

Elektik Elektronik Mühendisliği

Tasarım Proje Raporu

Kemal KAPLANSEREN

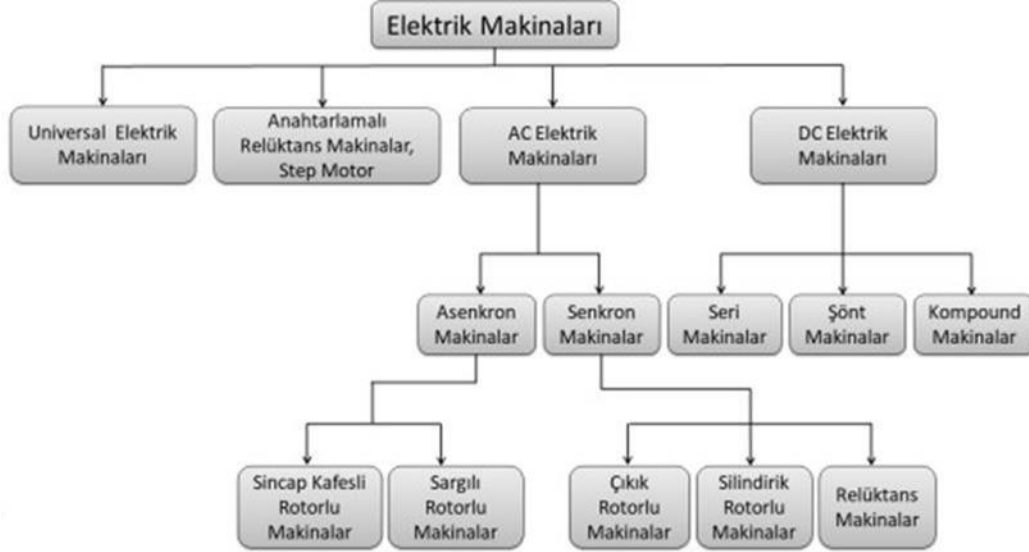
Ođuzhan İŞBİLİR

İÇİNDEKİLER

1. Elektrik Motorları	3
2. Doğru Akım Motorları	3
2.1 Fırça ve Kolektör	4
3. Fırçasız DC motorlar	4
3.1 Fırçasız DC Motor Yapısı	5
3.1.3 Disk Tipi Fırçasız DC Motor	7
4. Fırçasız DC Motorun Çalışma Prensibi.....	7
4.1 Fırçasız DC Motorun Geri Besleme Ünitesi	9
4.1.1 Alan Etkili Sensörlerin (Hall Effect Sensor) Kullanımları	9
4.1.2 Sıfır Geçiş Detektörlerinin Kullanımları	10
5. Fırçasız DC Motorun Kontrolü	10
6. Fırçasız DC Motor Sürücü Devresi	11
7. Fırçasız DC motor sürücü ekipman parametreleri	12
7.1 Mosfet parametreleri	12
7.2 Yarım Dalga Mosfet Sürücü.....	12
8. Sistemin Matematiksel Hesaplamaları ve Testleri.....	13
8.1 Boşta çalışma deneyi.....	13
8.2 Sistemin Matematik Modeli.....	15
8.3 Anahtarlama Kayıpları	17
9. Kaynakça	19

1. Elektrik Motorları

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektromekanik cihazlardır. Temel çalışma prensibi, bir elektrik akımının manyetik alanla etkileşime girmesi sonucu bir dönme hareketi oluşturmaktır. [1]



Şekil 1 Elektrik Makinaları Şeması

2. Doğru Akım Motorları

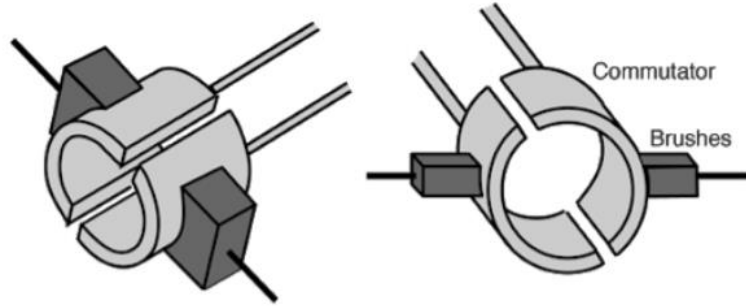
Bir doğru akım motorunun temel çalışma prensibi, bir iletken üzerinden geçen elektrik akımının bir manyetik alan ile etkileşime girerek bir kuvvet (Lorentz kuvveti) oluşturmaya dayanır. Bu kuvvet rotorun dönmesini sağlar.[1]

- **Avantajlar:** Doğru akım motorları, özellikle hız kontrolü gerektiren uygulamalar için idealdir. Yüksek başlangıç torku sağlar ve kontrol devreleri nispeten basittir. [2]
- **Dezavantajları:** Fırçalı DC motorlar, fırça ve kollektör aşınması nedeniyle düzenli bakım gerektirir. Ayrıca, fırçasız motorlara kıyasla daha az verimlidir. [2]

2.1 Fırça ve Kolektör

DC motorlarda motorun hareketli kısmı olan rotor sargılarına gerilim uygulanması için kullanılan ara bağlantı elemanına fırça, fırçaların temas ettiği rotorun bölümüne ise kolektör veya komütatör denir. [3] DC motor fırçaları bakır alaşımlardan yapılabildiği gibi genellikle karbon alaşımlardan yapılmaktadır. Bu nedenle DC motor fırçalarına kömür de denmektedir. [4]

DC motorlarda statorda oluşan manyetik alanın içerisinde kalan rotor sargılarına uygulanan gerilim sargı iletkeni üzerinde akım akmasına neden olur. Manyetik alan içerisinde bulunan, üzerinden akım geçen iletkeni ise bir kuvvet uygulanır. Uygulanan bu kuvvet ile iletken yani rotor hareket eder. Rotorun bu sürekli hareketinin hiç durmadan devam etmesi için rotora uygulanan gerilimin de kesintiye uğramaması gerekir. Bu kesintisiz gerilim kullanılan fırçalarla sağlanır. Aşağıda fırça ve kolektörün temel görünüşü yer almaktadır. [5]



Şekil 2 Fırça ve Kolektörün Motor Üzerinde Gösterimi [6]

3. Fırçasız DC motorlar

Fırçasız DC motorları, iletken akımları ile rotora yerleştirilen sabit mıknatısların manyetik alanının etkileşimi sonucu endüklenen moment ile enerji dönüşümünü gerçekleştiren elektrik makineleridir. Fırçasız motor, fırçalar ve komütatöre sahip bir doğru akım servo motora benzer performans elde etmek için fırça ve komütatör takımının mekanik sınırlamalarını ortadan kaldırmak amacıyla komütasyon işlemi elektronik olarak yerine getirilecek şekilde tasarlanmaktadır. Komütasyon terimi, doğru akım makinelerinde endüvi sargılarında akımın yönünü değiştirme işlemi olarak bilinir.

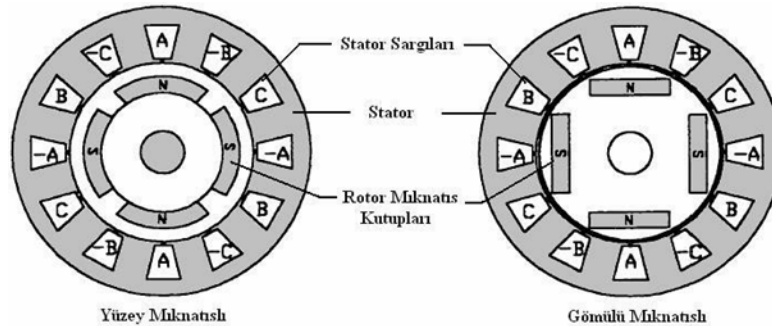
Fırçasız DC motorları, karakteristik özellikleri bakımından klasik DC motoru gibi çalışır. Rotoru sabit mıknatıstan yapılmış olup, uyarım sağlanması için fırça ve kolektör gibi yardımcı elemanlara ihtiyaç göstermez. Yüksek enerjili sabit mıknatısların bulunuşu, fırçasız DC motorlarının avantajları ile birleşince pek çok güç elektroniği uygulamalarında fırçasız DC motorlarının kullanımı hızla artmıştır [7].

3.1 Fırçasız DC Motor Yapısı

Bir stator ve sürekli mıknatıslı bir rotordan meydana gelmiştir. Fırçasız DC motorları senkronize motorlardır. Stator tarafından üretilen manyetik alanla rotor tarafından üretilen manyetik alan aynı frekans üzerinde döner. Fırçasız DC motorları 1-faz, 2-faz ve 3-fazlıdır. Çeşidine göre statorun faz sayısı ile aynı sayıda kanatları vardır [8].

3.1.1 İç Rotorlu (In Runner) Fırçasız DC Motorlar

İç rotorlu motor yapısı, klasik senkron ve asenkron motorlara çok yakındır. Dışa yerleştirilmiş statoru sabit endüvi sargılarını taşımakta olup, asenkron motor stator yapısına çok benzer. Şekil 3 'de iç rotorlu fırçasız doğru akım motorunun yapısı verilmiştir. Bu tip rotorlarda mıknatıslar ince şeritler halinde ya da yay şeklinde rotor dış yüzeyine yapıştırılmaktadır. Dış rotorlu yapıyla karşılaştırıldığında iki olumsuz özelliğe sahiptir. Özellikle yüksek hızlarda mıknatısların rotordaki yerlerinden çıkarak, rotorun parçalanmaması için mıknatısların sabitlenmesi çok dikkatli yapılmalıdır. Bu amaçla rotorlar yüksek elektriksel dirençli metal şeritler ile sarılırlar. İkinci olumsuz yanı ise, statorun seri üretimde sarılması ve işlenmesi oldukça zordur, aynı zamanda maliyeti ve işçiliği de çok fazladır. Stator sargıları dış yüzeyde olduğundan, dış rotorlu yapıya göre statorun soğuması

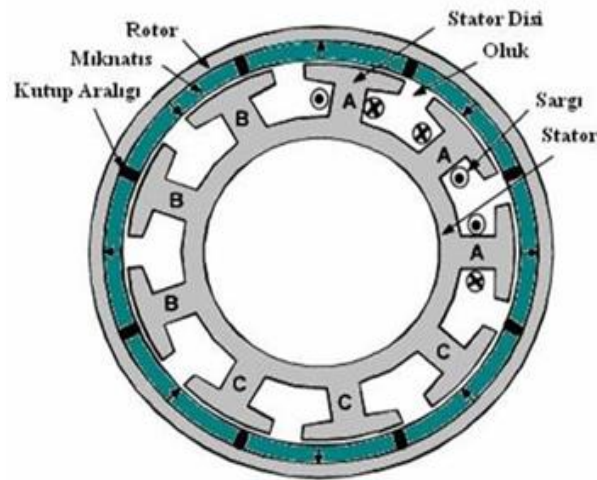


Şekil 3 İç Rotorlu Fırçasız DC Motor

daha kolaydır. Özellikle yüksek performanslı konum ve hız kontrolü gerektiren servo motor ve kompresör uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Uygulama sahası oldukça geniştir [9].

3.1.2 Dış Rotorlu (Out Runner) Fırçasız DC Motorlar

Mıknatıslar, stator sargısının dışında bulunan rotor yuvarlağının içine yerleştirilir. Şekil 4’de görüldüğü gibi endüvi sargılarını taşıyan stator iç kısımda, sürekli mıknatısların bulunduğu rotor ise dış kısımda serbest olarak dönmektedir. Stator ve rotor yapısı olarak sabit mıknatıslı fırçalı doğru akım makinesi ile örtüşmektedir. Bu yapıda mıknatıslar rotora gömülü olarak yerleştirildiğinden savrulmaya karşı oldukça dayanımlıdır. Aynı zamanda stator sargılarının dış yüzeyde olması seri üretimde sarım işlemini oldukça kolaylaştırmaktadır. Mıknatısları rotor yuvası içinde yerleştirmek suretiyle kolayca tutturabilmek, üretim tekniği açısından avantaj sağlar. Ancak yüksek kütle sebebiyle denge sorunu çıkabilir. Ayrıca çift rulman yerine tek rulman ve mil-yatak kullanabilme imkânı bu tipin üretim maliyetini düşüren etkenlerdir. Bir diğer etken, mıknatıs alanının iç rotor tipine göre daha geniş tutulabilmesidir. Böylece düşük kalitede ucuz mıknatıslar kullanılabilir. Bu tip motorlar özellikle fan ve çamaşır makinesi uygulamalarında, yüksek eylemsizlik nedeni ile ani yük değişimlerinde, hız sabitliğini koruma özellikleri nedeniyle geniş kullanım alanı bulmaktadırlar. [10]

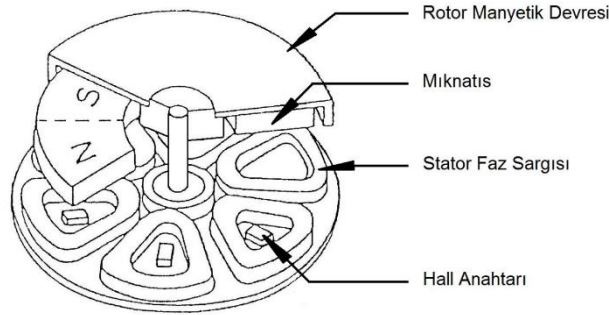


Şekil 4 Dış Rotorlu Fırçasız DC Motor Yapısı [10]

3.1.3 Disk Tipi Fırçasız DC Motor

Bir yüzeyinde mıknatıslar yerleştirilmiş çelikten yapılmış disk rotoruna sahiptir. Statorunda ise buna karşılık düşen uyarma sargıları bulunur. Sargıları baskılı devre şeklinde imal etmekte mümkündür. Bu tür motorlarda hız geri beslemeli kapalı çevrim kontrollü bir sistemle düşük hızlarda çok yumuşak performans sağlanabilir. 1000 rpm üzerindeki uygulamalarda stator veya rotor disk çeliğinde ısı problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bunu gidermek için yüksek hızlarda çalışması istenen makinelerde ek maliyetler söz konusu olacaktır.

Düşük güç ve düşük hız uygulamalarında bu tip fırçasız DC motor daha uygun olacaktır. Eğer ki düşük hız ve yüksek güç ihtiyacı ortaya çıkar ise iç rotorlu yüksek kutup sayılı fırçasız DC motor bu ihtiyacı karşılamak üzere seçilmelidir. [10]

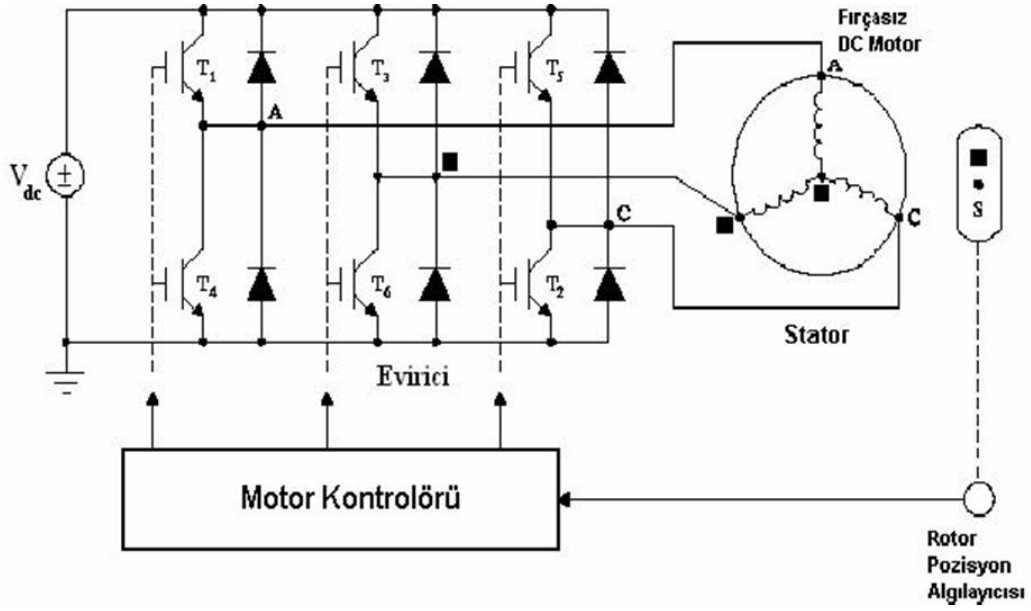


Şekil 5 Disk Tipi Fırçasız DC Motor [10]

4. Fırçasız DC Motorun Çalışma Prensibi

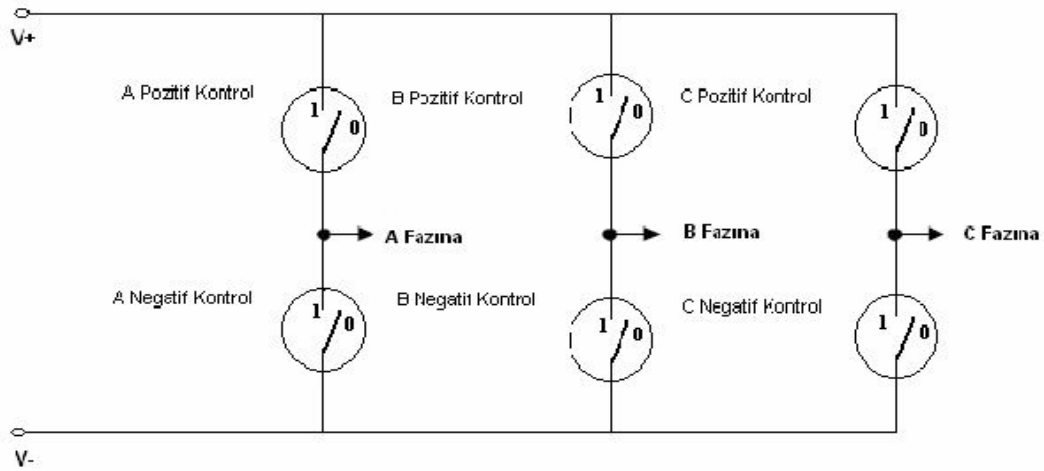
Fırçasız DC motor, sabit mıknatıslı bir rotora sahip ve elektronik komütasyon için rotor pozisyonu bilinmesi gereken senkron bir motordur. Stator sargıları, bir evirici üzerinden beslenir. Akım kaynağından beslenen eviricideki güç anahtarlarının, anahtarlama sıraları, rotor konumuyla senkron bir şekilde gerçekleştirilir. Hangi anahtarın açma-kapama yapacağı konuma bağlı olarak, rotora yerleştirilen bir konum algılayıcı veya algılayıcısız kontrol algoritmasıyla belirlenir. Pozisyon geri beslemeli bir fırçasız doğru akım motor sürücü sisteminin klasik kontrol algoritması Şekil 6’da gösterilmiştir.

Statorun akım yönü rotorun konum bilgisine göre değiştirilir. Anahtarların kontrolüyle statora uygulanan gerilim ile akımın yönü ve rotorda dönme hareketi oluşur. Böylece statorda manyetik alan kutbu oluşur.



Şekil 6 Pozisyon geri beslemeli bir fırçasız doğru akım motor sürücü sisteminin devre şeması [11]

Oluşan kutuplar ve rotor kutuplarının aynı kutupların birbirini itmesi, zıt kutupların birbirini çekmesi sonucu dönme momenti oluşur. Dönme momenti rotor ve stator manyetik



Şekil 7 Sürücü anahtarlarının bağlanması

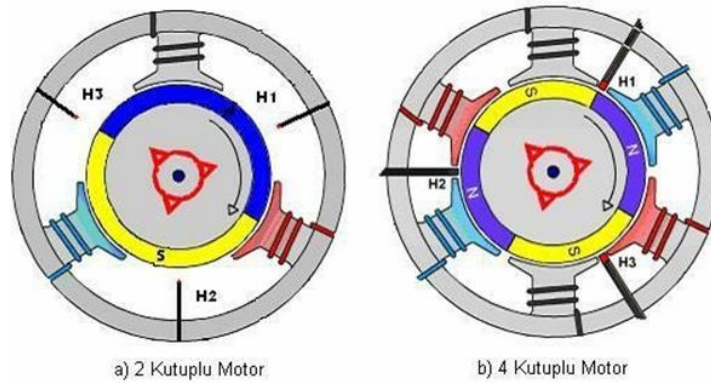
alan şiddetine bağlıdır. Dönme hareketi sonucu rotorun konumu değişir. Sensörler yeni konumu algılar ve işlemciye gönderir. İşlemci, yeni konuma göre anahtarların konumunu değiştirir. Rotor yine itme ve çekme kuvveti etkisinde kalır. Bu şekilde hızlı bir anahtarlama ile rotorda dönme hareketi meydana gelir. Dönme sonucu oluşan sensör konumları ve anahtarların konumları şekilde verilmiştir.

4.1 Fırçasız DC Motorun Geri Besleme Ünitesi

Fırçasız DC motorlarda rotor pozisyonunun doğru bir şekilde algılanması önemlidir, çünkü stator sargılarının enerji verilmesi rotor pozisyonuna göre yapılmalıdır. Bu pozisyon genellikle sensörler kullanılarak tespit edilir. Geri besleme üniteleri, sürücü fonksiyonları için gerekli olan akım ve gerilim değerlerini ölçerek, bu verilere dayalı olarak kontrol sağlamaktadır. Rotor konumunu algılayabilen sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır, özellikle motorun hız ve konumunu kontrol etmek amacıyla. Bu amaçla en yaygın kullanılan sensör tipi, alan etkili (Hall) sensörlerdir. Bu sensörler, motorun statoruna ya da miline yerleştirilebilmektedir. Sensörlü sürme teknolojilerinin yanı sıra, günümüzde sensörsüz sürme yöntemleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak sensörsüz sürme tekniklerinde, rotor pozisyonunu algılamak için ek düzeneklerin kullanılması gerekmektedir. Rotor konumunun algılanması için çeşitli sensör tipleri mevcut olmakla birlikte, Hall etkili sensörler ve gerilim geri besleme (Back EMF) gibi yöntemler en çok tercih edilen teknolojilerdir.

4.1.1 Alan Etkili Sensörlerin (Hall Effect Sensor) Kullanımları

Stator üzerinde bulunan alan sensörlerinin konumları kutup sayısına göre değişiklik gösterir. Alan etkili sensörlerinin nerelere yerleştirildiği. Aşağıdaki şekilde iki ve dört kutuplu motorlar için gösterilmiştir. (H1, H2, H3 olarak isimlendirilen harfler, alan (Hall) etkili sensörleri simgelemektedir). Alan etkili sensörler için rotorun mıknatısı sayesinde bir manyetik akı oluşur. Nadiren ise motorun miline bağlı bulunan yardımcı bir mıknatıs tarafından manyetik akı elde edilir.



Şekil 8 2 ve 4 Kutuplu Fırçasız DC Motorlar İçin Alan Etkili Sensörler

30mV seviyelerinde küçük bir değere sahip olan hall gerilimi bir yükselteç kullanılarak yükseltilmektedir. [11]

4.1.2 Sıfır Geçiş Detektörlerinin Kullanımları

Fırçasız DC motorların çalıştırılması için üç fazlı evirici yapıları kullanılır. Rotorun konumuna bağlı olarak anahtarların kontrolü yapılır. Motorun stator sargılarına uygulanan gerilimin ortalama değeri, motorun hızını ayarlamak için değiştirilir. Bu işlem için eviricinin girişindeki DC gerilimi ya doğrudan ayarlanır ya da sabit olan DC gerilimi üzerinden rotor konumuna göre iki anahtardan birinin çalışma süresi değiştirilerek çıkış gerilimi kontrol edilir. Bu yöntem, düşürücü çevirici olarak adlandırılabilir. Anahtarların kontrolü, PWM (Pulse Width Modulation) yöntemiyle gerçekleştirilir. PWM için, motorun hızından (frekansından) genellikle 10 kat daha yüksek bir anahtarlama frekansı kullanılır. Gerilim kontrolü sağlanırken, genellikle düşük gerilim tarafındaki anahtar üzerinden ayar yapılır.

5. Fırçasız DC Motorun Kontrolü

Fırçasız DC motorun çalıştırılması için üç faz evirici yapısı kullanılır. Rotor konumuna bağlı olarak anahtarların kontrolü gerçekleştirilir. Motorun stator sargılarına uygulanan gerilimin ortalama değeri değiştirilerek hız kontrol edilebilir. Bunun için ya evirici girişindeki DC gerilim değeri ayarlanır ya da evirici girişindeki sabit olan DC gerilim rotor konumuna göre iletimde olan iki anahtardan birinin çalışma oranı değiştirilerek çıkış gerilimin değeri ayarlanabilir (Düşürücü çevirici). Anahtarın çalışma oranı PWM yöntemi ile kontrol edilir. PWM için motor frekansından (hızından) daha büyük (genelde 10 katı) bir anahtarlama frekansı kullanılır. Genel olarak gerilim değerinin kontrolü için iletimde olan iki anahtardan düşük gerilim tarafındaki anahtar kullanılır [11]

5.1 Fırçasız DC Motor Sürücülerinde PWM

Doğru akım devrelerinde gerilim değeri olarak ortalama gerilim değeri ele alınır. Bu nedenle anahtarın kapalı kalma süresi veya açık kalma süresi değiştirilerek, elde edilen gerilimin alacağı ortalama gerilim değeri değiştirilir. PWM yönteminde çıkış gerilimi ile giriş gerilimi arasındaki oran görev periyodu (D) olan bir değer ile ifade edilir. Görev periyodunun değeri;

$$D = \frac{V_c}{V_g} = \frac{T_{on}}{(T_{on} + T_{off})} \quad (5.0)$$

Burada da V_{ϕ} çıkış gerilimi ve V_g giriş gerilimidir. Görev periyodu aynı zamanda anahtarın iletimde kalma süresinin, iletimde ve kesimde kalma süresine oranı şeklinde de ifade edilebilir.

6.Fırçasız DC Motor Sürücü Devresi

Şekil 9 Fırçasız DC motor sürücü devresi

7. Fırçasız DC motor sürücü ekipman parametreleri

Simülasyon Matlab simulink ortamında yapılmıştır. 3 fazlı H köprü eviricisinin çıkışına Fırçasız DC motor eklenmiştir. Motor Altair Flux motor üzerinden tasarlanmıştır. Tasarlanan motorun parametreleri aşağıda verilmiş olup simülasyona eklenmiştir.

Tablo 1 Motor Parametreleri

Parametreler	
Stator faz direnci (Ohm)	0.0801 Ω
Stator faz endüktansı (H)	8.413x10 ⁻⁶ H
Akı Bağlantısı (Wb)	2.142x10 ⁻³
EMK düz alan açısı (derece)	120°
Atalet momenti (kg.m ²)	2.125x10 ⁻⁴ kg.m ²
Viskoz sönümlleme (N.m.s)	4.924 x10 ⁻⁴ N.m.s
Kutup çifti (p)	14

7.1 Mosfet parametleri

Sistem topolojisi olan H köprü yapısına uygun olacak şekilde seçilen Mosfetler IRFZ44N serisinden olup toplamda 45 Amper Akım taşıyabilmektedir. Sistemin diğer parametreleri aşağıda belirtilmiştir.[12]

Tablo 2 Mosfet parametreleri [12]

Parametreler	
V _{DS}	55V
R _{DS(on)}	17.5m Ω
I _D	49A
R _D	7.5m Ω
V _f	0.3V

7.2 Yarım Dalga Mosfet Sürücü

Mosfetler yapısı itibari ile GATE bacaklarına belirli bir voltaj ile tetikleme yapılarak ilettime geçirilebilir. Ancak H köprü topolojisi ile iki adet mosfet aynı anda tetiklenmek

zorundadır bu nedenden dolayı ve sistemi basitleştirmek için 2 adet mosfete çıkış verebilen Yarım Dalga mosfet sürücüsü kullanılmıştır. Kullanılması planlanan yarım dalga sürücüsü entegresinin parametreleri aşağıda verilmiştir.[13]

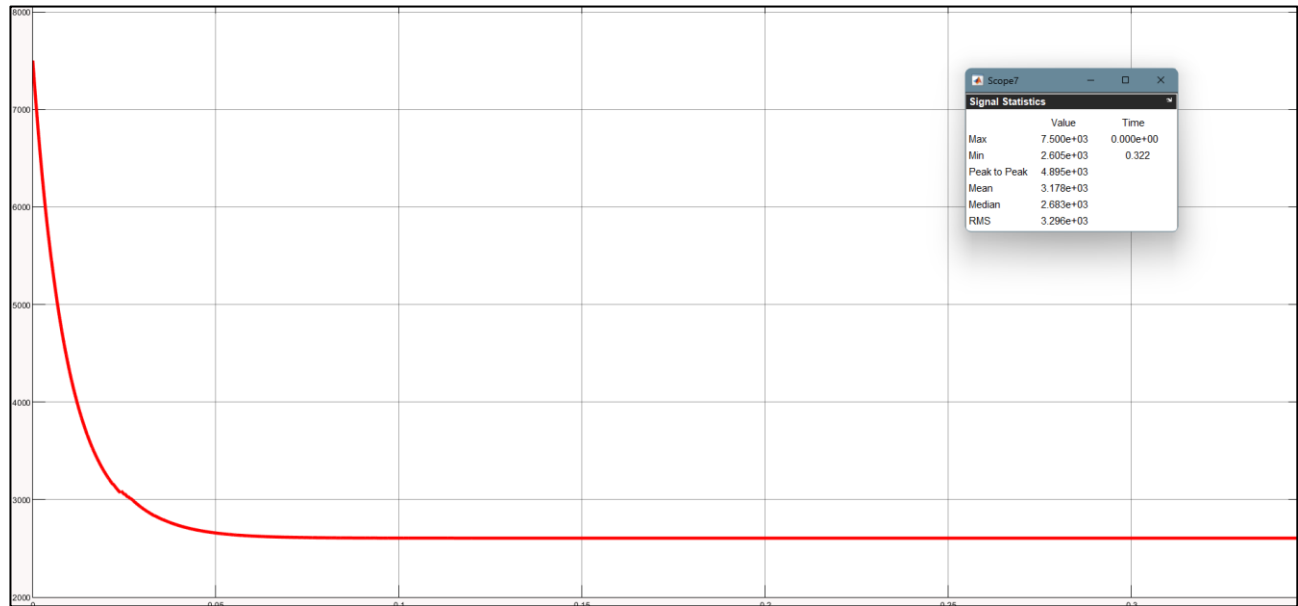
Tablo 3 Yarım dalga mosfet sürücü [13]

Parametreler	
V_{OFFSET}	600V max.
$I_{O+/-}$	130mA / 270mA
V_{out}	10 – 20 V
$t_{\text{on/off}}$	160 & 150 ns
Gecikme süresi	50ns

8. Sistemin Matematiksek Hesaplamaları ve Testleri

8.1 Boşta çalışma deneyi

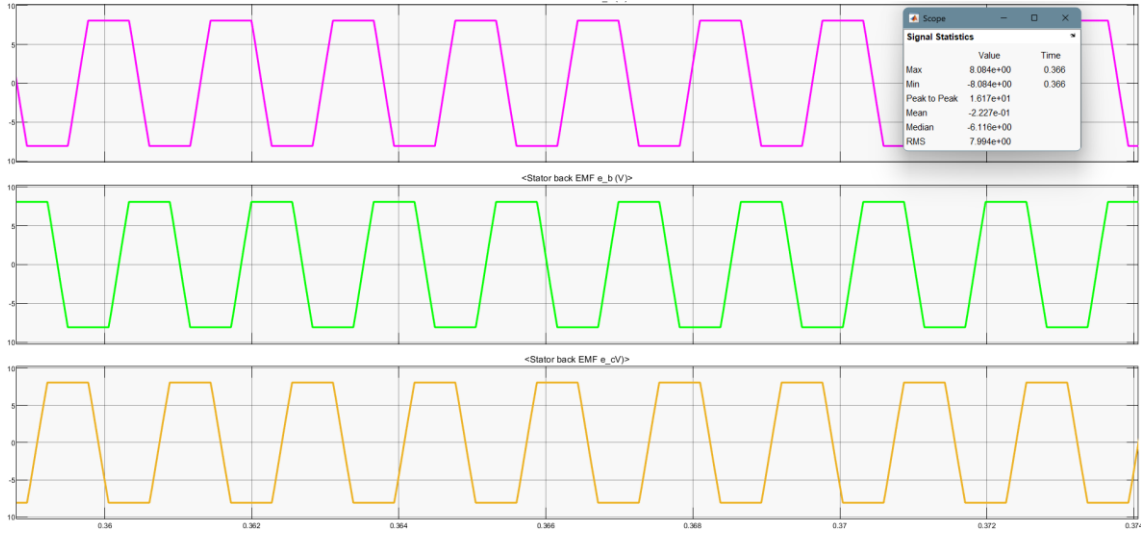
Sistem çıkış parametrelerini belirlemek için yapılması gereken ilk testlerden birisi boşta çalışma testidir bu test sonucunda elde edilen veriler motorun maksimum devir hızı ve EMK dır. Elde edilen verilerin grafikleri aşağıda verilmiştir.[14]



Şekil 10 Boşta çalışma devir/dk testi

Boşta çalışma sonucunda elde edilen hız değeri 2605 rpm olarak bulunmuştur. 14 kutup çifti olan bu motorda $\frac{60f}{p} = n$ denklemi ile Frekans=607 Hz olarak bulunmuştur.

Faz endüktansı $8.413\mu\text{H}$ bulunan motorun reaktansı $2\pi fl = 0,0320\Omega$ olarak bulunmuştur

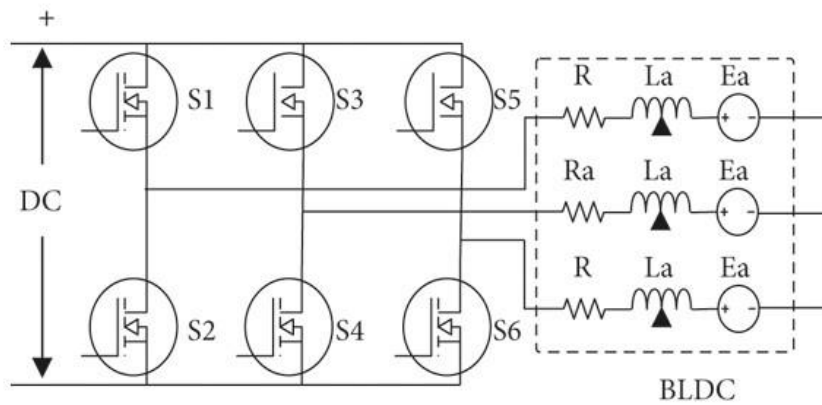


Şekil 11 Boşta çalışma EMK ölçümü

$$V_{emk(max)}(Faz-nötr) = 8.084V \quad (8.0)$$

$$V_{emk(rms)}(Faz-nötr) = 7.994V \quad (8.1)$$

Simülasyonda elde edilen EMK'nın kontrolünü sağlamak için maksimum değerlerinde sürekli hal analizi yapılmıştır. [15]



Şekil 12 Motor eşdeğer devresi [15]

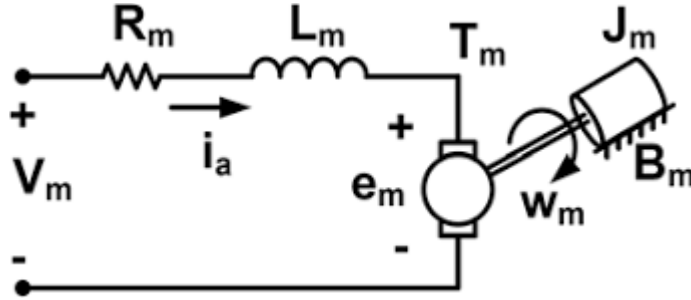
Motorun eşdeğer devresinden aşağıdaki denklem elde edilmiştir. Elde edilen sonuç oldukça yakın bir değeri oluşturmaktadır. (Anahtarlama kayıpları dahil edilmemiştir. İleriki başlıklarda dahil edilecek.)

$$V_{in(F-F)} = I_a * 2(R_a + X_{la}) + E_{a(F-F)} \quad (8.2)$$

$$16.6V \approx 30,81 * 2(0,0801 + 0,0320) + 8,084 \quad (8.3)$$

8.2 Sistemin Matematik Modeli

En basit yapısı ile Fırçasız DC motor bir iç direnç bir iç endüktans ve EMK dan oluşan bir sistemdir.



Şekil 13 Sistemin matematik modeli [16]

Sistemin matematik modelinin elde edilmesi için i_a akımının bilinmesi gerekmektedir. Devre analizi ile i_a akımı kolaylıkla bulunmuştur.[16]

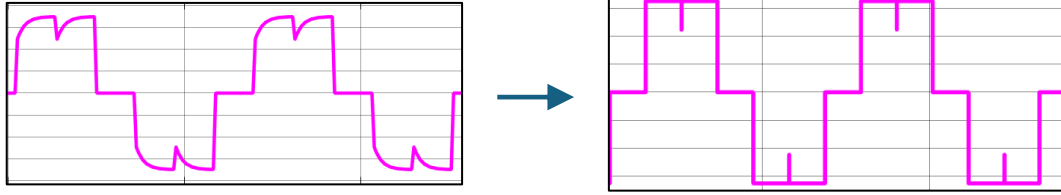
$$V_m = R_m * i_a + L_m \frac{di_a}{dt} + e_m \quad (8.4)$$

Elde edilen bu eşitliğin diferansiyel denklem eşitliği çıkarılmıştır.[17]

$$i_a = C_1 * e^{-t/\tau} * \frac{V_m - e_m}{R_m} = 34,85 A \quad (8.5)$$

Hesaplama sonucunda çıkan bu armatür akımı maksimum noktası için bulunmuştur. Analizler sonucu akım grafiği lineer bir yapıda olmadığı belirlenmiştir ancak belirli bir periyot sonrasında aynı akım grafiği elde edilmektedir. Seçilen topoloji doğrultusunda anahtarlama ekipmanları her zaman 120° lik bir zaman için iletimde kalmaktadır. Hesaplama kolaylığı ve anlaşılma kolaylığı için grafikte doğrusallaştırmaya doğru gidilmiştir.[17]

$$i_{a(\text{doğrusallaştırılmış})} = \int_0^{2\pi/3} C_1 * e^{-t/\tau} * \frac{V_m - e_m}{R_m} d(wt) = 30,81 A \quad (8.6)$$

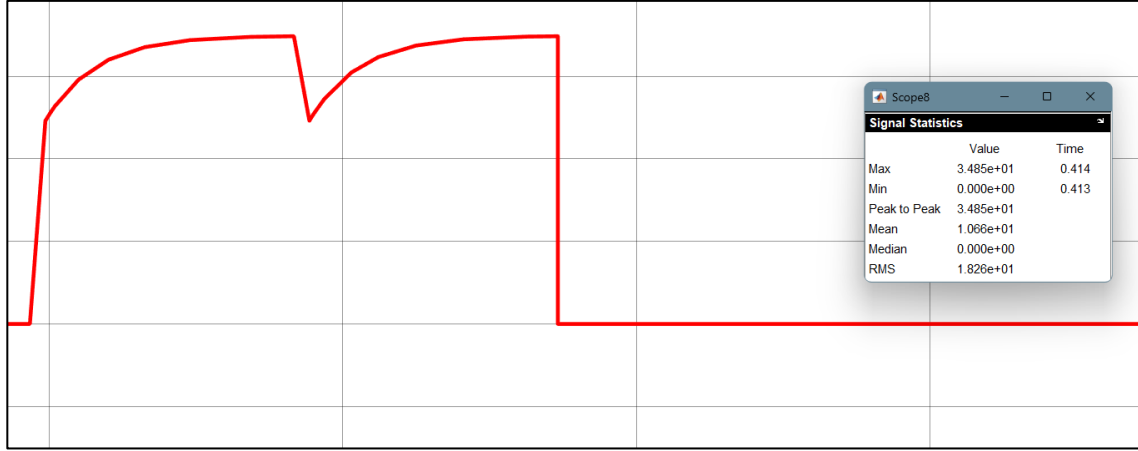


Şekil 14 Doğrusallaştırma yöntem grafiği

Elde edilen Doğrusallaştırılmış akım denklemi sonucunda anahtarlama ekipmanları ve hat akımlarının akım değerleri hesaplanmıştır.[17]

$$I_{s1(ort)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} C_1 * e^{-t/\tau} * \frac{V_m - e_m}{R_m} d(wt) = 10,66A \quad (8.7)$$

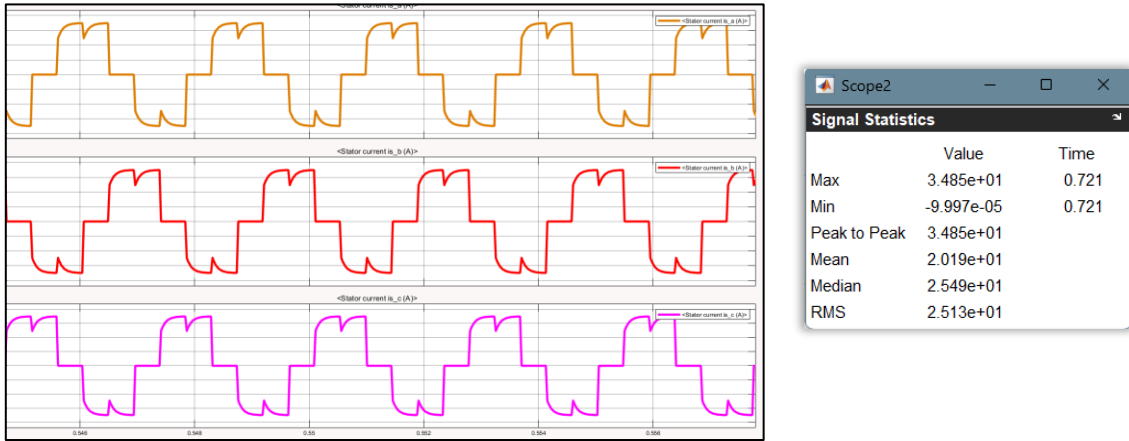
$$I_{s1(rms)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} (C_1 * e^{-t/\tau} * \frac{V_m - e_m}{R_m})^2 d(wt)} = 18,26A \quad (8.8)$$



Şekil 15 S1 anahtar akımı

$$I_{a(ort)} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi/3} C_1 * e^{-t/\tau} * \frac{V_m - e_m}{R_m} d(wt) = 20,19A \quad (8.9)$$

$$I_{a(rms)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/3} (C_1 * e^{-t/\tau} * \frac{V_m - e_m}{R_m})^2 d(wt)} = 25,13A \quad (8.10)$$



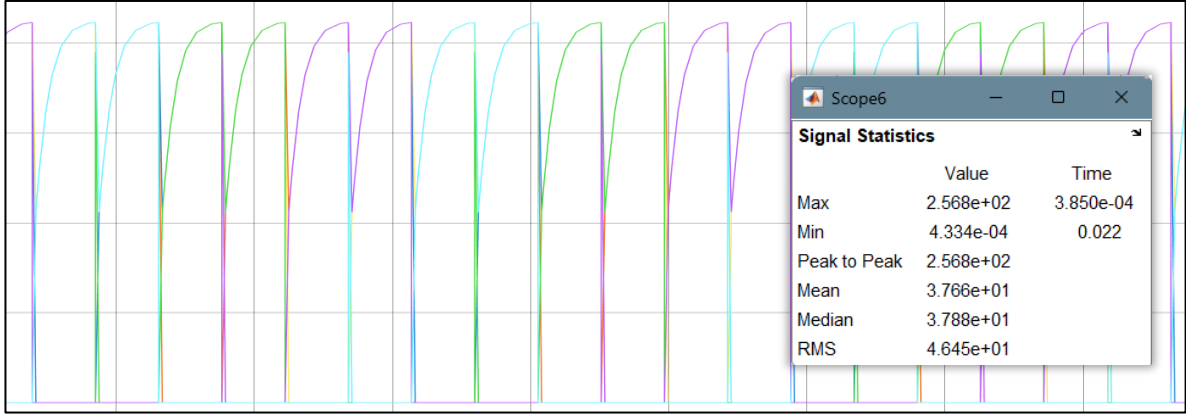
Şekil 16 A-B-C faz akımları

8.3 Anahtarlama Kayıpları

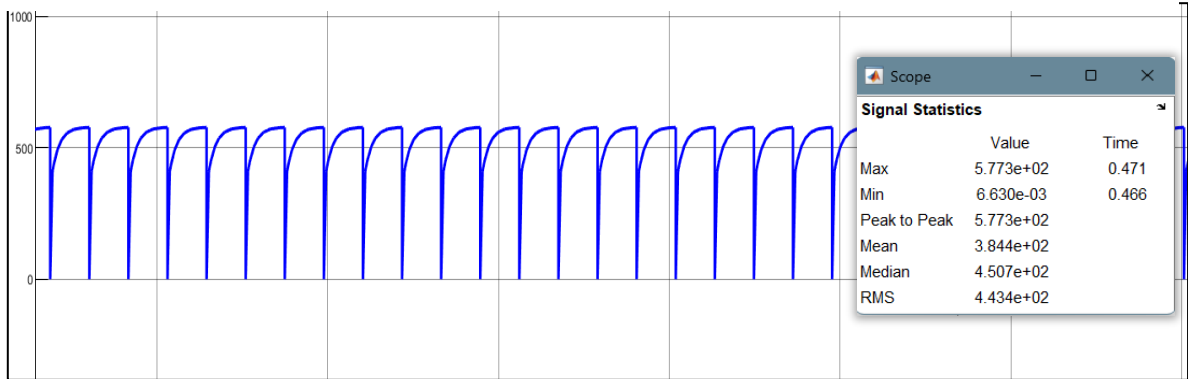
Sistemde kullanılan Mosfetlerin anahtarlama esnasında bir kayıp oluşmaktadır. Bu anahtarlama kayıpları (8.9) numaralı formülde belirtilmiştir.[17]

$$P_{anahtarlama} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{ak}(t) * V_{ak}(t) dt = 46,45 W \quad (8.11)$$

$$P_{Toplam} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{giriş}(t) * V_{kaynak}(t) dt = 443,4 W \quad (8.12)$$



Şekil 17 Anahtarlama kayıpları



Şekil 18 Toplam anahtarlama kayıpları

8.4 Verim hesaplaması

Sistemin verimi iki yolla bulunabilir bunlardan ilki $\eta = \frac{V_{çıkış}}{V_{giriş}}$ dir. Bir diğer verim formülü

ise $\eta = \frac{P_{toplam} - P_{kayıp}}{P_{toplam}}$ budur. Sistemde bilinen değerler toplamda enerji cinsinden olduğu

için hesapların 2. Formül ile yapılması uygun görülmüştür.[17]

$$\eta = \frac{443,4W - 46,45W}{443,4W} = \%89,52 \quad (8.13)$$

9. Kaynakça

- [1] Edition, F., & Chapman, S. J. (2012). Electric machinery fundamentals.
- [2] Krause, P. C. (2013). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Wiley-IEEE Press.
- [3] Hughes, A., & Drury, B. (2019). *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. Newnes.
- [4] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2013). Electric Machinery, Chapter 8.
- [5] Krause, P. C. (2013). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Wiley-IEEE Press.
- [6] <https://ieee.omu.edu.tr/fircali-motorlar/>
- [7] H. Öztura ve S.H. Bayındır, Fırçasız DA Motorlarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, (1995)
- [8] Microchip, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, Application Note AN885, USA, 2003
- [9] P. Yedamale, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, Microchip Technology Inc. App. Note, USA., (2003)
- [10] M. Yılmaz “Fırçasız DA Motorun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması”, İTÜ, 2005
- [11] Ö. Atan, “Fırçasız DC Motorun Modellenmesi ve PWM ile kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, 2007
- [12] International Rectifier. (2010). *Irfz44n Power MOSFET datasheet*. California: IR world headquartes.
- [13] International Rectifier. (2004). *IR 2101 high an f low side driver datasheet*. California: IR world headquarters.
- [14] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). Electric machinery.
- [15] Zhao, J., & Yu, Y. (2011). Brushless DC motor fundamentals application note. *MPS*.
- [16] Sharaf, A. M., Elbakush, E., & Atlas, I. H. (2007, June). A predictive dynamic controller for PMDC motor drives. In *Fifth International Conference on Industrial Automation* (pp. 11-13).
- [17] Arifoğlu, U. (2023). *Güç Elektroniği Devreleri Matlab ve Simulink Çözümleri*. Ankara: Palme Yatinevi.