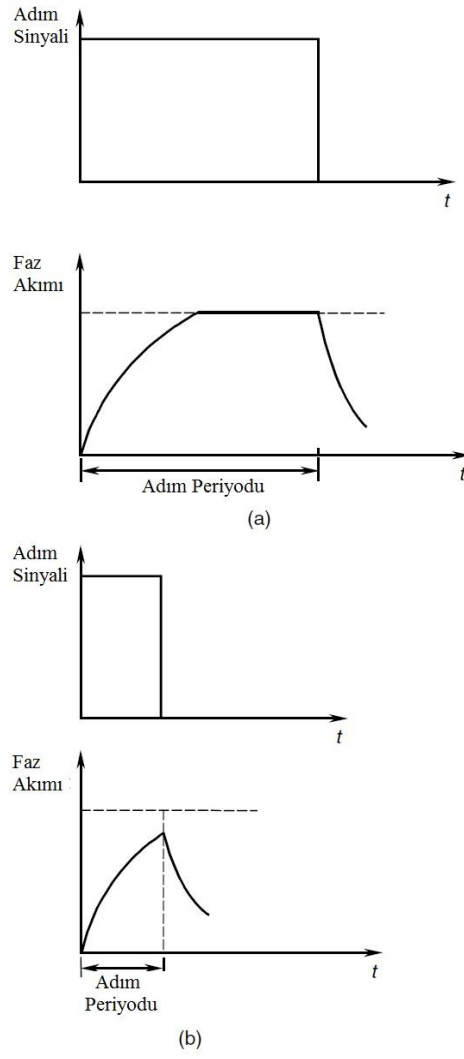
Faz akımının sürekli duruma ulaşma süresi 5τ 'dur. Faz akımı ise denklem 3.2'de verilen denklem ile bulunur.

$$i = \frac{V}{R} e^{(1-t/\tau_e)} \quad (3.2)$$

Elektriksel zaman sabitinin yüksek olması akımın referans değerine ulaşmasını geciktirir [21].

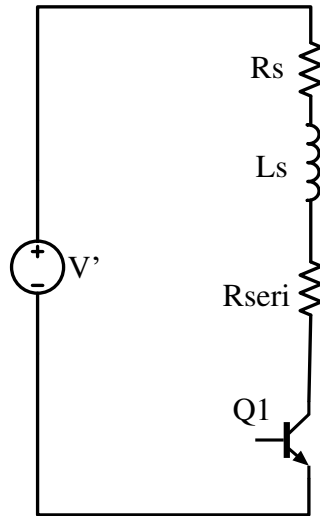
Şekil 3.1'de iki farklı sıklıktaki adım sinyali için faz akımının grafiği verilmiştir. Şekil 3.1 (a)'da adımın tamamlanması için yeterli süre vardır. Dolayısıyla adım motorunun adım kaybı olmaz ve yeterli momenti üretir. Fakat şekil 3.1 (b)'de elektriksel zaman sabiti adım uyarım sinyali süresinden büyük olduğu için akım nominal değerine ulaşmadan uyarım kesilmiştir. Akım nominal değerine ulaşmadığı için motor düşük moment üretmiştir ve adımın tamamlanıp tamamlanmadığı bilinmemektedir. Bu yüzden adım kayıpları olabilir veya yük için gerekli moment sağlanamayabilir.

Elektriksel zaman sabitinin kısaltılması için bazı sürme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler denklem 3.1'deki eşitlikten R direncini artırarak veya denklem 3.2'deki eşitlikten V gerilimini artırıp akımı sınırlayarak, akımın istenilen değere hızlıca ulaşmasını veya düşmesini amaçlar.



Şekil 3.1. Faz akımı değişiminde elektriksel zaman sabitinin a) yeterli olması b) yetersiz olması

3.1.1. L/R Sürme Devresi



Şekil 3.2. L/R Sürme devresi

Şekil 3.2’de görülen bu sürme devresinde stator fazına seri bir direnç eklenir. Bu direnç ile sargıdan geçen akım azalacağı için giriş gerilimi de eklenen direncin değerine göre yüksek uygulanır. Elektriksel zaman sabiti denklemi 3.4’teki gibi olur.

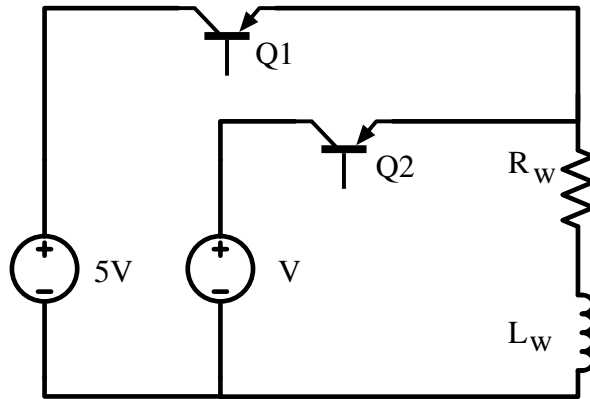
$$\tau_e = \frac{L_s}{R_s} \quad (3.3)$$

$$\tau'_e = \frac{L_s}{R_s + R_{seri}} \quad (3.4)$$

Bu sürme yönteminde amaç elektriksel zaman sabitini küçülterek akımın daha hızlı yükselmesini veya düşmesini sağlamaktır. Denklem 3.4’te görüldüğü gibi elektriksel zaman sabiti denkleminde eklenen R_{seri} direnci ile zaman sabiti azaltılmış ve $\tau'_e < \tau_e$ olmuştur. Böylelikle yüksek hızlarda akımın istenilen değere hızlıca ulaşması sağlanmıştır. Fakat bu sürme yönteminde seri direnç üzerinde bir güç tüketimi olacağından yüksek güçlü sistemlerde tercih edilmezler [29].

3.1.2. Çift Gerilim Seviyeli Sürme Devresi

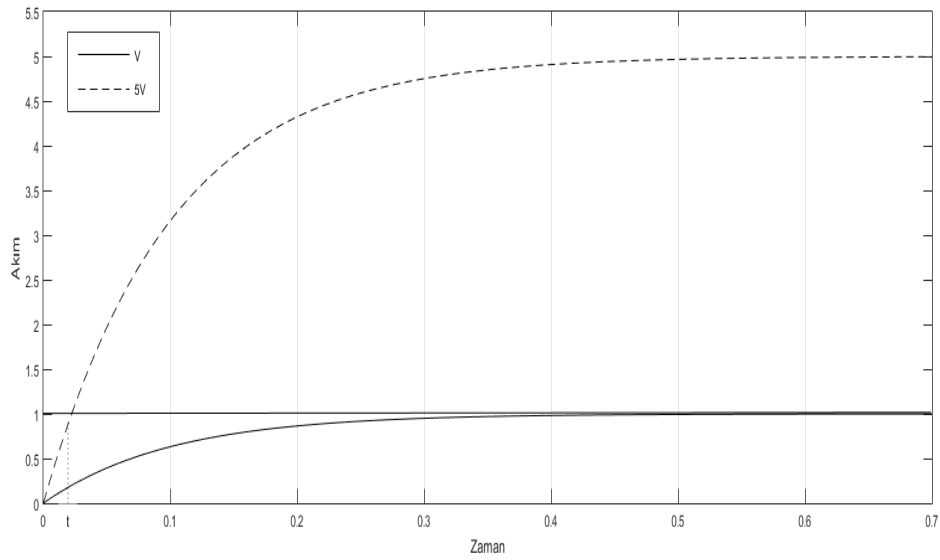
Bu yöntemde L/R sürme devresinden farklı olarak zaman sabitinin azaltılması yerine giriş gerilimi yükseltilerek akımın daha hızlı yükselmesi sağlanmıştır.



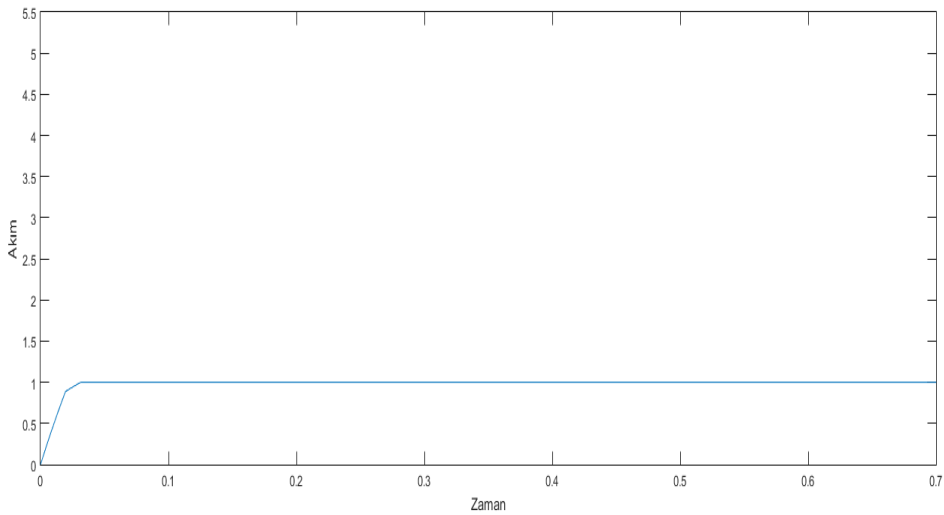
Şekil 3.3. Çift gerilim seviyeli sürücü devresi

Şekil 3.3’de görüldüğü gibi iki farklı gerilim kaynağı bulunmaktadır. Adım sinyali geldiği anda yüksek seviyeli gerilim kaynağı devreye girerek akımın hızla yükselmesi sağlanır. Akım istenilen seviyeye ulaştıktan sonra düşük seviyeli gerilim kaynağı devreye alınarak sürekli duruma geçilir. Şekil 3.4’te düşük seviyeli gerilim kaynağı ve 5 katı olan

yüksek seviyeli gerilim kaynağının akım yükselme eğrileri verilmiştir. Referans değer 1 seviyesi olarak belirlenmiştir. Şekil 3.4'teki grafikte görüldüğü gibi herhangi bir sınırlama getirilmediği durumda yüksek seviyeli gerilim kaynağı hızlıca yükselerek nominal akımın 5 katına ulaşmaktadır. Fakat tasarlanan devrede yüksek seviyeli kaynak devrede iken t anında düşük seviyeli kaynağa geçilir. Böylece sargı akımı hızlıca yükselerek nominal değerinde beslenmeye devam eder. Şekil 3.5'deki grafikte şekil 3.4'teki gerilim seviyelerine göre t noktasında kaynak değişimi ile ortaya çıkan akım değişimi verilmiştir



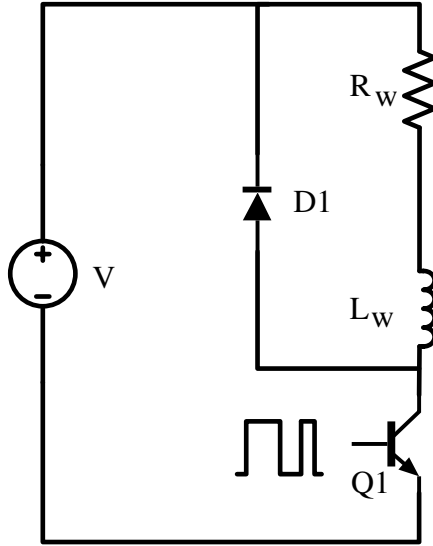
Şekil 3.4. İki farklı seviyedeki gerilim kaynağı için akım yükselme eğrileri



Şekil 3.5. Çift seviyeli sürücü ile akımın nominal değere ulaşma grafiği

3.1.3. Akım Kısıyıcı Sürme Devresi

Akım kısıyıcı sürme işlemi, bir anahtarlama elemanı ile stator geriliminin anahtarlanarak motor fazlarından geçen akımın ayarlanmasıdır. Böylelikle adım motorunun nominal gerilimi dikkate alınmaksızın akım kontrolü yapılır. Dolayısıyla sürücüde giriş gerilimi büyük seçilerek akımın hızlıca yükselmesi sağlanır. Yani çift gerilim seviyeli sürme devresindeki gibi akım yükselme hızının artması, gerilimi artırarak sağlanır. Anahtarlama işlemi şekil 3.6'da gösterildiği gibi Q1 anahtarlama elemanına PWM uygulanarak gerçekleştirilir. Bu PWM'in doluluk oranına göre fazlardan geçen akım ayarlanır. PWM'in pozitif olan kısımlarında fazlara yüksek gerilim uygulandığı için akımın yükselmesi hızlı olur. Böylelikle motorun adım cevabı hızlanır.



Şekil 3.6. PWM tekniği ile akım kısıyıcı sürme devresi

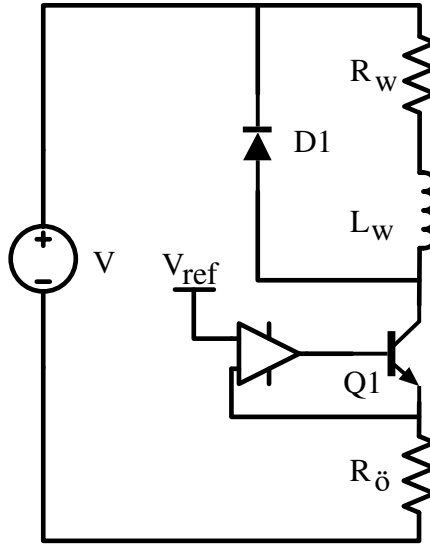
PWM ile akım kısıyıcı sürme devresi iki şekilde yapılabilir. Bunlardan birincisi, fazlara seri bağlanan düşük değerli bir direnç üzerinden gerilim bilgisi alınarak, istenilen akım değerine karşılık gelen ve bir kontrolör tarafından üretilen analog gerilimin bir OPAMP yardımı ile karşılaştırılması ile anahtarlama yapılır. Burada PWM değerinin görev periyodunun kontrolör tarafından bilinmesine gerek yoktur. Kontrolör sadece analog bir referans değerini üretir. PWM ise karşılaştırma sonucunda OPAMP tarafından üretilir. Şekil 3.7'de OPAMP ile karşılaştırma yapılarak PWM üreten bir kısıyıcı devresi gösterilmiştir. Bu devrede R_{gb} direnci üzerinden bir analog gerilim okunur. Direnç üzerinde fazla güç harcanmaması için düşük değere sahip bir direnç seçilir. Geri besleme akımı, R_{gb} direnci üzerinden alınan geri besleme gerilimi ile denklem 3.5'den bulunur.

$$I_{gb} = \frac{V_{gb}}{R_{gb}} \quad (3.5)$$

I_{gb} : Geri besleme akımı

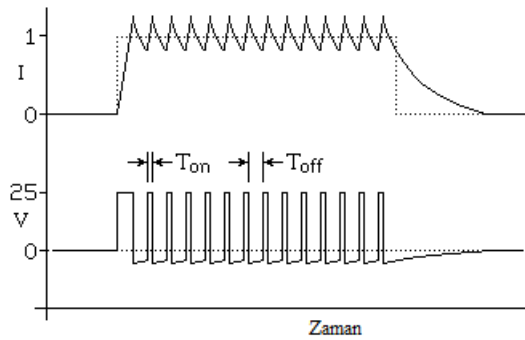
V_{gb} : Geri besleme gerilimi

R_{gb} : Geri besleme direnci



Şekil 3.7. PWM'in OPAMP ile üretildiği kıyıcı devre

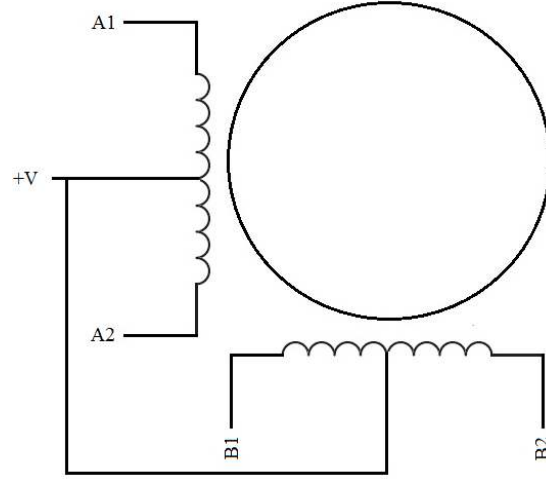
Diğer yöntem ise, akımın bir ölçme devresi ile sürekli ölçülerek bir kontrolör ile PWM'in görev periyodunun değiştirilmesi yoluyla akımın değerinin ayarlanmasıdır. Bu yöntemde bir ölçüm devresine ihtiyaç vardır ve ilk yöntemdeki gibi bir direnç yoluyla ölçülebilir. Kullanılan kontrolörün saat frekansı önemlidir. Eğer saat frekansı düşük bir kontrolör kullanılırsa adım cevabında gecikmeye neden olacaktır bu da istenmeyen bir durumdur.



Şekil 3.8. Akım kıyıcı sürme devresi grafiği

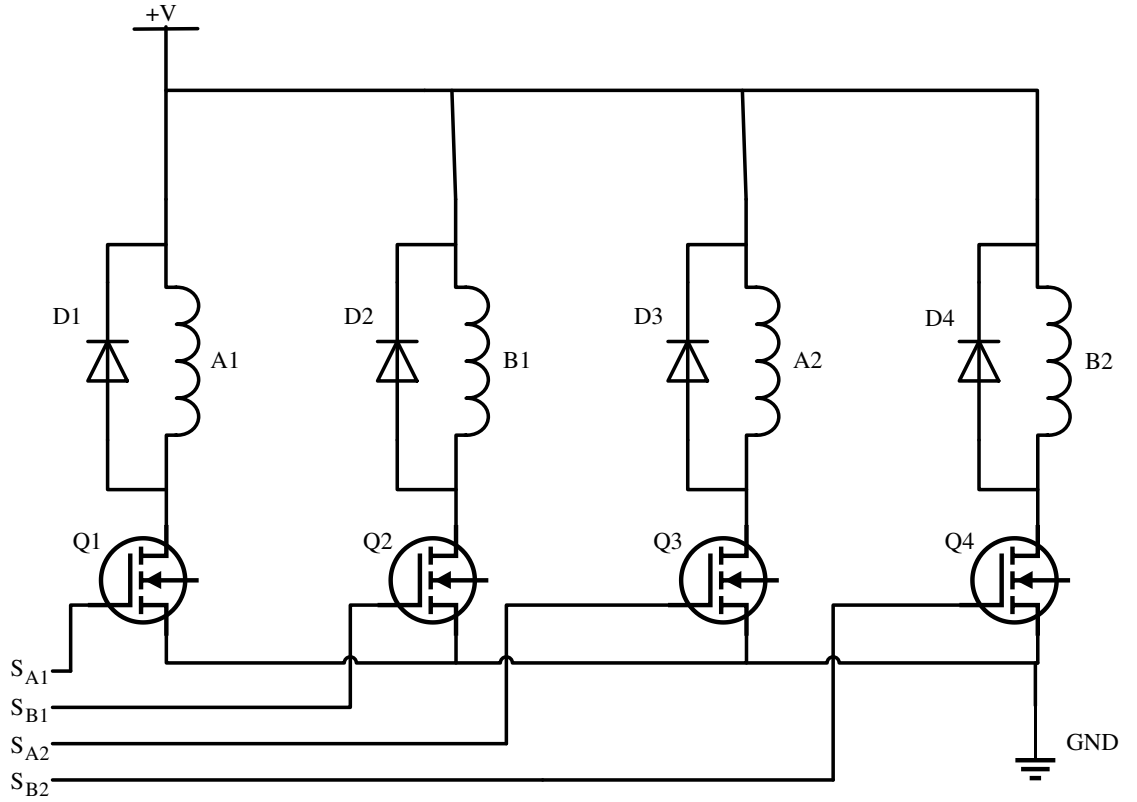
3.2. Sargı Yapılarına Göre Sürme Devreleri

3.2.1. Unipolar Sargı Yapısına Sahip Adım Motoru Sürme Devresi



Şekil 3.9. Unipolar motor sargı yapısı

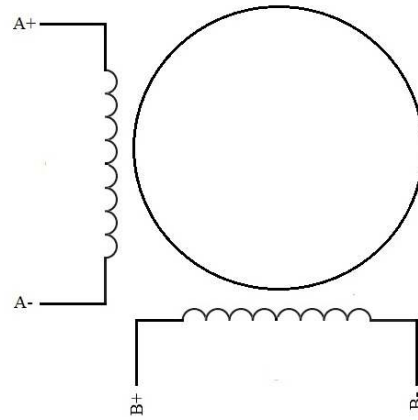
İkinci bölümde detaylı bahsedilen unipolar sargı yapısına sahip adım motorları beş ve altı sargı uçludur. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi A1, A2, B1, ve B2 sargı uçları açıkta, diğer uçlar ise ortak uçtur.



Şekil 3.10. Unipolar sargı yapısına sahip adım motoru sürme devresi

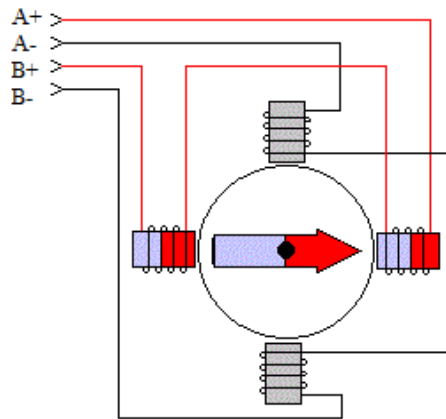
Bu sargı yapısına sahip adım motorlarının kontrolü her bir sargıdaki birer tane anahtarlama elemanı ile yapılır. Şekil 3.10’da görüldüğü gibi sargı uçları GND’ye ortak uç ise DC gerilim kaynağının bağlıdır. A1, A2, B1, B2 sargılarının her birine bir tane anahtarlama elemanı bağlıdır. Adım motorunun dönmesi için sırası ile Q1, Q2, Q3, Q4 anahtarları tetiklenir. Böylelikle sırasıyla A1, B1, A2, B2 fazları sırasıyla enerjilendirilerek motor dönüşü gerçekleştirilir. Motorun tersi yönde dönmesi için bu anahtarların sırası tersi yönde tetiklenir.

3.2.2. Bipolar Sargı Yapısına Sahip Motorların Sürme Devresi



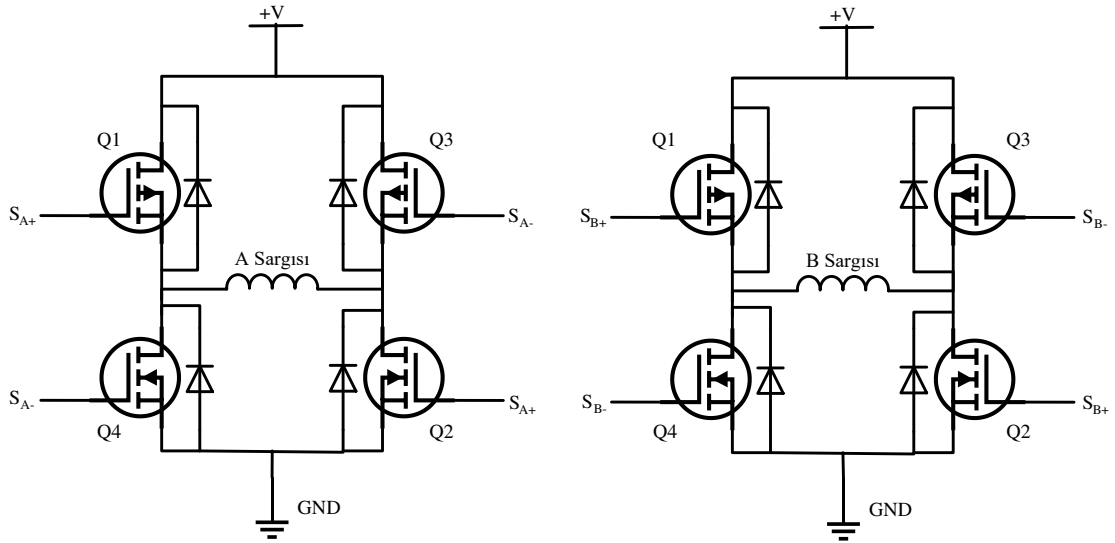
Şekil 3.11. Bipolar motor sargı yapısı

İkinci bölümde detaylı bahsedilen bipolar sargı yapısına sahip adım motorları dört sargı uçludur. A+, A-, B+ ve B- şekil 3.11’de görüldüğü gibi A ve B sargılarının uçlarıdır. +, - tanımlamaları sargıların bağlantı yönüne göre akım pozitif ve negatif yönünü göstermektedir. Bu sayede sargılara uygulanan uyarımın yönünün hangi sıra ile belirlenebilir.



Şekil 3.12. Bipolar sargı yapısı faz sarımları

Şekil 3.12’de bipolar sargıların sarım şekli gösterilmiştir. Her bir faz stator kutbuna aynı yönde sarıldıktan sonra tam karşısındaki stator kutbuna da ters yönde sarılır. Böylelikle sargı enerjilendirildiği zaman karşılıklı olarak zıt kutuplar oluşturulur [23,30,31]. Sargı tersi yönde enerjilendirildiğinde ise kutupların karşılıklı olarak polarite değiştirir. Sürme devrelerinde görüldüğü gibi unipolar sargı yapısında her bir sargı ayrı ayrı enerjilendirildiği için bipolar sargı yapısına göre daha az moment üretilir.



Şekil 3.13 Bipolar sargı yapısına sahip adım motoru sürme devresi

Şekil 3.13’de görüldüğü gibi her bir fazın sürülmesi için birer adet H-Köprülü sürme devresi kullanılır. Bu sayede fazlardan iki yönde de akım akması sağlanır. Motorun bir yönde dönmesi için fazlar sırasıyla A+, B+, A-, B-, A+,... şeklinde enerjilendirilir. Ters yönde dönmesi için ise bir önceki sıralamanın tersi yönünde enerjilendirilmesi gerekir.

3.3. Adım Motoru Sürme Devrelerinde Adım Teknikleri

Teze ilişkin deneysel çalışmada bipolar sargı yapısına sahip hibrit adım motoru kullanıldığı için bu bölümdeki bütün sürme yöntemleri bipolar sürme yöntemine göre anlatılmaktadır.

3.3.1. Tam ve Yarım Adım Sürme Yöntemi

Tam ve yarım adım sürme tekniği fazları lojik olarak anahtarlama yöntemine dayanır. Adım motorları dört kutuptan oluşur ve tam adım sürme tekniğinde kutuplar sırasıyla tetiklenerek her dört adımda tekrar aynı kutup enerjilendiği için 360°’lik elektriksel açı dört

adımda tamamlanır. Dolayısıyla hibrit adım motorlarında her kutup arası 90° 'lik elektriksel açıya sahiptir [1,32].

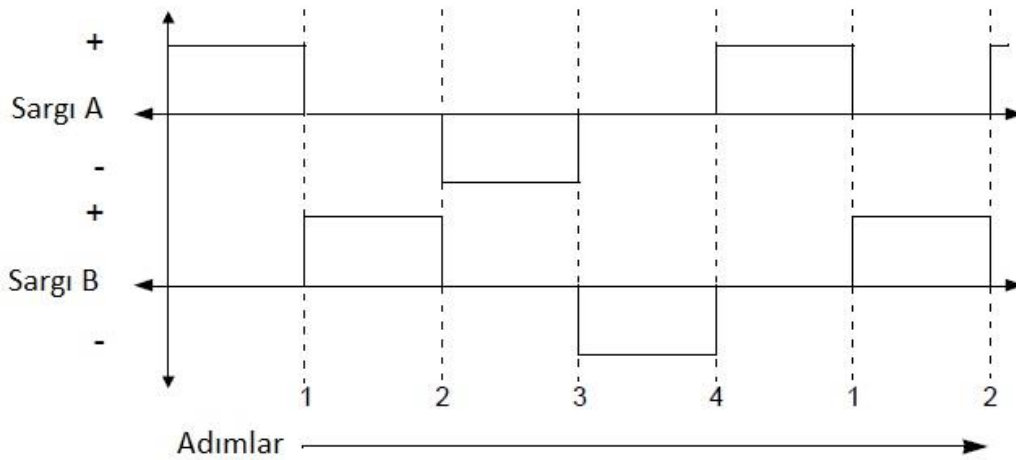
Bir adım motorunun katalogunda verilen adım sayısı ve adım açısı, tam adım sürme tekniği için geçerlidir. Yarım adım sürme tekniği uygulandığı durumda adım sayısı iki katı kadar ve adım açısı yarısı kadar olur. Bu şekilde daha hassas bir konumlama yapılabilir.

Fazların enerjilendirilmesi için üç durum mevcuttur. Tanımlanan akım yönü A ve B ile ifade edilir, tanımlanan akım yönünün tersi A' ve B' ile ifade edilir ve akımın olmadığı durum ise 0 ile ifade edilir.

Tam adım sürme yönteminde her anda sadece bir faz uyarılmış durumdadır. Dolayısıyla elektriksel olarak bir turunu dört adımda tamamlar Tablo 3.1'de tam adım sürme yöntemi için fazların durumu ve şekil 3.14'de akım-adım grafiği verilmiştir. Tablo 3.1'de görüldüğü gibi 4. adımdan sonra faz enerjilenmesi 1. durumu tekrar etmiştir. Bu döngü ile sürekli dönüş sağlanır. Ters yönde dönmesi için ise fazlar 4'den 1. adıma doğru enerjilendirilir.

Tablo 3.1. Adım motorunun tam adım sürme yönteminde faz enerjilendirme sırası

Adım/Faz	A Sargısı	B Sargısı
1.	A	0
2.	0	B
3.	A'	0
4.	0	B'
1.	A	0

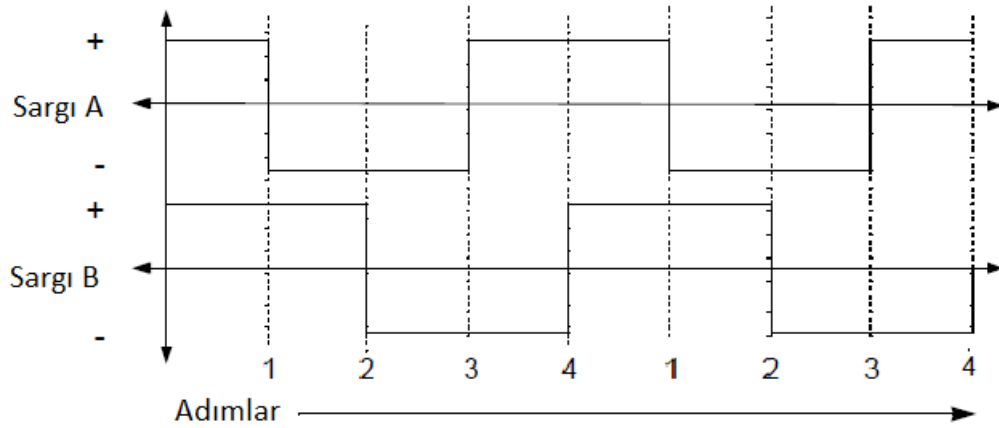


Şekil 3.14. Bipolar adım motoru tam adım sürme tekniği akım-adım grafiği

Yarım adım sürme yönteminde ise tam adımdan farklı olarak ardışık kutuplar aynı anda enerjilendirilir. Böylelikle tam adımda bir adımdan diğerine geçilirken arada bir adım daha atılır [33]. Tablo 3.2’de yarım adım sürme yöntemi için fazların durumu ve şekil 3.15’de akım-adım grafiği verilmiştir.

Tablo 3.2. Adım motorunun yarım adım sürme yönteminde faz enerjilendirme sırası

Adım/Faz	A Sargısı	B Sargısı
1.	A	0
2.	A	B
3.	0	B
4.	A'	B
5.	A'	0
6.	A'	B'
7.	0	B'
8.	A	B'



Şekil 3.15. Bipolar adım motoru yarım adım sürme tekniği akım-adım grafiği

Tablo 3.2’de görüldüğü için bir tam turdaki elektriksel açı iki katına çıkmıştır. Bu da adım motorunun yarım adım sürülmesi ile bir tam turundaki adım sayısını iki katına çıkarır ve adım açısını yarıya düşürür.

3.3.2. Mikroadım Sürme Tekniği

Adım motorlarında diğer adım tekniklerinin bazı dezavantajları ve ihtiyaçlar sonucunda mikroadım tekniği geliştirilmiştir. Adım motorlarında en büyük sorunlardan biri düşük hızlarda meydana gelen titreşimlerdir [34,35]. Her bir adım sonrasında rotor durması gereken konum etrafında salınım yaparak gerçek konumuna gelir ve duruşlar sert olur. Mikroadım tekniğinde amaç her bir adım arasında tork kontrolü ile daha fazla adım elde etmektir. PWM teknolojisi ile üretilen sinüsoidal formda faz akımı ile daha hassas dönme açıları oluşturulabilir [36]. Böylelikle adım motorunun adımları arasındaki mesafe kısılacak daha küçük bir aralıkta dur kalk yapacağı için titreşimlerde en aza inerek yumuşak geçişler sağlanacaktır. Bu aralığın sonsuz adıma bölündüğü varsayılırsa, adım motoru DC motor gibi sürekli bir dönüş meydana getirir.

İki faz arasındaki moment ilişkisi cosinüs ve sinüsten bileşeni olarak türetilir. Adım motorunun çıkış momenti, faz akımı ile bağlantılı olan her fazın moment vektör toplamından türetilir [37]. Faz akımı eşitlikleri denklem 3.6 ve 3.7'deki gibidir.

$$i_{as} = I_m * \cos \theta_e \quad (3.6)$$

$$i_{bs} = I_m * \sin \theta_e \quad (3.7)$$

i_{as} : A faz akımı

i_{bs} : B faz akımı

θ_e : Elektriksel açı

Her bir fazda üretilen moment denklem 3.8 ve 3.9'daki gibidir;

$$T_{ma} = K_T * I_m * \cos \theta_e \quad (3.8)$$

$$T_{mb} = K_T * I_m * \sin \theta_e \quad (3.9)$$

T_{ma} : A fazında üretilen moment

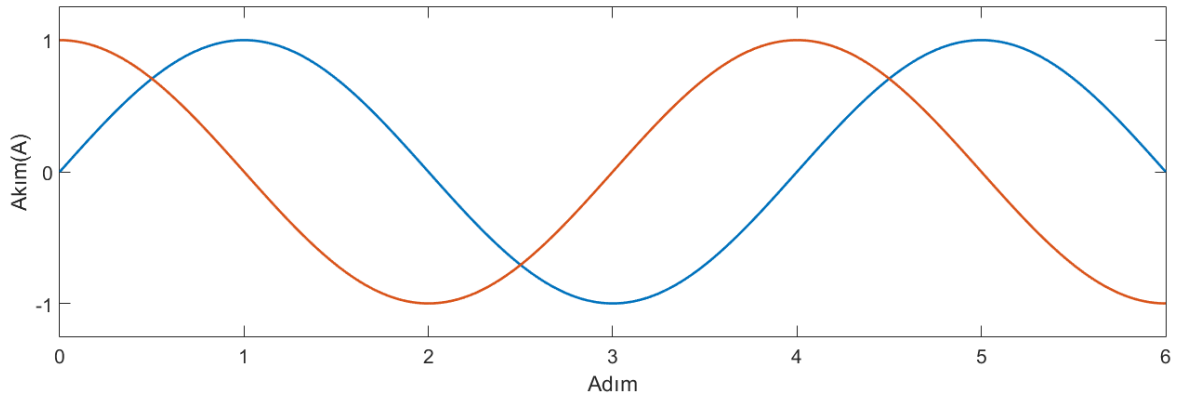
T_{mb} : B fazında üretilen moment

K_T : Moment sabiti

Momentlerin vektörel bileşimi olan toplam moment ise denklem 3.10’da verilmiştir;

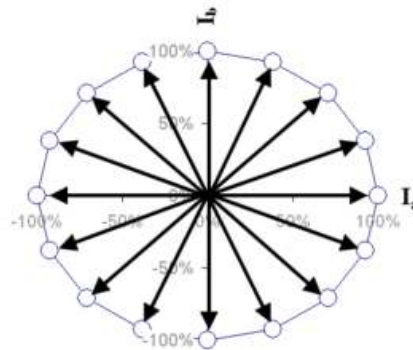
$$T_m = \sqrt{(T_{ma}^2 + T_{mb}^2)} \quad (3.10)$$

Mikroadım tekniğinde denklemlerde görüldüğü gibi her bir faza aralarında 90° ’lik faz farkı bulunan sinüsoidal akımlar uygulanmıştır [38]. Bu 90° ’lik faz farkının nedeni ardışık adımlar arasında elektriksel açının 90° olması ve moment bileşke vektörünün sabit olmasının istenmesidir. Şekil 3.16’da a ve b fazına uygulanan sürekli akımın grafiği verilmiştir.



Şekil 3.16. Bipolar motor mikroadım tekniği akım-adım grafiği

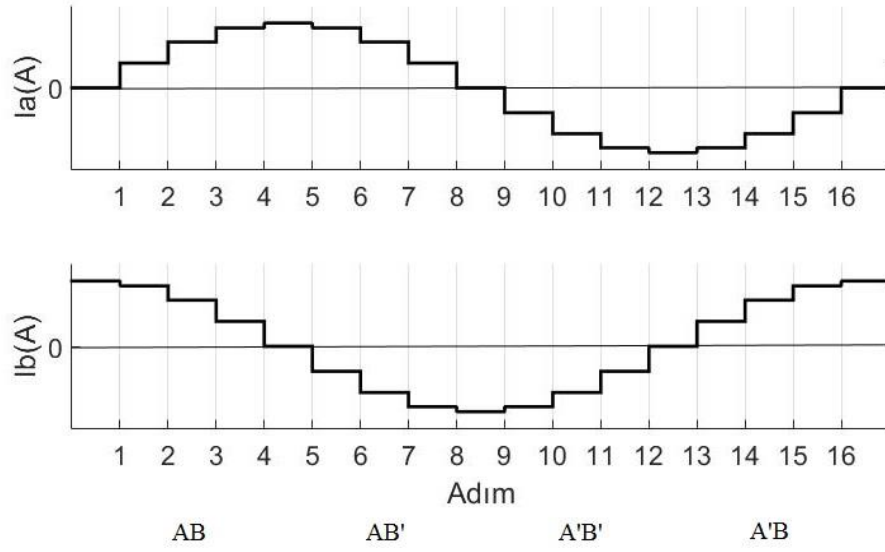
Bu sinüsoidal gerilimler referans alınarak her adım arası belli oranlarda bölünerek fazlara sırası ile uygulanır. Böylece birçok adım elde edilir. Ayrıca denklem 3.6 ve 3.7’den yola çıkarak momenti oluşturan ortalama akımın fazları uygulanan akıma göre faz akımı diyagramı grafiği şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Ortalama faz akım diyagramı

Şekil 3.16’da sürekli olarak verilen akımı referans alarak hem bu akımları oluşturmak hem de adım aralıklarını belirleyebilmek için PWM tekniği kullanılır. Bu teknik bir önceki

kısımda anlatılan akım kısıyıcı sürücü ile sağlanır [39]. Şekil 3.17’de 1/4 bölme oranına sahip bir mikroadım sürme yöntemi ile oluşturulan akım-adım grafiği verilmiştir.



Şekil 3.18. 1/4 bölme oranına sahip sürme yöntemine akım-adım grafiği

Şekil 3.18’de görüldüğü gibi sırası ile her bir adım için belli bir akım değeri mevcuttur. Bu değerler sinüs ve cosinüs grafiğinin değişimine sahiplerdir. Bu grafikte akımın maksimum değeri adım motorunun nominal akımına eşittir.

4. DENEYSEL SİSTEM

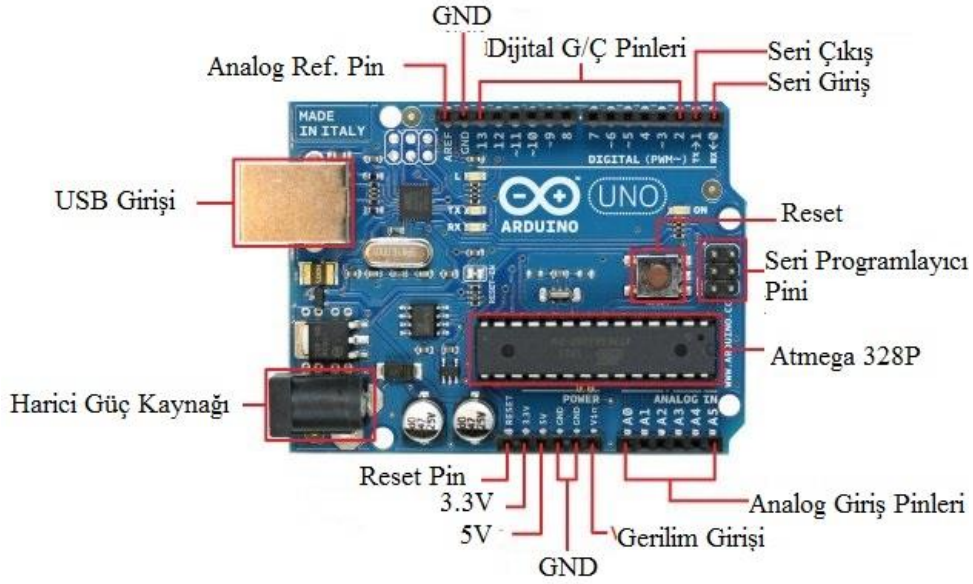
4.1. Kullanılan Donanımlar

4.1.1. Arduino

Arduino donanım ve yazılım olarak kolay kullanıma sahip açık kaynak bir elektronik platformdur.

Sistemde kullanılan Arduino Uno R3 modeli ATmega328P tabanlı bir mikrokontrolördür

Şekil 4.1’de pin haritası verilen Arduino Uno R3’ün 14 adet dijital giriş/çıkışından 6 tanesi PWM çıkışını destekler. PWM çözünürlüğü 8 bittir. 6 adet analog girişi vardır ve ölçüm aralığı 0-5 V’tur.



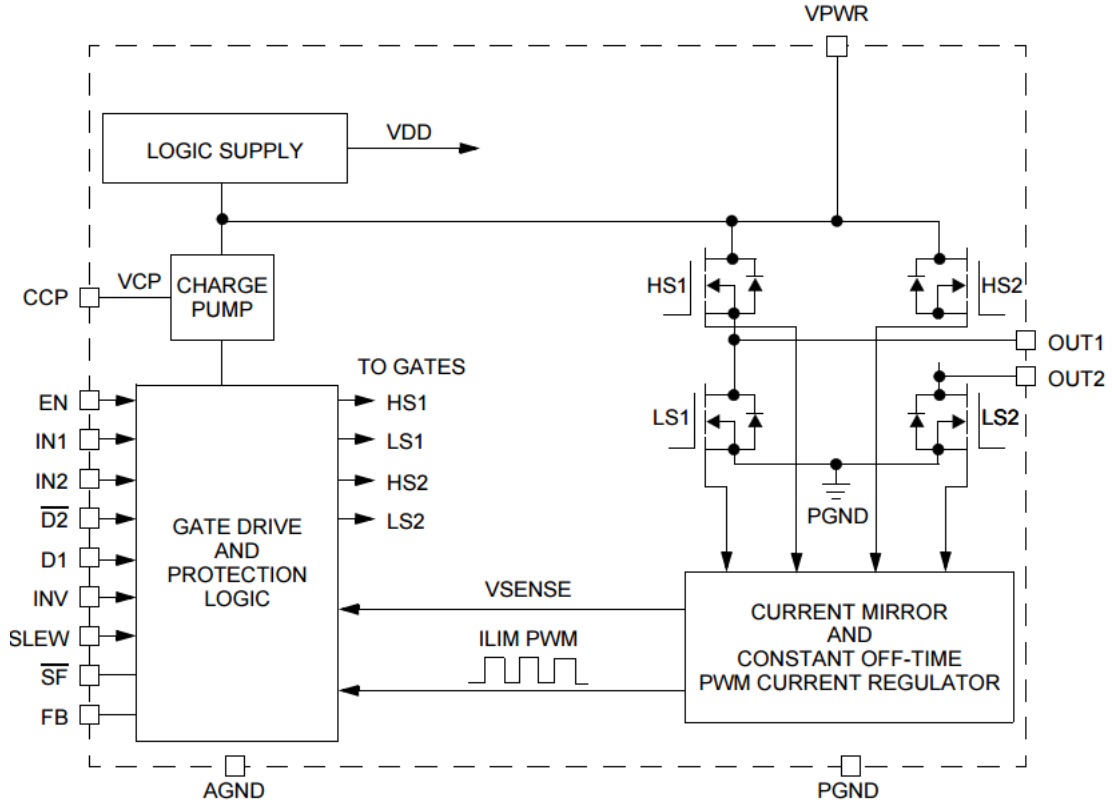
Şekil 4.1. Arduino pinleri

4.1.2. Sürücü Devresi

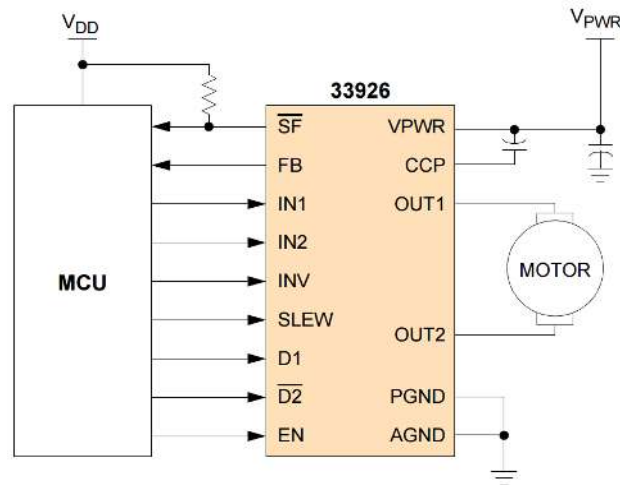
Kullanılan bu donanım iki adet MC33926 entegresinin Arduino Uno borduna doğrudan yerleştirilebilmesi için tasarlanmış bir sürücü devresidir.

4.1.3. MC33926 H Köprülü Motor Sürücü Entegresi

MC33926 entegresi aslında otomotiv sektöründe gaz kelebeği kontrolü için üretilmiş olup aynı zamanda düşük gerilime sahip DC motor uygulamalarında da kullanılabilen bir H-Köprü sürücüdür. Bu motor sürücü entegresinde akım değeri geri besleme olarak alınabilmektedir [40]. MC33926 motor sürücü entegresinin blok diyagramı şekil 4.2’de ve basit bir uygulama bağlantısı ise şekil 4.3’te verilmiştir.



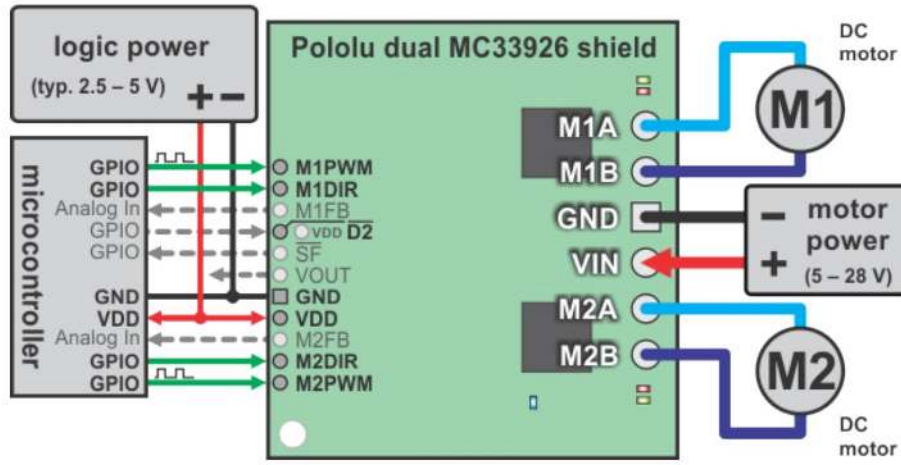
Şekil 4.2. MC33926 entegresi blok diyagramı



Şekil 4.3. MC33926'nın basit bir uygulama bağlantısı

4.1.4. Pololu MC33926 Arduino Uno Kart

Bu kart üzerinde iki adet MC33926 H-Köprü sürücü entegresi bulunduran Arduino Uno R3 mikrokontrolör kartına uyacak şekilde tasarlanmış bir tümleşik karttır. Yapısında bulunan iki adet sürücü sayesinde aynı anda iki tane sürme uygulaması yapılabilir. Her bir sürücü için nominal akım 3A'dır. Kartın besleme gerilimi 5-28 V arasındadır. Kartın kısa devre, yüksek akım ve düşük giriş gerilimi koruması vardır [41]. MC33926 sürücü entegresinin sahip olduğu bütün özellikler bu karta eklenmiştir.



Şekil 4.4. Pololu MC33926 kartının mikrokontrolör ile kullanımı ve güç bağlantıları

Şekil 4.4'te sürücünün bir mikrokontrolör ile olan bağlantıları gösterilmiştir. Bu kart Arduino Uno R3 ile uyumlu olduğu için birbirlerine pinler yardımı ile bağlanır ve şekil 4.4'te gösterilen bağlantılar kullanılmadan doğrudan bağlantı sağlanabilir.

Bu kart sürme devresindeki akım değerlerini, M1FB ve M2FB çıkışlarından, 1 A'e karşılık 525 mV'luk bir geri besleme bilgisi olarak vermektedir. Akımın ölçüldüğü nokta köprü doğrultucunun girişidir. Motor sürme uygulamalarında olduğu gibi, indüktif bileşeni olan bir yük kullanıldığı durumda boşluk diyotlarında da bir akım dolanacağı için yük ile doğrultucu girişindeki akım farklı olacaktır. Dolayısıyla ölçülen yük akımı doğru olmayacaktır. Bu nedenle akım kontrolü gerektiren uygulamalarda akımın yük üzerinden ölçülmesi gerekmektedir.

4.1.5. Nema 17 42STH47-1206 Adım Motor

Şekil 4.5'te görülen ve deneysel çalışmada kullanılan adım motoru altı sargı uçlu hibrit bir adım motorudur. Nominal faz akımı 1.2 A, faz direnci 3.3 Ω , faz indüktansı 2.8

mH ve tutma torku 3.2 kg/cm'dir. Bir turdaki adım sayısı 200 adımdır ve her bir adım 1.8°'dir. Hem bipolar hem de unipolar olarak kullanılabilir.



Şekil 4.5. 42STH47-1206a adım motor

4.1.6. Sistem İçin Tasarlanan Devre Kartları

4.1.6.1. Akım Ölçme Kartı

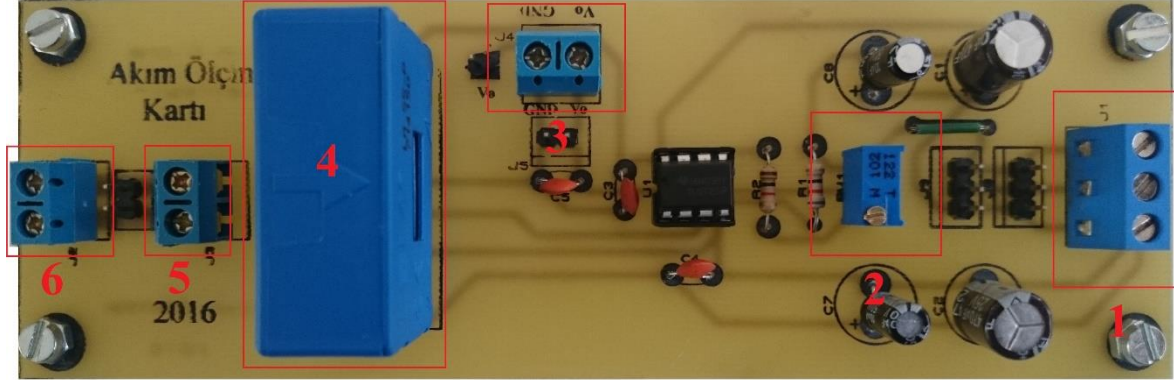
Tasarlanan sistemde akım ölçme işlemi LEM la 55-p akım dönüştürücü ile yapılmaktadır. Bu akım dönüştürücü sekonder çıkışına, DC akımların da ölçülebilmesi için, elektronik devre eklenmiş bir tür akım transformatörüdür.

Akım transformatörleri bağlı oldukları devreden geçen akımı belli oranlarda küçülterek sekonderine bağlı ölçüm sistemlerine ölçüm için gerekli akımı ve izolasyonu sağlayan transformatörlerdir. Akım transformatörleri üç kısımdan oluşur,

- 1- Primer sargısı
- 2- Sekonder sargısı
- 3- Manyetik nüve

Bu akım dönüştürücüde ise sadece sekonder sargısı ve manyetik nüve bulunmaktadır. Primer sargısı ise akım geçen kablunun LEM modülün nüvesinin içerisinde geçirilmesiyle elde edilir. Kullanılan LEM modülün dönüştürme oranı 1:1000'dir. Akım geçen kablunun bu LEM modüle bir sarım sarılması durumunda sekonderinden 1:1000 oranında küçültülmüş bir akım elde edilir. Akım bilgisi LEM modülün çıkışına bağlanan seri bir direnç üzerinden gerilim bilgisine dönüştürülerek ölçülür. Bu çıkış direncinin uygun değeri, Kullanılan akım dönüştürücünün katalogunda 10-160 ohm olarak verilmiştir. LEM modül ile hazırlanan akım ölçme devresi şekil 4.6'da verilmiştir.

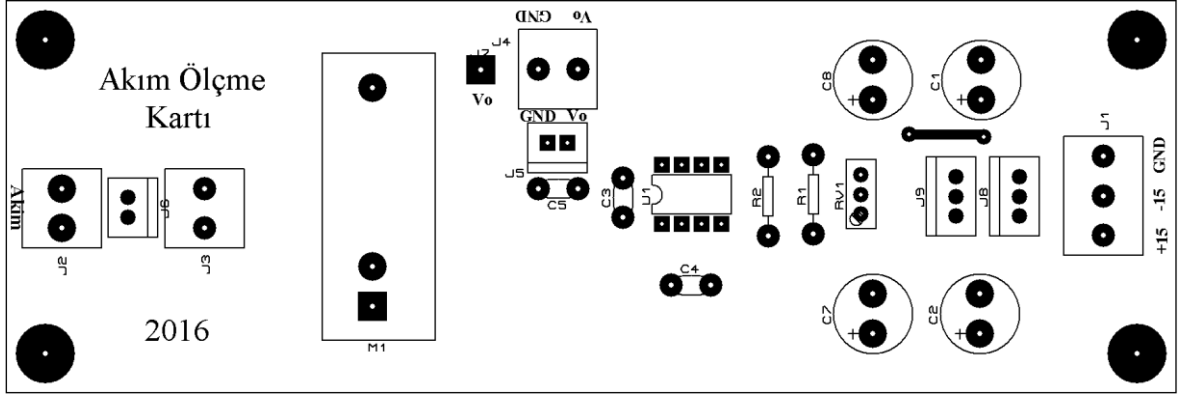
azaltılmaktadır. Bu şekilde primerdeki akımın sekonderde daha az oranda küçültülerek daha yüksek akım elde edilmiştir. Böylelikle OPAMP'lı devre ile daha az oranda bir kuvvetlendirme yapılarak hatanın da kuvvetlendirilmesi önlenmiştir. Şekil 4.7'de akım ölçme kartının fotoğrafı ve kısımları gösterilmektedir.



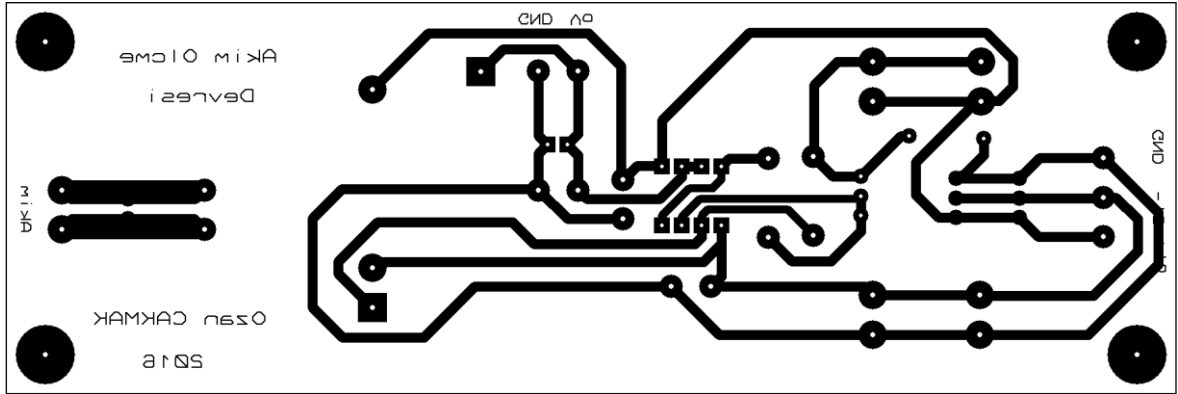
Şekil 4.7. Akım ölçme kartının kısımları

- 1- Ölçme kartı besleme girişleri (± 15 V)
- 2- Ölçülen akımın çıkış ölçüm geriliminin ayarı
- 3- Ölçüm çıkışı
- 4- LEM modül la 55-p
- 5- LEM modül sarımı için aktarım konnektörü
- 6- Akım girişi

Şekil 4.8'de devrenin Proteus programına çizilen PCB ön ve arka görünüşleri verilmiştir.



(a)

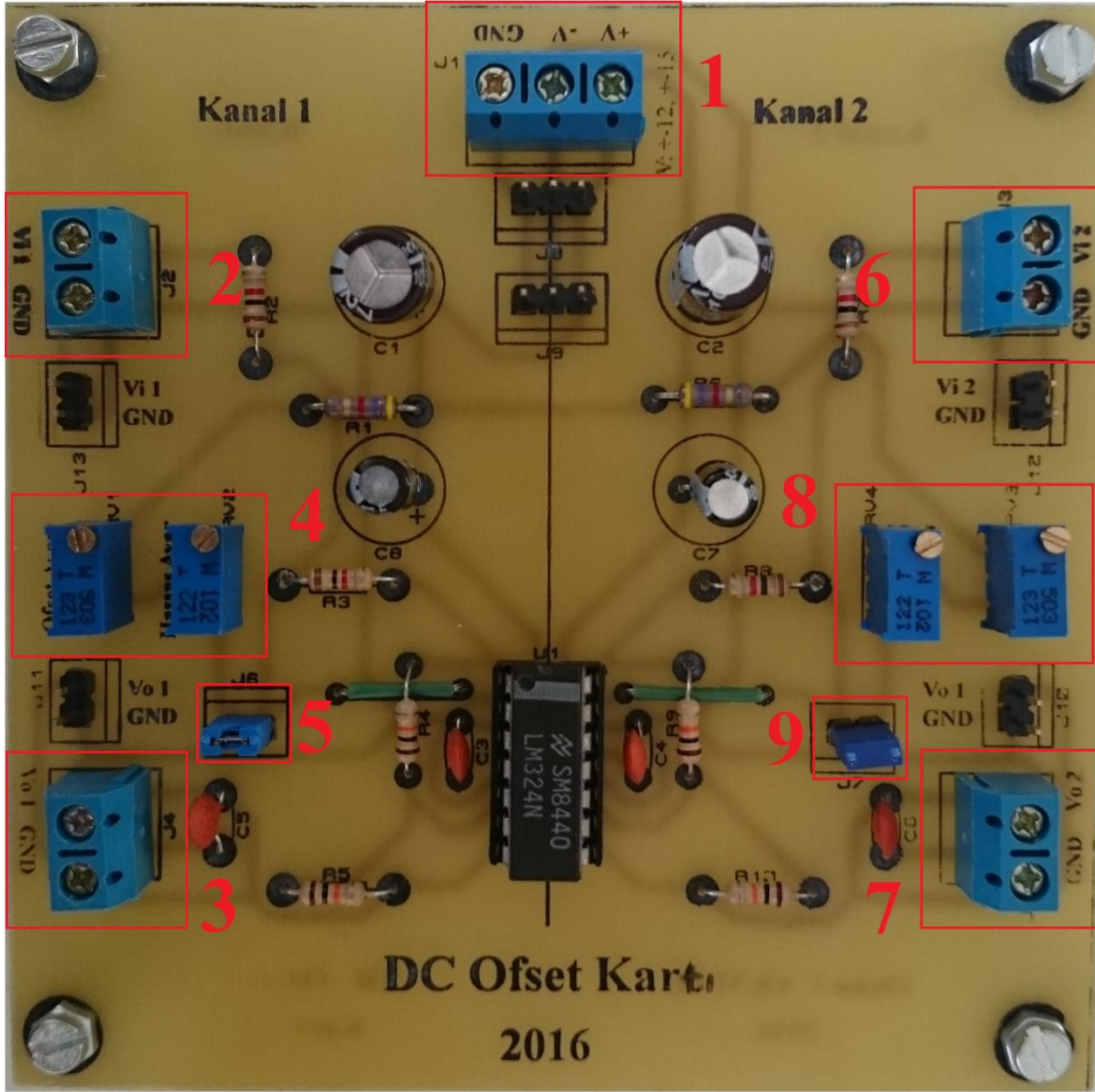


(b)

Şekil 4.8. a) Akım ölçme kartı PCB ön yüz b) Akım ölçme kartı PCB arka yüz

4.1.6.2. DC Offset Kartı

Adım motoru bipolar olarak sürüldüğü için fazlardan her iki yönde de akım akmaktadır. Bu akım LEM modüllü akım ölçme devresi yardımı ile ölçülmektedir. Fakat sistemde kontrolör olarak kullanılan Arduino mikrokontrolör kartı ile negatif gerilimler ölçülemediği için bu negatif gerilimin pozitif olarak yorumlanması gerekmektedir. Bu noktada kullanılabilecek yöntemlerden biri olan doğrultucu devrelerde, diyot üzerinde gerilim düşümü olacağı için ölçümde bir hata oluşacak ve uygun olmayacaktır. Bu nedenle OPAMP'lı devre tercih edilmiştir. Fakat negatif alternansın OPAMP ile ters çevrilmesi aynı zamanda pozitif alternansı da negatif yapacağı için ters çevirme işlemi yapılmamaktadır. Çözüm olarak akım ölçme devresinden gelen sinyale bir DC gerilim eklenerek, negatif gerilim seviyesi pozitif bölgeye çekilmiştir. Bu nedenle akımın sıfır anındaki ölçüm gerilimi, LEM modülün ideal olduğunu varsayarsak, bindirilen DC gerilimin değerine eşit olur. Şekil 4.9'da tasarlanan DC gerilim bindirici devresinin devre şeması verilmiştir.

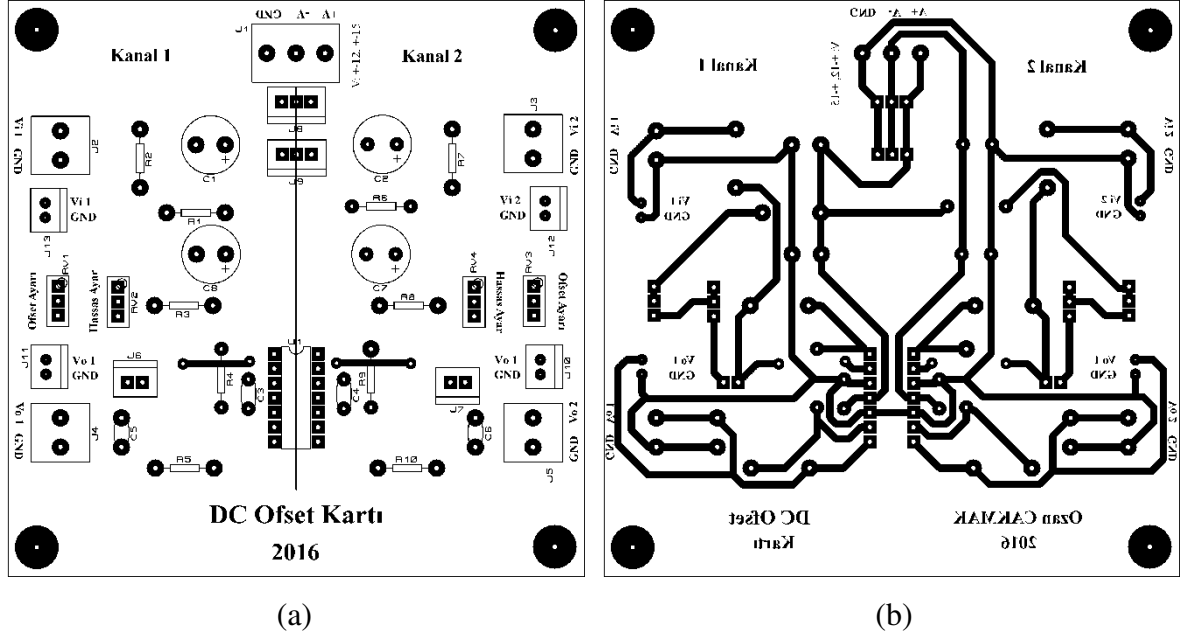


Şekil 4.10. DC offset ekleme kartı kısımları

- 1- DC offset kartı besleme girişleri: Minimum: ± 1.5 V Maksimum: ± 16 V
- 2- Kanal 1 giriş sinyali: DC gerilim eklenecek sinyal girişi
- 3- Kanal 1 çıkış sinyali: DC gerilim eklenmiş sinyal çıkışı
- 4- Kanal 1 DC offset ayarı: Eklenecek DC gerilim değeri ayarı
- 5- Kanal 1 offset ekleme jumper'ı: DC gerilim eklemek için bu pinlerin kısa devre olmalıdır. Bu pinler açık devre ise giriş sinyali doğrudan çıkış sinyalidir.
- 6- Kanal 2 giriş sinyali: DC gerilim eklenecek sinyal girişi
- 7- Kanal 2 çıkış sinyali: DC gerilim eklenmiş sinyal çıkışı
- 8- Kanal 2 DC offset ayarı: Eklenecek DC gerilim değeri ayarı
- 9- Kanal 2 offset ekleme jumper'ı: DC gerilim eklemek için bu pinlerin kısa devre olmalıdır. Bu pinler açık devre ise giriş sinyali doğrudan çıkış sinyalidir.

$$\text{Eklencek DC gerilimin maksimum değeri} = \frac{+V}{4,7}$$

$$\text{Eklencek DC gerilimin minimum değeri} = \frac{+V}{55,7}$$



Şekil 4.11. a) DC offset kartı PCB ön yüz b) DC offset kartı PCB arka yüz

4.2. Kurulan Sistem

4.2.1. Sistemin Tanımı

Tasarlanan bu sistemde bir hibrit adım motorunun mikroadım tekniği ile kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kullanılan adım motoru bipolar sargı yapısındadır ve motor sürme devresi olarak bir akım kısıyıcı kullanılmıştır. Akım kısıyıcı sürme devresinde kullanılan H-köprü sürücü, Pololu firmasına ait üzerinde iki adet H-Köprü sürücü bulunduran Arduino uyumlu MC33926 entegreli sürücü kartıdır. İki adet sürücü kullanılmasının nedeni adım motorunun her iki sargısı içinde birer tane H-Köprü sürücüye ihtiyaç duyulmasıdır.

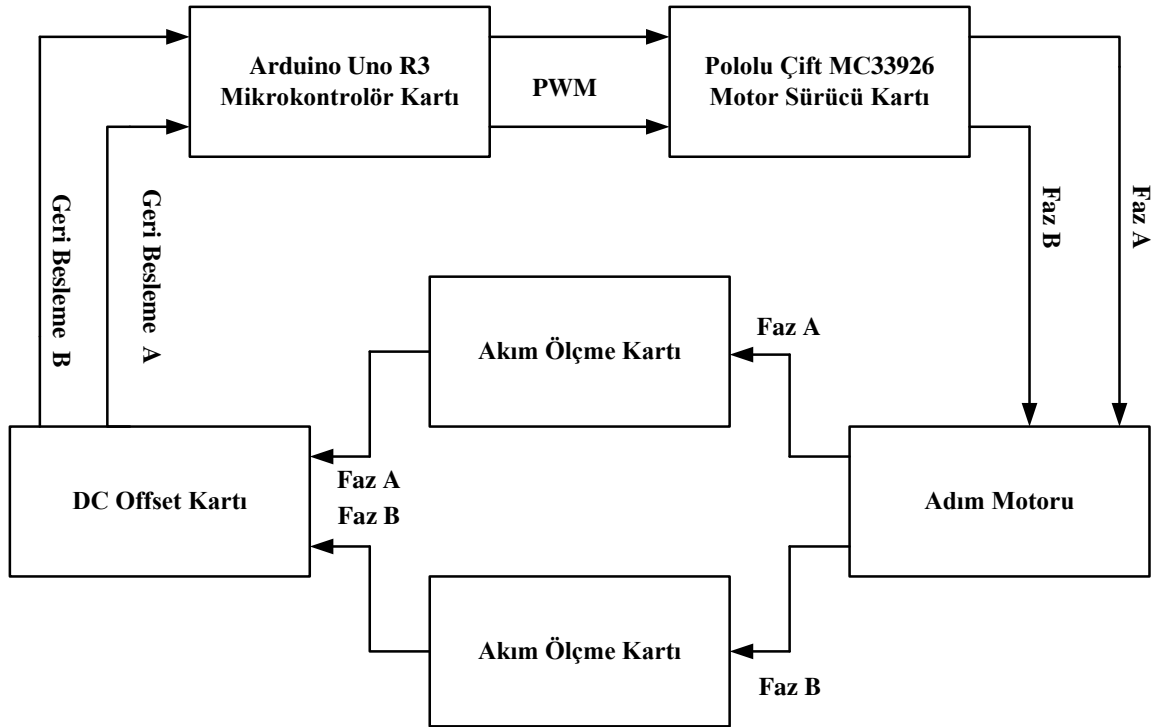
Sistemin genel çalışma mantığı şöyledir;

Arduino mikrokontrolör kartına kullanıcı tarafından girilen adım bölme oranı ve motorun nominal akımına göre, iki fazında her bir mikro adımdaki akım değerlerini hesaplayarak fazlardan ölçülen akım karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda her bir faz için uygun PWM üretilmesi sağlanır.

Sistemin donanımları;

- 1- 42STH47-1206a hibrit adım motoru
- 2- Arduino Uno R3
- 3- Pololu MC33926 çift motor sürücü kartı
- 4- LEM modüllü akım ölçme kartı
- 5- Offset devre kartı
- 6- DC güç kaynağı
- 7- ± 12 V Simetrik güç kaynağı

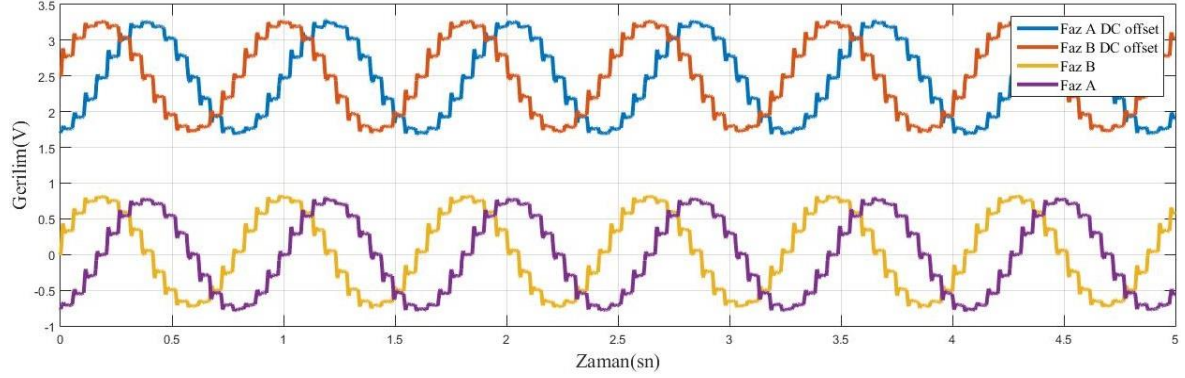
Şekil 4.12’de sisteme ait blok diyagramında görüldüğü gibi sistemde iki tane akım ölçme kartı bulunmaktadır. Bu kartlar her bir fazdaki akım bilgisine karşılık bir geri besleme gerilimi üreterek DC offset kartına uygulamaktadır. Fazlardaki pozitif ve negatif alternansa sahip olan akım bilgisinin geri besleme geriliminin pozitif bölgeye çekilmesi için iki kanallı bir DC offset kartı tasarlanmıştır. DC offset kartı ile geri besleme gerilimine istenen gerilim değeri eklenmektedir, böylelikle Arduino mikrokontrolörüne pozitif bir geri besleme gerilimi sağlanmaktadır.



Şekil 4.12. Sistemin blok diyagramı

4.2.2. Akım Ölçme Kartı ve DC Offset Kartından Elde Edilen Sinyaller

Adım motorunun faz akımlarının ölçme kartı ve DC offset kartı çıkışından elde edilen grafikleri şekil 4.13'te verilmiştir. A fazındaki akımın 'Faz A' ile gösterilen ölçme kartı çıkış gerilimi ile 'Faz A DC offset' ile gösterilen DC offset devresi çıkış gerilimi grafiği arasında 2.5 V'luk bir gerilim farkı bulunmaktadır.



Şekil 4.13. A ve B faz akımlarının ölçme kartı ve DC offset kartı çıkışlarındaki gerilimlerinin grafiği

4.2.3. Sistemin Kontrol Algoritması ve Yazılımı

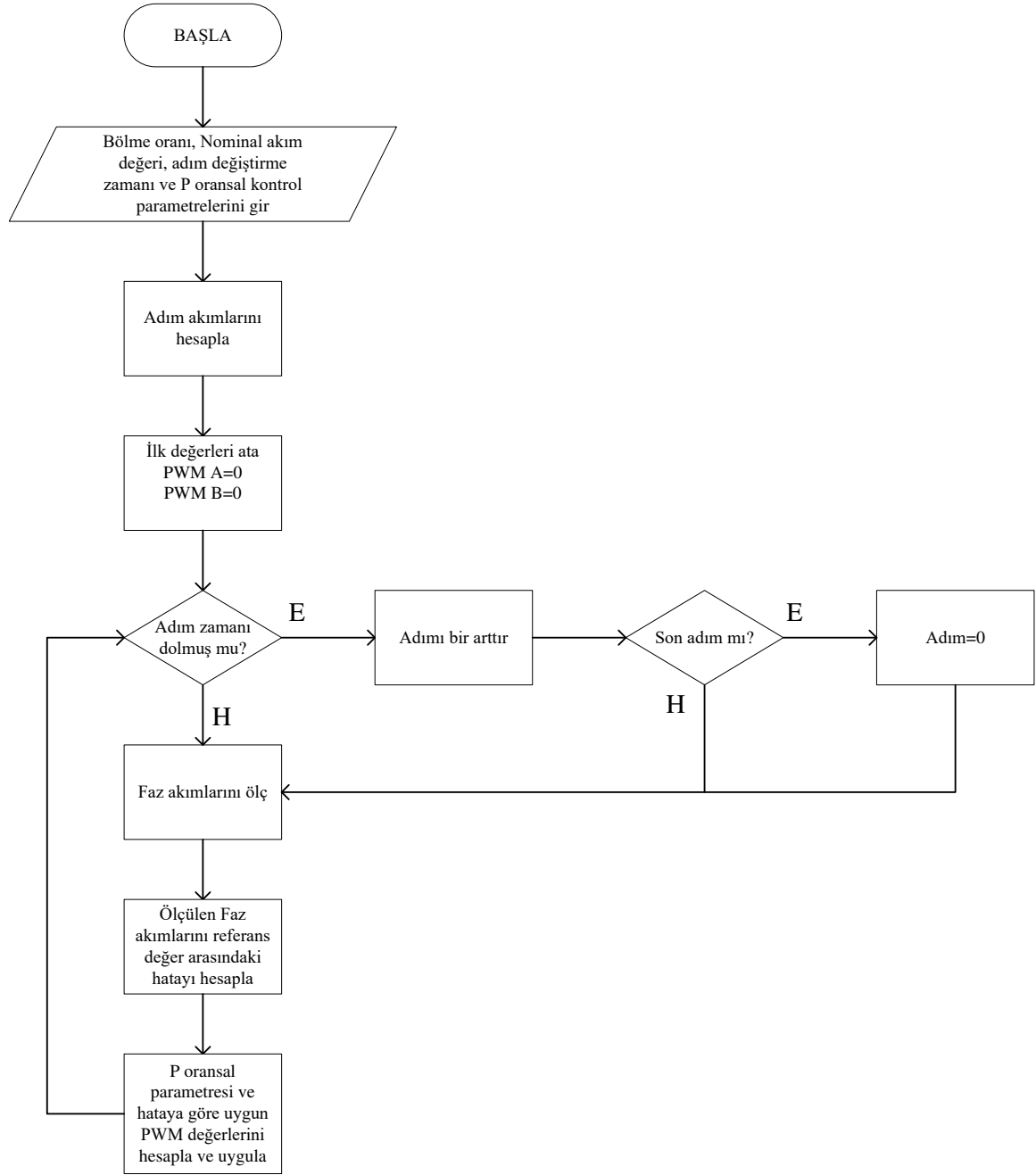
Sistemin kontrolü Arduino mikrokontrolör kartı ile yapılmıştır. Arduino ile iki analog girişten ölçülen akım geri besleme değerlerine göre iki tane PWM çıkışından MC33926 sürücü kartı ile fazlar için gerekli akım sağlanmaktadır. Akım geri besleme değeri fazda ölçülen akımın sayısal olarak 2 katı ve 2.5 V DC bindirilmiş gerilim değeridir. Bu nedenle yazılım ile ölçülen gerilim denklem 4.1 ile hesaplanır.

$$I_{gb} = \frac{V_{gb}}{2} - 2.5 \quad (4.1)$$

Arduino'daki analog pin 10 bitlik ölçüm yapar. Geri besleme gerilimi denklem 4.2 ile hesaplanır.

$$V_{gb} = \frac{A_{digital} * 5}{1023} \quad (4.2)$$

Şekil 4.14'te sistemin kontrolüne ait yazılımın akış diyagramı verilmiştir. Sistemin kontrolü için hazırlanan Arduino programı ise EK-3 de verilmiştir.



Şekil 4.14. Sistemin kontrol yazılımına ait akış diyagramı

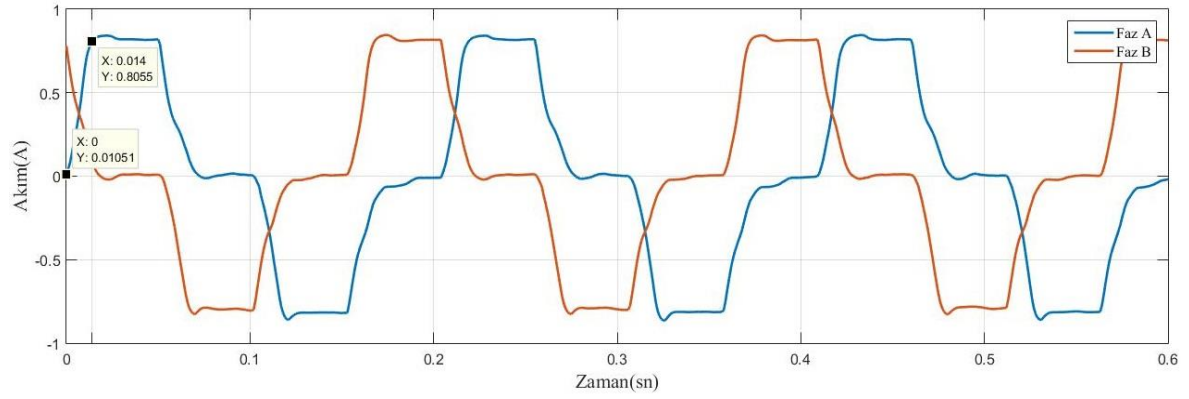
4.3. DeneySEL Sonuçlar

Sistemde farklı giriş gerilimleri ve bölme oranlarına göre değerler alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca farklı geri besleme kazancına göre yükselme zamanları incelenmiştir.

Akım sinyalleri DAQ kartı ile alınarak MATLAB ortamında grafikler çizdirilmiştir.

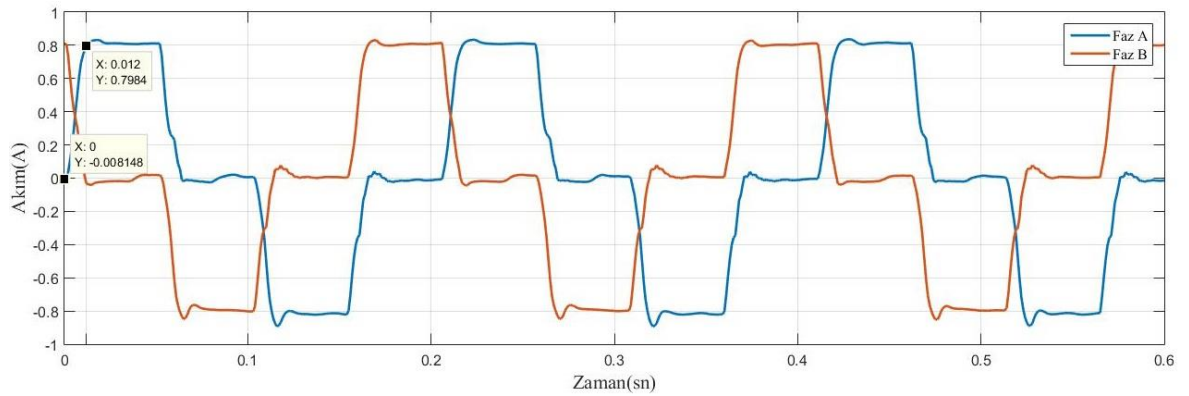
4.3.1. Yükselme Zamanının İncelenmesi

Sistemde maksimum faz akımı 800 mA ve her bir adım aralığı 50 ms sabit olmak üzere tam adım sürme yönteminde farklı oransal kontrol parametrelerine ve besleme gerilimine göre yükselme zamanları incelenmektedir.



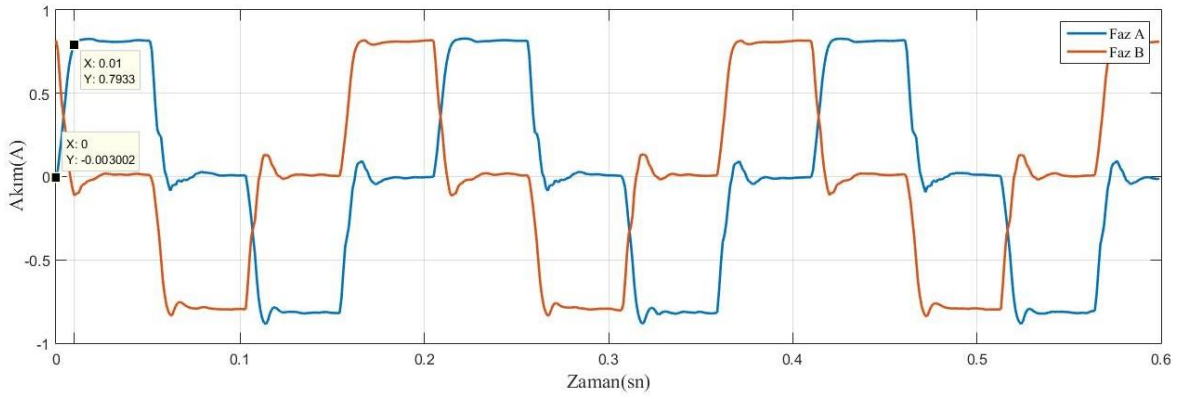
Şekil 4.15. Kaynak gerilimi 6.5 V ve $K_p=0.1$ durumunda tam adım sürme yöntemi faz akımı-zaman grafiği

Şekil 4.15'te kaynak 6.5 V ve K_p değeri 0.1 olması durumunda A fazı akımının yükselme zamanı gösterilmiştir. Akımın 800 mA değerine yükselmesi 14 ms'de gerçekleşmiştir.



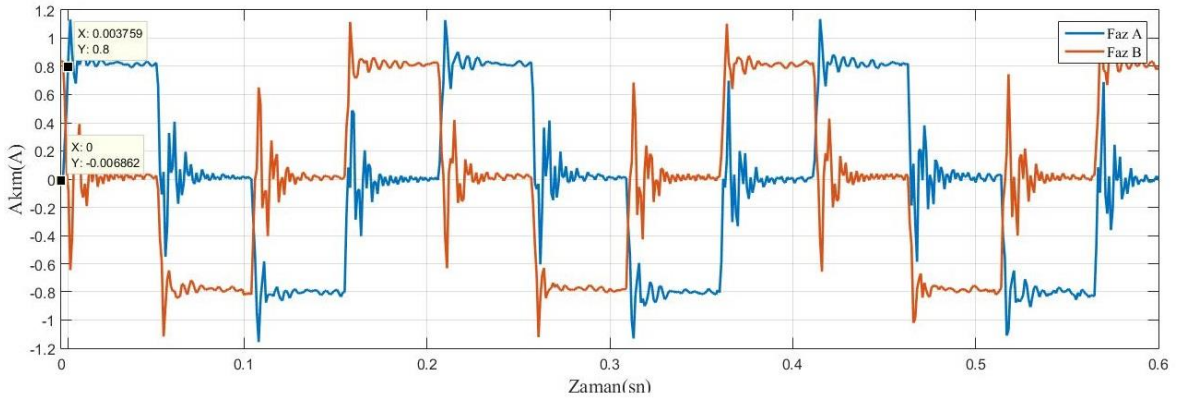
Şekil 4.16. Kaynak gerilimi 6.5 V ve $K_p=0.2$ durumunda tam adım sürme yöntemi faz akımı-zaman grafiği

Şekil 4.16'da kaynak 6.5 V ve K_p değeri 0.2 olması durumunda A fazı akımının yükselme zamanı gösterilmiştir. Akımın 800 mA değerine yükselmesi 12 ms'de gerçekleşmiştir.



Şekil 4.17. Kaynak gerilimi 6.5 V ve $K_p=0.3$ durumunda tam adım sürme yöntemi faz akımı-zaman grafiği

Şekil 4.17’de kaynak 6.5 V ve K_p değeri 0.3 olması durumunda A fazı akımının yükselme zamanı gösterilmiştir. Akımın 800 mA değerine yükselmesi 10 ms’de gerçekleşmiştir.



Şekil 4.18. Kaynak gerilimi 12 V ve $K_p=0.1$ durumunda tam adım sürme yöntemi faz akımı-zaman grafiği

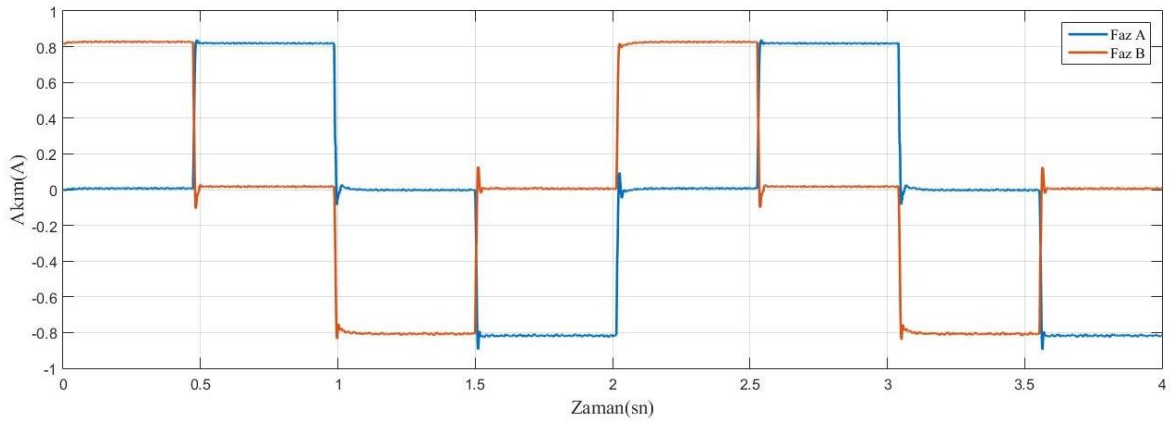
Şekil 4.18’de kaynak 12 V ve K_p değeri 0.3 olması durumunda A fazı akımının yükselme zamanı gösterilmiştir. Akımın 800 mA değerine yükselmesi 3.76 ms’de gerçekleşmiştir.

Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17’de kaynak gerilimi sabit olacak şekilde K_p değerinin artışına göre yükselme zamanının nasıl arttığı incelenmektedir. K_p değeri arttıkça yükselme zamanı düşerek sistem daha hızlı cevap vermektedir. Şekil 4.15 ve 4.18 karşılaştırıldığında ise sabit K_p değerine karşılık kaynak geriliminin artması ile yükselme zamanının düştüğünü ve sistemin çok hızlı cevap verdiği gözlenmiştir. Özellikle kaynak geriliminin artırılmasının sistem cevap hızına olumlu yönde etkisinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle adım motoru sürme yöntemleri de kaynak geriliminin artırılarak akımın hızlı yükselmesine dayanmaktadır. Özellikle sistemde de kullanılmakta olan akım kısıyıcı sürme yöntemi en etkin yöntemdir. Bunun nedeni ise akım kontrolü yapılarak kaynak geriliminden bağımsız bir

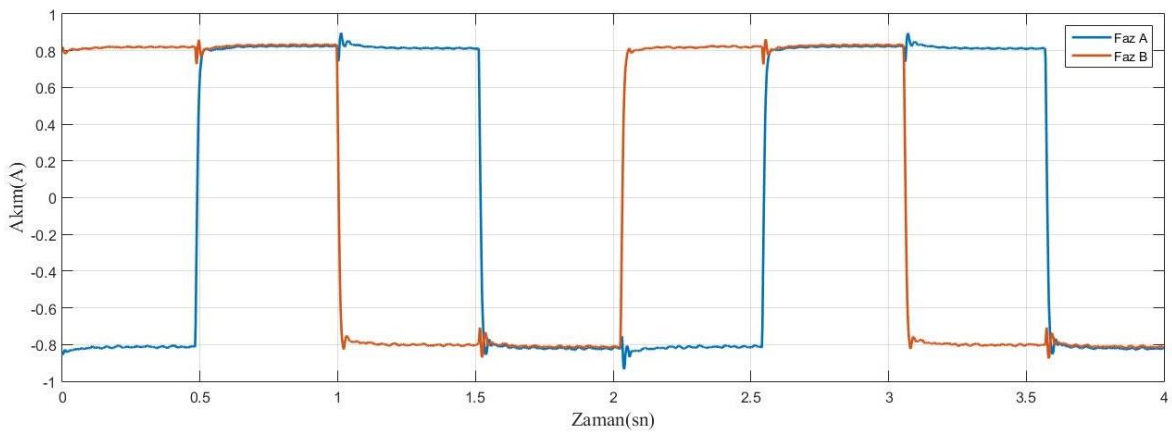
şekilde adım motorunun sürülmesidir. Böylelikle kaynak gerilimi yüksek olsa dahi sürücü tarafından akım değeri sabit tutulduğu için hem motor nominal değerlerinde sürülmektedir hem de akımın hızlı yükselmesi sağlanmaktadır.

4.3.2. Motor Hızının Sabit Olduğu Durumda Faz Akımlarının Farklı Adım Bölme Oranına Göre İncelenmesi

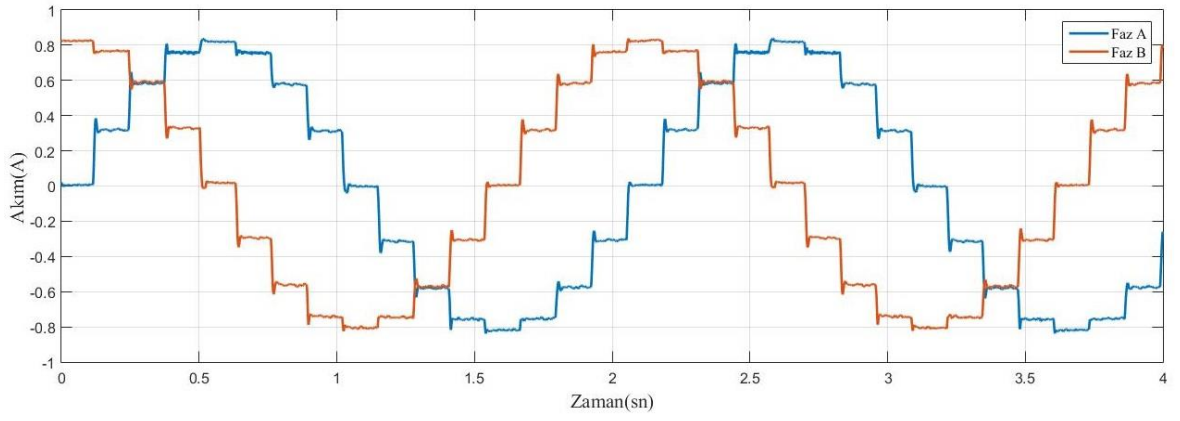
Bu kısımda motorun mikroadımlama tekniği ile farklı bölme adımlarına göre faz akımları incelenmiştir. Maksimum faz akımı 800 mA, K_p 0.3, elektriksel bir tur 512 ms ve kaynak gerilimi 6.5 V olduğu durumda sırasıyla tam adım, yarım adım, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 bölme oranlarına göre faz akım grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24'te bu grafikler verilmiştir.



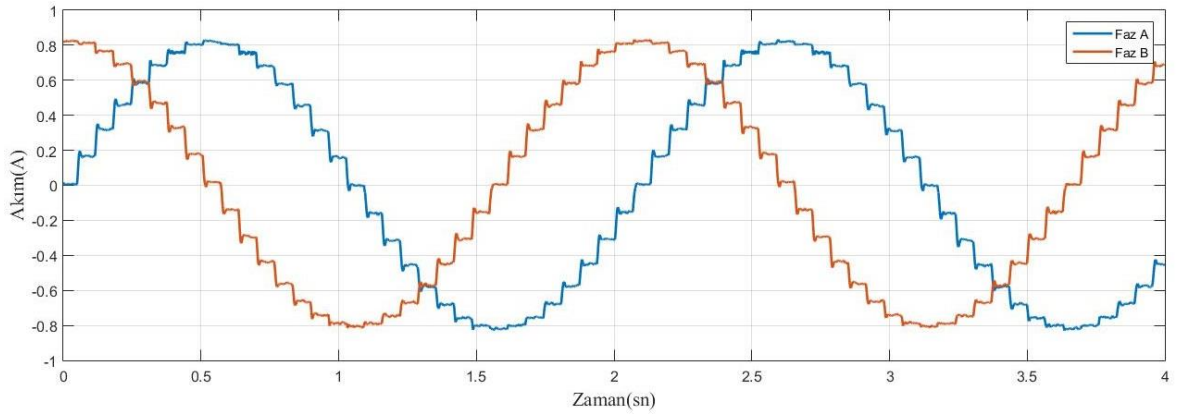
Şekil 4.19. Tam adım sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği



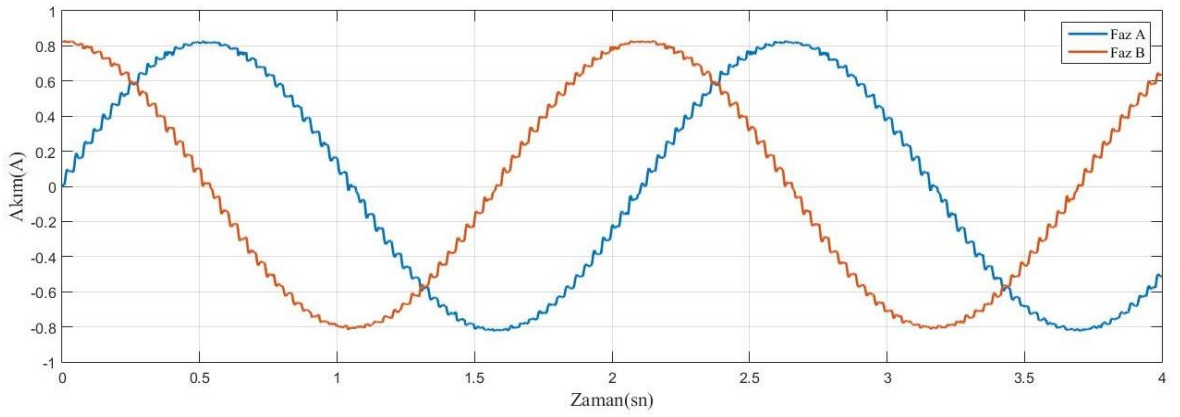
Şekil 4.20. Yarım adım sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği



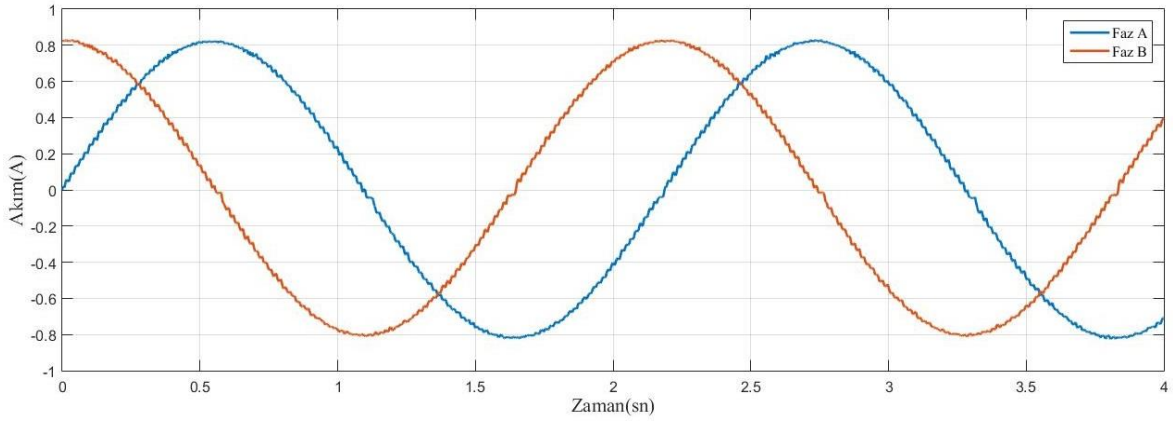
Şekil 4.21. 1/4 adım bölme oranında sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği



Şekil 4.22. 1/8 adım bölme oranında sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği



Şekil 4.23. 1/16 adım bölme oranında sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği



Şekil 4.24. 1/32 adım bölme oranında sürme durumunda faz akımı-zaman grafiği

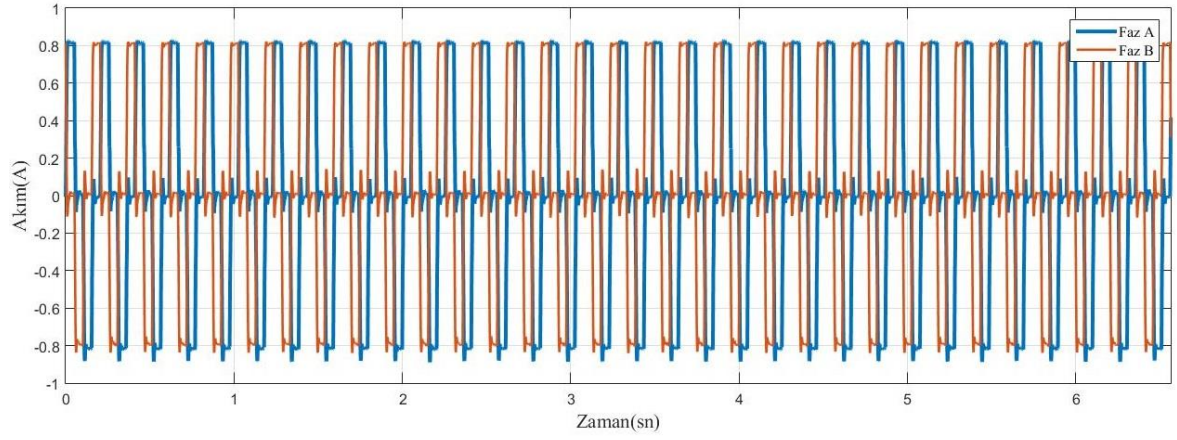
Farklı adım bölme oranlarına göre eşit hızda alınan faz akım sinyal grafiklerinde, adım sayısı arttıkça sinyalin sinüse yaklaştığı görülmektedir. Şekil 4.19’da tam adım sürme yönteminde görüldüğü gibi, motorun fazına akım uygulanmadığı veya uygulanan akımın bir süre sabit kaldığı anlar mevcuttur. Bu durumlarda rotorda sabit konumda durma meydana gelir. Adım bölme oranı arttıkça rotorun duraksadığı sürelerin kısaldığı ayrıca dönme açısı olarak düşük miktarda ve daha fazla adım atıldığı görülmektedir. Bu şekilde aynı hıza sahip dönme olaylarında rotor daha az sarsıntılı olarak yumuşak bir dönüş meydana getirmektedir. Adım motorlarının dönme anındaki titreşimleri şekil 4.24’te verilen grafikteki gibi 1/32 adımda çok düşük seviyeye inmektedir ve rotor sanki sürekli dönen bir motor gibi hareket etmektedir. Bu durum hem daha hassas açılı hem de daha az titreşimli bir dönüş olanağı sağlamaktadır.

Şekil 4.19’da bir elektriksel tam turu dört adımda tamamlarken şekil 4.24’te 128 adımda tamamlamaktadır. 1/32 bölme adımında 1 adım dönüş için gereken adım sinyali sayısı tam adımda sürülen bir adım motorunun 32 katıdır. Bu nedenle daha yüksek frekanslı bir sinyal uygulamak gerekmektedir ve bölme oranı arttıkça adım motorunun yüksek hızlarda sürülmesi zorlaşmaktadır.

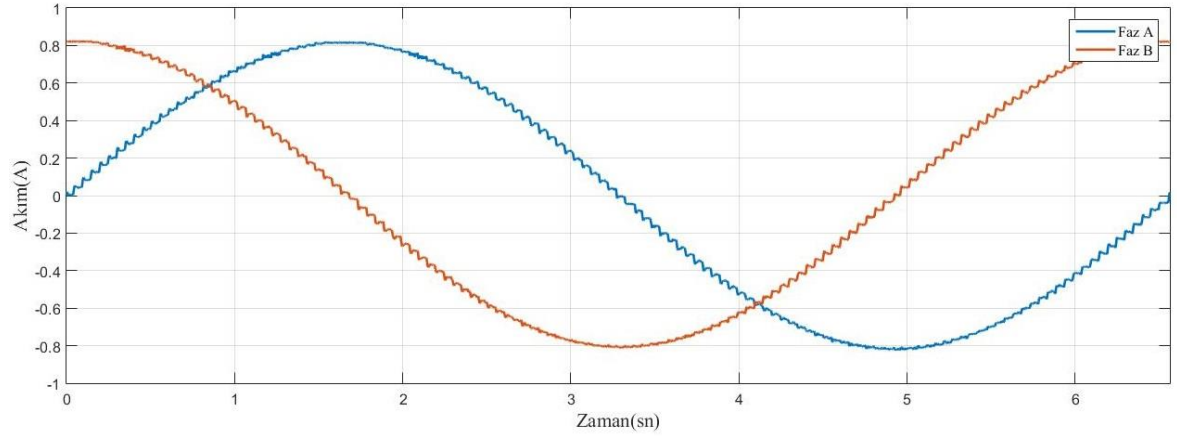
4.3.3. Eşit Zaman Aralıklarla Gönderilen Adım Sinyalinin Farklı Adım Bölme Oranlarına Göre Karşılaştırılması

Adım motorunun şekil 4.25’te tam adıma ve şekil 4.26’da 1/32 bölme oranına sahip her bir adım arası 50 ms olan faz akımının grafikleri verilmiştir. Şekil 4.25’te motorun 128 adım attığı görülürken şekil 4.26’da motorun dört adım attığı görülmektedir. Dolayısıyla

adım bölme oranı arttıkça aynı hızı yakalayabilmek için her bir adım sinyalinin arasındaki süre daha kısa olmalıdır.



Şekil 4.25. Tam adım ve 50 ms'lik aralıklarla adım sinyali durumunda faz akımı-zaman grafiği



Şekil 4.26. 1/32 adım bölme oranında ve 50 ms'lik aralıklarla adım sinyali durumunda faz akımı-zaman grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan çalışmada hibrit bir adım motorunun göre mikroadım tekniği ile farklı bölme oranlarına sürülerek faz akım grafikleri elde edilip sonuçlar yorumlanmıştır. Mikroadımlar akım kontrollü bir sistem tasarlanarak üretilmiştir. Mikrokontrolör olarak Arduino Uno kart ve fazların sürülmesi için iki adet dört bölgeli DC motor sürücü içeren MC33926 entegresi kullanılmıştır. Akım ölçme işlemi LEM modül ile yapılarak sinyalin pozitif bölgeye çekilmesi tasarlanan bir DC offset kartı ile sağlanmıştır.

Tam, yarım, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 adımlar ile farklı oransal kontrol parametresi ve farklı kaynak gerilim seviyelerine göre motor sürülmüştür. Bunlar sonucunda elde edilen fazların akım sinyalleri DAQ kartı ile bilgisayar ortamına aktarılarak MATLAB yardımı grafikleri elde edilmiştir.

Adım motorunun adım cevabı farklı oransal kontrol parametrelerine göre değişimi elde edilen grafiklerden incelenmiştir. Oransal kazanç arttıkça adım cevabının hızlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Motor, akım kontrolü ile sürüldüğü için farklı giriş gerilimlerinde dahi nominal değerde sürülebilmektedir. Giriş geriliminin artması akımın hızlı yükselmesini sağlayacağı için yükselme zamanını da olumlu yönde etkilediği elde edilen grafikler ile ortaya konulmuştur.

Sabit hızda farklı bölme oranlarına göre akım grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerden yola çıkarak adım motoru için bir dezavantaj olan titreşimlerin bölme oranı arttıkça azaldığı tespitine ulaşılmıştır. Fakat bölme oranının arttıkça ile sabit hızın sağlanması için adım sinyallerinin de frekansının artması gerektiği için yüksek hızlara çıkılmasının daha zorlaştığı sonucuna varılmıştır. Buna bağlı olarak sabit frekansta adım sinyali ile düşük bölme oranlarında daha hızlı bir dönüş gerçekleştiği ortaya konulmuştur.

5.2. Öneriler

Kurulan sistemde akım kontrolü, akımın ölçülerek Arduino uno mikrokontrolör kartında yazılımsal olarak referans değer karşılaştırması ile bir PWM değeri üretilerek yapılmaktadır. Bu durumda adım motoru dönme hızı da mikrokontrolör saat frekansı ile

kısıtlanmaktadır. Bu nedenle sistem düşük hızlarda dönmektedir. Daha yüksek hız gerektiren uygulamalarda, saat frekansı yüksek bir mikrokontrolör seçilmesi veya karşılaştırma işleminin bir OPAMP ile yapılması tercih edilebilir.

Son kısıtlama ise ADC'nin çözünürlüğü ile alakalıdır. Sistemde kullanılan maksimum 1/32 bölme oranı için kullanılan ADC çözünürlüğü yeterli olmaktadır fakat daha yüksek adımlama oranlarına çıkabilmek için ADC çözünürlüğünün daha fazla olması gerekebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Akdoğan, E., Çelik, H.** 2003. PIC İşlemci Denetimli Adım Motor Mikroadım Sürücü. *3. Uluslararası İleri Teknoloji Sempozyumu*, (s. 59-65). Ankara.
- [2] **Shi, R., & Luo, J.** 2011. Stepper Motor Drive Control Based on MCU. *2011 International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (CASE)*, 1–3
- [3] **Yeadon, W., H., Yeadon, A., W.** 2001. The Handbook of Small Electric Motors, McGraw-Hill Education, USA
- [4] **Wu, A., Fu, Q., Li, Y.** 2011. Development of Multi-Axis Stepper Motion Control System Based on Nois II. *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference on* (s. 1230-1232). IEEE.
- [5] **Emilia, M., Tostes, D. L.** 2013. Stepper Motor Drive for Computer Numerical Control Machines Paulo Augusto Sherring da Rocha Junior , Maria Emilia de Lima Tostes, 909–914.,
- [6] **Wen, Z., Chen, W., Xu, Z., Wang, J.** 2007. Analysis of Two-Phase Stepper Motor Driver Based on FPGA. *2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN'06, 0*, 821–826.
- [7] **Apaydın, H.**, 2006. Adım Motorlarının Karakteristikleri ve Bilgisayar ile Konum Kontrolü Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Özel, N.**, 2006. Doğru Akım Motoru ve Step Motorun Mikroişlemci Yardımıyla Senkronizasyonu ve Bobin Sarma Makinesine Uyarlanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [9] **Yılmaz, M.**, 2012. Güneş Paneli ile Beslenen Step Motorun PIC Mikrodenetleyici ile Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi* Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [10] **Abedini, M.**, 2014. Labview ile Adım Motoru Hız Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] **Ghafari, A. S., Alasty, A.** 2004. Design and Real-Time Experimental Implementation of Gain Scheduling PID Fuzzy Controller for Hybrid Stepper Motor in Micro-Step Operation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, ICM '04.*, 421–426.

- [12] **Karthi, A., Paranjothi, S. R., Solaimanohar, S.,** 2013. Implementation of Digital Micro-Step Driver for Five-Phase Hybrid Stepper Motor Using Digital Signal Controller. *2013 International Conference on Information Communication and Embedded Systems, ICICES 2013*, (1), 929–932.
- [13] **Akdoğan, E., Topuz, V., Akbaş, A.,** 2004. An Education Tool Study on Mechatronics: Emulation of Stepper Motor Driving Systems By Using A Microcontroller Based System Interface. *ICM '04. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics*. pp. 509-512.
- [14] **Gouid, G. G. N., Nasser, A. A. A., Mostafa, M. Z., El-Hennawi, D. M.,** 2014. Position Control of Head and Neck Swellings Resection Operation Using Artificial Neural Networks. *2014 IEEE Conference on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology*, 1–6.
- [15] **Morar, A.** 2015. The Modelling and Simulation of Bipolar Hybrid Stepping Motor by Matlab/Simulink. *Procedia Technology*, 19, 576–583.
- [16] **James, D., Michael, P. A., Varghese, R., Joseph, J.,** 2011. FPGA Based Microstepping Controller Of A Four Phase Permanent Magnet Stepper Motor. *International Journal of Micro and Nano Electronics, Circuit and Systems*, 3(1), 39–42.
- [17] **Hasanien, H. M.** 2011. FPGA Implementation of Adaptive ANN Controller for Speed Regulation of Permanent Magnet Stepper Motor Drives. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1252–1257.
- [18] **Feng, D., Yan, L., Xu, L., Li, W.** 2011. Implement of Digital PID Controller Based on FPGA and the System Co-simulation. *2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, 921–924.
- [19] **Xiaodong, Z., Junjun, H., Chunlei, S.** 2005. An Approach of Micro-Stepping Control for the Step Motors Based on FPGA. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2005*, pp. 125–130.
- [20] **Acarnley, P.,** 2002. Stepping Motors a Guide to Theory and Practice 4th Edition, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- [21] **De Silva, C.,** 2005. Mechatronics, CRC Press LLC, USA.
- [22] **Wu, A., Fu, Q., & Li, Y.** 2011. Development of Multi-Axis Stepper Motion Control System Based on Nois II. *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference on* (s. 1230-1232). IEEE.

- [23] **Zhang, R., Wang, X., Yang, Y., Qiao, D.** 2008. Design of Two-Phase Hybrid Stepping Motor Driver with Current Closed-Loop Control Based on PIC18F2331. *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2998–3001.
- [24] **Ruilope, R., P.** 2014. Modeling and Control of Stepper Motor for High Accuracy Positioning Systems Used in Radioactive Environments, Madrid, İspanya.
- [25] **Khalilian, M., Abedi, A., Zadeh, A. D.** 2012. Sensorless Direct Torque Control of Hybrid Stepper Motor Based on MRAS. *Energy Procedia*, 14(2011), 1992–1997.
- [26] **Elsodany, N. M., Rezeka, S. F., Maharem, N. A.** 2011. Adaptive PID Control of a Stepper Motor Driving a Flexible Rotor. *Alexandria Engineering Journal*, 50(2), 127–136.
- [27] **Ghafari, A. S., Behzad, M.** 2005. Investigation of the Micro-Step Control Positioning System Performance Affected by Random Input Signals. *Mechatronics*, 15(10), 1175–1189.
- [28] **Ghafari, a. S., Vossoughi, G. R.** 2004. Simulation and Experimental Study of Real-Time Robust Control of Hybrid Stepper Motor with QFT Method in Micro-Step Operation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, 2004. ICM '04.*, 364–368.
- [29] **Atabay Y., E.,** 2007. Geri Beslemeyle Doğrusallaştırma Yönteminin Sürekli Mıknatıslı Adım Motoru Denetiminde Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [30] **Bal, G.,** 2006. Özel Elektrik Makinaları. Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [31] Step Motor ve Sürülmesi. 2011. Ankara: T.C Milli Eğitim Bakanlığı.
- [32] http://www.zaber.com/applications/technotes_documents/microstepping_tutorial.pdf.
- [33] **Herman, S. L.** 2005. *Industrial Motor Control*. Newyork: Thomson Delmar Learning.
- [34] **Wale, J. D., Pollock, C.** 2001. Hybrid Stepping Motors and Drivers. *PowerEngineering Journal* (s. 5-12). IET.
- [35] <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/StepperMicrostep>.
- [36] **Lee, D. H., Che, W., Ahn, J. W.** 2010. Micro-Step Position Control with a Simple Voltage Controller Using Low-Cost Micro-Processor. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, (2), 1378–1382.

- [37] **Astarloa, A., Bidarte, U., Zuloaga, A.** 2003. Reconfigurable Microstepping Control of Stepper Motors Using FPGA embedded RAM. *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference* (s. 2221-2226). IEEE.
- [38] Stepper Motor Microstepping with PIC18C452. 2002. Microchip Technology Inc.
- [39] **Xi, J., Liao, G., Yang, W.** 2010. Study of Stepping Motor Subdivision Driver. *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2010, 3*, 443–446.
- [40] MC33926 Datasheet
- [41] Pololu MC33926 Datasheet

EKLER

Ek 1. LEM la 55-p Teknik Bilgileri



Current Transducer LA 55-P/SP1

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



16024

Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	50	A																								
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 100	A																								
R_M	Measuring resistance	<table><tr><th colspan="2">$T_A = 70^\circ\text{C}$</th><th colspan="2">$T_A = 85^\circ\text{C}$</th></tr><tr><th>$R_{M \min}$</th><th>$R_{M \max}$</th><th>$R_{M \min}$</th><th>$R_{M \max}$</th></tr><tr><td>0</td><td>215</td><td>0</td><td>210</td></tr><tr><td>0</td><td>35</td><td>0</td><td>30</td></tr><tr><td>0</td><td>335</td><td>30</td><td>330</td></tr><tr><td>0</td><td>95</td><td>30</td><td>90</td></tr></table> Ω		$T_A = 70^\circ\text{C}$		$T_A = 85^\circ\text{C}$		$R_{M \min}$	$R_{M \max}$	$R_{M \min}$	$R_{M \max}$	0	215	0	210	0	35	0	30	0	335	30	330	0	95	30	90
$T_A = 70^\circ\text{C}$		$T_A = 85^\circ\text{C}$																									
$R_{M \min}$	$R_{M \max}$	$R_{M \min}$	$R_{M \max}$																								
0	215	0	210																								
0	35	0	30																								
0	335	30	330																								
0	95	30	90																								
	with $\pm 12\text{ V}$	@ $\pm 50\text{ A}_{\max}$																									
		@ $\pm 100\text{ A}_{\max}$																									
	with $\pm 15\text{ V}$	@ $\pm 50\text{ A}_{\max}$																									
		@ $\pm 100\text{ A}_{\max}$																									
I_{SN}	Secondary nominal current rms	25	mA																								
K_N	Conversion ratio	1 : 2000																									
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	$\pm 12 \dots 15$	V																								
I_C	Current consumption	10 (@ $\pm 15\text{ V}$) + I_S	mA																								

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 15\text{ V}$ ($\pm 5\%$)	± 0.65	%
		@ $\pm 12 \dots 15\text{ V}$ ($\pm 5\%$)	± 0.90	%
ε_L	Linearity error		< 0.15	%
I_O	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		Typ	Max
I_{OM}	Magnetic offset current ¹⁾ @ $I_p = 0$ and specified R_M after an overload of $3 \times I_{PN}$			± 0.10 mA
I_{OT}	Temperature variation of I_O	- $25^\circ\text{C} \dots + 85^\circ\text{C}$	± 0.05	± 0.30 mA
		- $40^\circ\text{C} \dots + 25^\circ\text{C}$	± 0.10	± 0.50 mA
t_{10}	Reaction time to 10 % of I_{PN} step		< 500	ns
t_1	Response time ²⁾ to 90 % of I_{PN} step		< 1	μs
di/dt	di/dt accurately followed		> 200	A/ μs
BW	Frequency bandwidth (-1 dB)		DC .. 200	kHz

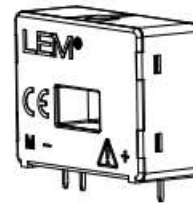
General data

T_A	Ambient operating temperature	-40 .. +85	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	-40 .. +90	$^\circ\text{C}$
R_S	Secondary coil resistance	@ $T_A = 70^\circ\text{C}$	145 Ω
		@ $T_A = 85^\circ\text{C}$	150 Ω
m	Mass	18	g
	Standards	EN 50178: 1997	

Notes: ¹⁾ Result of the coercive field of the magnetic circuit

²⁾ With a di/dt of 100 A/ μs .

$I_{PN} = 50\text{ A}$



Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Special features

- $I_{PM} = 0 \dots \pm 100\text{ A}$
- $K_N = 1 : 2000$.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

Ek 2. 42STH47-1206 Adım Motoru

Preliminary
TECHNICAL DATASHEET

42STH Series 42mm 1.8° High Torque Hybrid Stepping Motor

Technical Specifications:

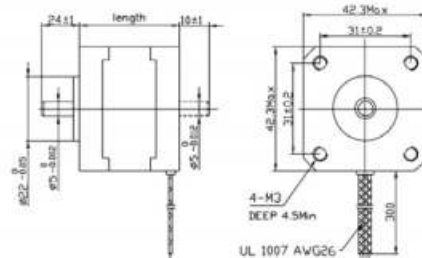
Model No.		Rated Voltage	Current /Phase	Resistance /Phase	Inductance /Phase	Holding Torque	# of Leads	Rotor Inertia	Weight	Detent Torque	Length
Single Shaft	Double Shaft	V	A	Ω	mH	Kg-cm		g-cm ²	kg	g-cm	mm
42STH33-0956A	42STH33-0956B	4	0.95	4.2	2.5	1.6	6	35	0.22	120	34
42STH33-0406A	42STH33-0406B	9.6	0.4	24	15						
42STH33-0316A	42STH33-0316B	12	0.31	38.5	21						
42STH33-1334A	42STH33-1334B	2.8	1.33	2.1	2.5	2.2	4	54	0.28	150	40
42STH38-1206A	42STH38-1206B	4	1.2	3.3	3.2	2.6	6				
42STH38-0806A	42STH38-0806B	6	0.8	7.5	6.7						
42STH38-0406A	42STH38-0406B	12	0.4	30	30						
42STH38-1684A	42STH38-1684B	2.8	1.68	1.65	3.2	3.6	4	68	0.35	200	48
42STH47-1206A	42STH47-1206B	4	1.2	3.3	2.8	3.17	6				
42STH47-0806A	42STH47-0806B	6	0.8	7.5	6.3						
42STH47-0406A	42STH47-0406B	12	0.4	30	25						
42STH47-1684A	42STH47-1684B	2.8	1.68	1.65	2.8	4.4	4				

General Specifications:

Item	Specifications
Step Angle	1.8°
Step Angle Accuracy	±5% (full step, no load)
Resistance Accuracy	±10%
Inductance Accuracy	±20%
Temperature Rise	80°C Max. (rated current, 2 phase on)
Ambient Temperature	-20°C ~ +50°C
Insulation Resistance	100MΩ Min., 500VDC
Dielectric Strength	500VAC for one minute
Shaft Radial Play	0.02 Max. (450g-load)
Shaft Axial Play	0.08 Max. (450g-load)
Max. radial force	28N (20mm from the flange)
Max. axial force	10N
Rotation	CW (facing the front flange)



Dimensional Drawing (mm)



Ek 3. Sistemin Kontrolüne Ait Arduino Yazılımı

```
#include "DualMC33926MotorShield.h"
```

```
DualMC33926MotorShield md;
```

```
//*****DEĞİŞKENLER*****
```

```
const float pi=3.1416;
```

```
float Ia[128]={ }, Ib[128]={ }; //A ve B fazı referans akım değerleri
```

```
float FbIa=0, FbIb=0; //A ve B fazı geribesleme akımları
```

```
int bolmeOrani=8; //Adım bölme oranı
```

```
int maxAkim=1000; //Fazların nominal akımı
```

```
float t=0; //Akım denklemi için
```

```
unsigned long adimSonZamani=0; //Adım arası zamanın son değeri
```

```
int adimZamani=0; //Adımlar arası zaman
```

```
int adim=0; //Adım numarası
```

```
int pwmA=0, pwmB=0; //Fazlara uygulanacak PWM
```

```
float P_A=0, I_A=0, D_A=0; //A fazı P,I,D değişkenleri
```

```
float P_B=0, I_B=0, D_B=0; //B fazı P,I,D değişkenleri
```

```
float PID_A=0, PID_B=0; //A ve B fazı PID değişkeni
```

```
float Kp=0.01, Ki=0, Kd=0; //PID parametreleri
```

```
float errA=0.0, errB=0.0; //Hata değişkenleri
```

```
float errA_son=0, errB_son=0; //Önceki hata değişkenleri
```

```
float Tp=500.0; //Zaman sabiti
```

```
//*****ALT PROGRAMLAR*****
```

```
//*****Sürücü Hata Mesajı*****
```

```
void stopIfFault()
```

```
{
```

```
if (md.getFault())
```

```
{
```

```
Serial.println("fault");
```

```
while(1);
```

```
}
```

```
}
```

```
//*****Parametreleri Girme*****
```

```
void parametreGir()
```

```
{
```

```
    maxAkim=800;
```

```
    bolmeOrani=1;
```

```
    adimZamani=50;
```

```
}
```

```
//*****Akım Değerlerini Hesaplama*****
```

```
void akimHesapla()
```

```
{
```

```
    for(int k=0;k<(bolmeOrani*4);k++)
```

```
    {
```

```
        Ia[k]=maxAkim*sin(t);
```

```
        Ib[k]=maxAkim*cos(t);
```

```
        Serial.print("k:  ");
```

```
        Serial.println(k);
```

```
        Serial.print("Ia:  ");
```

```
        Serial.println(Ia[k]);
```

```
        Serial.print("Ib:  ");
```

```
        Serial.println(Ib[k]);
```

```
        Serial.println("");
```

```
        t=t+(((2*pi)/(bolmeOrani*4)));
```

```
    }
```

```
    bolmeOrani=bolmeOrani*4;
```

```
}
```

```
//*****Faz Akımlarını Ölçme*****
```

```
void akimOlc()
```

```
{
```

```

FbIa=analogRead(A2);
FbIa=((FbIa*1000.0*(5.0/1023.0))-2450)/2.0;
FbIb=analogRead(A3);
FbIb=((FbIb*1000.0*(5.0/1023.0))-2450)/2.0;
}
//*****Başlangıç ayarları*****

void setup() {
  Serial.begin(115200); //Seri iletişimi başlat
  md.init();          //Motoru hazırla
  Serial.println("DualMC33926MotorShield");

  /**Parametreleri Gir**
  parametreGir();

  /**Başlangıç değerlerini gir**
  pwmA=0;
  pwmB=0;

  /**Akım değerlerini hesapla**
  akimHesapla();
}

void loop() {

  /*******Adım Artırma*****
  if(millis()-adimSonZamani>adimZamani)
  {
    adimSonZamani=millis();
    adim++;
    if(adim==bolmeOrani)

```

```

{
    adim=0;
}
}

//*****A Fazı Akımı*****
/**Faz geri besleme akımını oku**
FbIa=analogRead(A2);
FbIa=((FbIa*1000.0*(5.0/1023.0))-2450)/2.0;

/**PID hesapla**
errA=Ia[adim]-FbIa;           //Hata hesapla
P_A=(errA*Kp);                //P'yi hesapla
I_A=(Ki * ((errA + errA_son) * Tp * 0.5) + I_A); //I'yi hesapla
D_A=(Kd * (errA - errA_son)) / Tp;           //D'yi hesapla
PID_A=P_A + I_A + D_A;                //PID'yi Hesapla
errA_son=errA;                       //Önceki hatayı kaydet

/**PWM hesapla**
pwmA=round((400 * PID_A) / 1200) + pwmA;      //PWM değerini hesapla
if(pwmA<-400)                                //-400'den küçük olmasını engelle
    {pwmA=-400;}
if(pwmA>400)                                //400'den büyük olmasını engelle
    {pwmA=400;}
md.setM1Speed(pwmA);

//*****B Fazı Akımı*****
/**Faz geri besleme akımını oku**
FbIb=analogRead(A3);
FbIb=((FbIb*1000.0*(5.0/1023.0))-2450)/2.0;

/**PID hesapla**
errB=Ib[adim]-FbIb;           //Hata hesapla
P_B=(errB*Kp);                //P'yi hesapla

```

```

I_B=(Ki * ((errB + errB_son) * Tp * 0.5) + I_B); //I'yı hesapla
D_B=(Kd * (errB - errB_son)) / Tp;           //D'yi hesapla
PID_B=P_B + I_B + D_B;                       //PID'yi Hesapla
errB_son=errB;                               //Önceki hatayı kaydet

/**PWM hesapla**
pwmB=round((400 * PID_B) / 1200) + pwmB;      //PWM değerini hesapla
if(pwmB<-400)                                //-400'den küçük olmasını engelle
    {pwmB=-400;}
if(pwmB>400)                                 // +400'den büyük olmasını engelle
    {pwmB=400;}
md.setM2Speed(pwmB);
}

```

ÖZGEÇMİŞ

Ozan akmak, 1989 yılında Elazığ'da doğdu. Lise öğrenimini Elazığ Korgeneral Hulusi Sayın Lisesi'nde tamamladı. 2007 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'ni kazandı ve 2011 yılında mezun oldu. 2011 yılında, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.