

# Gömülü Sistemlerde Kontrol Döngüsü ve PWM Frekansı Seçiminin İncelemesi

## Investigation of the Control Loops and PWM Frequency Selection in Embedded Systems

Simge Gönen<sup>1</sup>, Erhan Poyrazoğlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ASELSAN MGEO, 06172, Ankara

sgonen@aselsan.com.tr

<sup>2</sup>ASELSAN MGEO, 06172, Ankara

epoyrazoglu@aselsan.com.tr

### Özetçe

Hareket sistemlerinin istenen konuma sürülmesi ve gelen bozucu etkilerin bastırılması amacıyla pozisyon kontrolörü kullanılmaktadır. Bir kontrolörün mikroişlemcilerde koşturulabilmesi için ayrı zaman alanında tanımlanması gerekir. Ayrı zamanlı kontrolör tasarımında örnekleme frekansının seçimi hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada ilk olarak PWM (Pulse Width Modulation) anahtarlama ve kaskad bir pozisyon-akım döngüsünün akım kısmının farklı frekanslarının pozisyon referans takip performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca kapalı çevrim akım döngüsü kullanılmadan farklı PWM anahtarlama ve pozisyon döngüsü örnekleme frekansları ile sistemin pozisyon referans takip performansı kıyaslanmıştır.

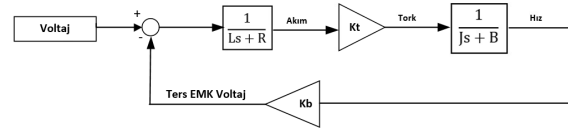
### Abstract

Position controller is used for driving to the desired position and rejecting disturbance effects for motion systems. A controller must be described in discrete-time domain to be run in microprocessors. Sampling frequency selection is vital for discrete-time controller design. In this study, firstly, the effects of different frequencies of PWM (Pulse Width Modulation) switching and current part of a cascaded closed position-current loop on the reference tracking performance was investigated. In addition, the position reference tracking performance of the system is compared with different PWM switching and position loop sampling frequency without using closed-loop current control.

### 1. Giriş

Bir motoru sürmek için motor fazları arası voltaj farkı oluşturularak akım üretilir. Bu akım tork oluşturarak mekanik hareket meydana getirir. Şekil 1'de basit bir DC motor modeli gösterilmiştir. Motor girişi olan voltaj sinyalinin genliği mosfetler aracılığıyla PWM çalışma oranı (ing. duty ratio) ayarlanarak

üretilir. Bu sebeple mikroişlemcilerde koşturulan motora gereken voltajı uygulayacak kontrolörün çıktısı maksimum PWM çalışma oranı olan  $\pm 100$  ile sınırlıdır.



Şekil 1: Basit DC motor modeli

Uygulamaya bağlı olarak kontrolör tasarımı ayrı ve sürekli zaman alanında yapılmalıdır. Örneğin bir kontrolör analog devre için tasarlanırken sürekli zaman alanında, mikroişlemciler gibi sayısal devrelerde ise ayrı zaman alanında tanımlanmalıdır. Ayrı kontrol tasarımında birçok yaklaşım bulunmaktadır. Bazı tasarımlar sürekli zaman alanında yapıldıktan sonra ayrıştırılarak uygulanırken kimi tasarımcılar direkt ayrı zaman bölgesinde çalışmaktadır [1, 2, 3].

Ayrı zamanlı kontrol döngüsünün örnekleme frekansı sistem performansını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Örnekleme frekansı yükseldikçe sistemin sürekli zamanda performansına yakınsamaktadır. Fakat örnekleme frekansının belli bir değerden sonra artırılması sistem performansını olumsuz etkileyebilir [4]. Bu sebeple örnekleme frekansının seçimi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır [5].

Genel olarak servo kontrol çalışmalarında sistem performansının daha iyi olması için kaskad pozisyon, hız ve akım kapalı çevrim döngülerinin kullanılması gerektiğinden bahsedilir [6, 7]. [6]'da kaskad döngülerin örnekleme frekansı arasında en az 5 ile 10 kat fark olması gerektiği belirtilir. Ek olarak PWM çalışma frekansının kontrol sistem performansına etkisi ile ilgili net bir bilgi bulunmamaktadır.

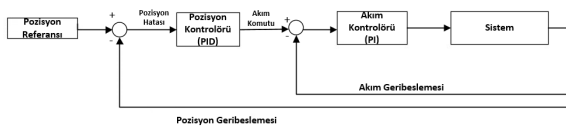
Bu çalışmada kullanılan sistemde pozisyon komutlarını yerine getirebilmesi için kaskad kapalı çevrim akım ve pozisyon döngüsü tasarlanmış, hız döngüsü ise kullanılmamıştır. Akım döngüsü çalışma frekansının pozisyon döngüsüne etkisi merak edildiği için pozisyon döngüsü frekansı değiştirilmeden farklı

akım döngüsü ve PWM frekansları uygulanarak kıyaslama yapılmıştır. Ayrıca akım döngüsünün gerekliliğini incelemek için sadece pozisyon kontrolörü kullanılarak performans kıyaslaması yapılmıştır. Örneklem frekansı dışında parametre değerleri hiçbir kontrolörde değiştirilmemiştir.

## 2. Kullanılan Kontrol Döngüleri

### 2.1. Kaskad Kapalı Çevrim Pozisyon ve Akım Döngüsü

Şekil 2’de kaskad kapalı çevrim pozisyon ve akım döngüsünün blok diyagramı gösterilmiştir. Akım kontrolörü kapalı çevrim akım yanıtının bant genişliği 500 Hz’den yüksek olacak şekilde tasarlanmıştır. Pozisyon döngüsü çıkışı aynı zamanda akım komutuyken akım kontrolör çıkışı  $\pm 100$  ile sınırlı olan PWM çalışma oranıdır. Pozisyon kontrolör çıkışı akım komutuna gönderilmeden önce maksimum motor faz akım değeri ile sınırlanmıştır.



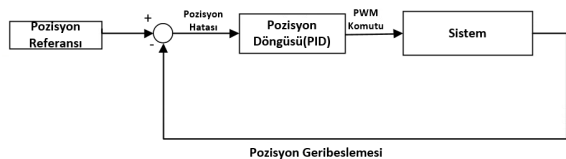
Şekil 2: Kaskad kapalı çevrim pozisyon ve akım döngüsünün blok diyagramı

Bu çalışmada bahsedilen yazılım mikroişlemcide tek çekirdek içerisinde koşurulmaktadır. O nedenle akım ve pozisyon döngüsü eş zamanlı çalıştırılmaz. Yazılımda akım döngüsü daha yüksek frekanslı çalışacağı için akım döngüsünün çalıştırılacağı kesme pozisyon döngüsüne kıyasla daha öncelikli seçilmiştir. Bu sebeple akım döngüsünün koşurulduğu her tur pozisyon döngüsü işlemleri kesintiye uğramaktadır.

Kullanılan mikroişlemcide donanımsal kısıtlardan dolayı PWM ve akım döngüsü örnekleme frekansları arasında sadece 1:1, 2:1 veya 3:1 oranlı ilişki kurulabilir. Bu sebeple akım döngüsü örnekleme frekansına karar verirken PWM frekansının seçimi de önemlidir. İşlemci yüksek PWM çalışma frekansını sağlasa da sistem bazında bakıldığında mosfetlerin açılıp kapanması sırasında meydana gelen enerji kaybı, ısı oluşumu ve EMI hatalarından dolayı PWM frekansının seçimi sisteme özgü ayarlanır [8].

### 2.2. Kapalı Çevrim Pozisyon Döngüsü

Motor sürmek için direkt pozisyon kontrolörü kullanılan kapalı çevrim döngünün blok diyagramı Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3: Sadece tek kontrolör kullanılan kapalı çevrim pozisyon döngüsünün blok diyagramı

Burada kontrol girişi pozisyon hatasıyken çıkışı  $\pm 100$  ile sınırlı olan PWM çalışma oranıdır. Burada kullanılan kontrolörün parametreleri Bölüm 2.1’deki pozisyon kontrolörününki ile bire bir aynıdır. Fakat bir önceki bölümde pozisyon kontrolör çıkışı akım iken bu yapıda PWM oranı olmalıdır. Bu sebeple akım ile PWM arasındaki matematiksel ilişkiyi kurabilmek için kontrolör bloğundan önce aşağıdaki kazanç değeri ile çarpılır:

$$k = \frac{100}{V_{nominal}} \times R_{motor} \quad (1)$$

Bu formülde  $V_{nominal}$  değeri kartın besleme gerilimini ifade ederken  $R_{motor}$  değeri motor direncini göstermektedir.

Bir önceki bölümde yazılımın tek çekirdekte çalışmasından dolayı pozisyon döngüsünün akım döngüsü tarafından çok sık bölüldüğü ve bundan dolayı kapalı çevrim pozisyon döngüsüne gecikme eklediğinden bahsedilmişti. Bu bölümdeki çalışmalarda akım döngüsü kaldırıldığı için bahsedilen bu kısıtlama giderilir. Yazılımın harcadığı süre ölçüldüğünde pozisyon kontrol döngüsünün örnekleme frekansı 4kHz’e kadar artırılabilir görülmüştür. İlerleyen bölümde farklı PWM çalışma frekansları uygulanarak pozisyon döngüsünün 2kHz ve 4kHz frekans ile örneklenmesinin kapalı çevrim sistem yanıtına etkisi incelenecektir.

## 3. Örnekleme Frekansının Kontrol Performansına Etkisi

Kapalı çevrim pozisyon döngüsünün performansını incelemek için sisteme değişken frekanslı sinüzoidal bir sinyal uygulanmıştır. Uygulanan bu sinyal profilinin değer ve birimleri Tablo 1’de gösterilmektedir. Bu bölümde elde edilen tüm pozisyon yanıtları aşağıdaki tabloda verilen komut profili uygulanarak elde edilmiştir.

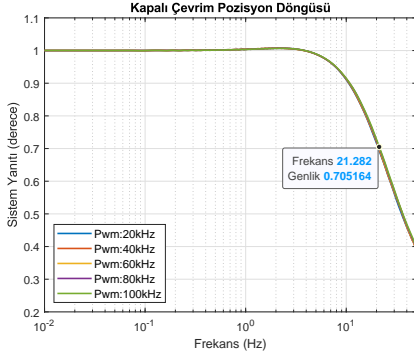
Tablo 1: Uygulanan pozisyon komutu profili

Parametre	Değer	Birim
Başlangıç Genliği	1	derece
Bitiş Genliği	1	derece
Başlangıç Frekansı	0.01	Hz
Bitiş Frekansı	50	Hz
Test süresi	60	saniye

Test sonuçlarını birbiriyle kıyaslamak için kapalı çevrim pozisyon yanıtının bant genişliği, ISE ve IAE hata kriterleri kıyaslanmıştır. ISE(Integral Squared Error) ve IAE(Integral Absolute Error) değerleri derece biriminde verilmiştir.

### 3.1. Pozisyon Döngüsü 2kHz İçin PWM Frekansının Kapalı Çevrim Pozisyon Yanıtına Etkisi

Yapılan testler esnasında toplanan veriler üzerinden elde edilen kapalı çevrim pozisyon döngüsünün yanıtları Şekil 4’te gösterilmiştir. Farklı PWM frekanslarına göre pozisyon döngüsünün yanıtlarının bant genişliği ve belirli frekans aralıklarındaki hata değerleri Tablo 2-4’te gösterilmektedir.



Şekil 4: Farklı PWM frekanslarına göre akım döngüsüz 2kHz kapalı çevrim pozisyon döngüsü yanıtları

Tablo 2: Akım döngüsüz 2kHz pozisyon kontrolünde PWM frekanslarının kapalı çevrim pozisyon yanıtına etkisi

PWM (kHz)	Bant Geniliği (Hz)
20	20.5
40	20.7
60	20.9
80	21
100	21.1

Tablo 3: Akım döngüsüz 2kHz pozisyon kontrolünde PWM frekanslarının pozisyon yanıtı (<3 Hz) ISE ve IAE sonuçları

PWM (kHz)	ISE	IAE
20	0.0018	0.3842
40	0.0019	0.4008
60	0.0019	0.3918
80	0.0019	0.3844
100	0.0017	0.3799

Tablo 4: Akım döngüsüz 2kHz pozisyon kontrolünde PWM frekanslarının pozisyon yanıtı (>3 Hz) ISE ve IAE sonuçları

PWM (kHz)	ISE	IAE
20	9.0833	23.2758
40	8.9956	23.1306
60	8.8756	22.9506
80	8.7660	22.7879
100	8.6446	22.5957

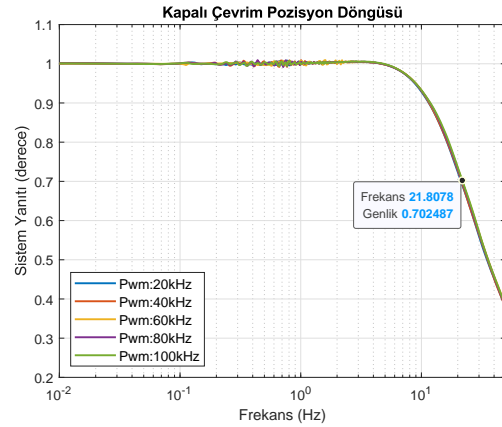
Bu sonuçlara göre:

- PWM frekansı arttıkça kapalı çevrim pozisyon yanıtı bant genişliği yükselir. Elde edilen en yüksek bant genişliği 21.1 Hz'dedir.
- Farklı frekans bölgeleri için yapılan hata analizinde PWM frekansı 100kHz olarak ayarlandığında ISE ve IAE değerleri en düşüktür.
- PWM frekansı değişimi sistem yanıtı performansı ve hata kriter sonuçlarında büyük bir değişime sebep olmamıştır.

### 3.2. Pozisyon Döngüsü 4kHz İçin PWM Frekansının Kapalı Çevrim Pozisyon Yanıtına Etkisi

Sistemin sahip olduğu pozisyon döngüsü, akım döngüsünün 10 katı çalışma frekansına sahiptir. Sisteme verilen akım komutunun yerini PWM komutu aldığı için akım döngüsü kaldırılmıştır. Akım döngüsüne harcanan sürenin ortadan kalkması sebebiyle pozisyon döngüsünün çalışma frekansı 2 katına kadar çıkartılabilmektedir. Daha yüksek frekansta çalışan pozisyon döngüsünün kapalı çevrim yanıtına farklı frekanslardaki PWM sinyalleri uygulanarak incelenmiştir. Kapalı çevrim pozisyon döngüsünün performansını incelemek için sisteme aşağıda belirtilen aynı özelliklere sahip Tablo 1'de belirtilen aynı özelliklere sahip sinüzoidal sinyal uygulanmıştır.

Yapılan testler esnasında toplanan veriler üzerinden elde edilen kapalı çevrim pozisyon döngüsü yanıtları Şekil 5'te gösterilmiştir. Farklı PWM frekanslarına göre pozisyon döngüsünün belirli frekans aralıklarındaki hata değerleri Tablo 5-7'de gösterilmektedir.



Şekil 5: Farklı PWM frekanslarına göre akım döngüsüz 4kHz kapalı çevrim pozisyon döngüsü yanıtları

Bu sonuçlara göre:

- Artan çalışma frekansına sahip pozisyon döngüsünün, uygulanan PWM sinyalinin frekansını artırdığımızda kapalı çevrim pozisyon döngüsünün bant genişliğini bir miktar iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen en yüksek bant genişliği 21.5 Hz'dedir.
- Pozisyon döngüsünü iki katına çıkartmak 3 Hz'den küçük bölgeler için farklı PWM frekansında ISE ve IAE değerlerini en düşük sağlamıştır. (Pozisyon döngüsü: 2kHz için PWM: 100kHz, Pozisyon döngüsü: 4kHz için PWM: 20kHz)
- 3 Hz'den büyük bölgeler için yapılan hata analizinde PWM frekansı 100kHz olarak ayarlandığında IAE değeri en düşüktür.
- PWM frekans değişimi sistem yanıtı performansı ve hata kriter sonuçlarında büyük bir değişime sebep olmamıştır.
- 3 Hz'den büyük bölgeler için pozisyon döngüsünü iki katına çıkartmak aynı PWM frekansında(100kHz) en düşük ISE değerini sağlamıştır.

Tablo 5: Pozisyon döngüsü 4kHz için farklı PWM frekanslarının kapalı çevrim pozisyon yanıtı bant genişliğine etkisi

PWM (kHz)	Bant Genişliği (Hz)
20	20.8
40	21.1
60	21.4
80	21.3
100	21.5

Tablo 6: Akım döngüsüz 4kHz pozisyon kontrolünde PWM frekanslarının pozisyon yanıtı (<3 Hz) ISE ve IAE sonuçları

PWM (kHz)	ISE	IAE
20	0.0012	0.3764
40	0.0019	0.4586
60	0.0018	0.3959
80	0.0017	0.4575
100	0.0014	0.3986

Tablo 7: Akım döngüsüz 4kHz pozisyon kontrolünde PWM frekanslarının pozisyon yanıtı (>3 Hz) ISE ve IAE sonuçları

PWM (kHz)	ISE	IAE
20	9.0555	22.5201
40	8.9933	22.3942
60	8.7145	21.9798
80	8.8144	22.1217
100	8.6769	21.8833

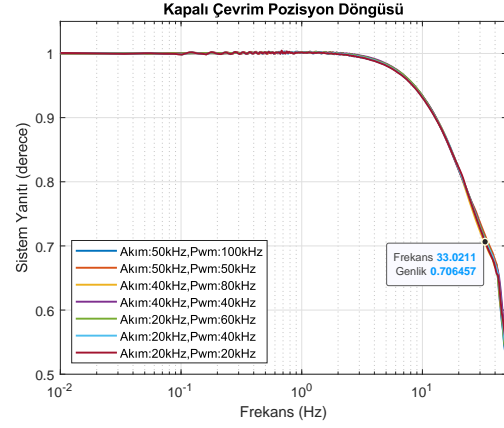
### 3.3. Akım Döngüsü Çalışma Frekansının Kapalı Çevrim Pozisyon Yanıtına Etkisi

Mevcut tasarıma sahip akım döngüsünün çalışma frekansının değişiminin, kapalı çevrim pozisyon döngü performansına olan etkisi farklı frekanslarda uygulanan PWM sinyallerine göre incelenmiştir. Yazılımın harcadığı süre kısıtlamasından dolayı pozisyon döngüsü 2kHz örnekleme frekansında koşturulmaktadır. Akım döngüsünün çalışma frekansı arttığında pozisyon döngüsünün harcadığı süre artmıştır. Harcanan süreler sebebiyle akım döngüsü çalışma frekansının maksimum 50kHz olarak test edilmiştir. Kapalı çevrim pozisyon döngüsünün performansını incelemek için sisteme aşağıda belirtilen aynı özelliklere sahip Tablo 1’de belirtilen chirp sinyali uygulanmıştır. Yapılan testler esnasında toplanan veriler üzerinden elde edilen kapalı çevrim pozisyon döngüsü yanıtları Şekil 6 ve 7’de gösterilmiştir. Farklı PWM frekanslarına göre pozisyon döngüsünün belirli frekans aralıklarındaki hata değerleri Tablo 8-10’da gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre:

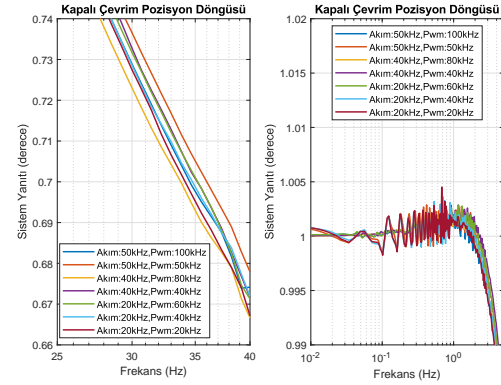
- Elde edilen en düşük bant genişliği 33.2 Hz, en yüksekse 34.5 Hz’dedir. En iyi performansı 50 kHz frekanslı akım döngüsü ve PWM çifti sağlamaktadır.
- 3 Hz’den küçük bölgeler için yapılan hata analizinde akım döngüsü frekansı 40kHz ve PWM frekansı 80kHz olarak ayarlandığında ISE ve IAE değerleri en düşüktür.
- 3 Hz’den büyük bölgeler için yapılan hata analizinde PWM frekansı 40kHz olarak ayarlandığında IAE değeri en düşüktür.
- 3 Hz’den büyük bölgeler için yapılan hata analizinde

akım döngüsü frekansı 40kHz ve PWM frekansı 40kHz olarak ayarlandığında IAE değeri en düşüktür.

- 3 Hz’den büyük bölgeler için yapılan hata analizinde akım döngüsü frekansı 50kHz ve PWM frekansı 50kHz olarak ayarlandığında ISE değeri en düşüktür.
- PWM frekansı değişimi sistem yanıtı performansı ve hata kriter sonuçlarında büyük bir değişime sebep olmamıştır.



Şekil 6: Artan çalışma frekansına sahip akım döngüsünün farklı PWM frekanslarına göre kapalı çevrim pozisyon döngüsü yanıtları



Şekil 7: Artan çalışma frekansına sahip akım döngüsünün farklı PWM frekanslarına göre kapalı çevrim pozisyon döngüsü yanıtları

Tablo 8: Farklı akım dögüsü ve PWM frekanslarının kapalı çevrim pozisyon yanıtı bant genişliğine etkisi

Akım (kHz)	PWM (kHz)	Bant Genişliği (Hz)
20	20	33.6
20	40	33.8
20	60	34.1
40	40	33.8
40	80	32.3
50	50	34.5
50	100	33.2

Tablo 9: Farklı akım dögüsü ve PWM frekanslarının pozisyon yanıtı (<3 Hz) ISE ve IAE sonuçları

Akım (kHz)	PWM (kHz)	ISE	IAE
20	20	0.00042004	0.2197
20	40	0.00037310	0.2190
20	60	0.00025812	0.1699
40	40	0.00023679	0.1611
40	80	0.00023594	0.1493
50	50	0.00034770	0.2085
50	100	0.00025872	0.1508

Tablo 10: Farklı akım dögüsü ve PWM frekanslarının pozisyon yanıtı (>3 Hz) ISE ve IAE sonuçları

Akım (kHz)	PWM (kHz)	ISE	IAE
20	20	3.8341	15.5931
20	40	3.8192	15.5189
20	60	3.8334	15.4398
40	40	3.7339	15.2940
40	80	3.9131	15.6456
50	50	3.7216	15.3085
50	100	3.8878	15.5781

## 4. Sonuçlar

Akım dögüsü tasarımı hem yazılım/kontrol çalışmasının tasarımcı tarafından harcadığı süre hem de akım dögüsünün pozisyon kontrol işlemlerinin koşturulduğu kesme fonksiyonunu bölmesi gibi bazı handikaplara sahiptir. Bu çalışmanın ana motivasyonu kapalı çevrim akım dögüsünün pozisyon referans takip performansına etkisi olup olmadığını incelemektir. Bu sebeple pozisyon kontrolörünün çıkışının akım komutu yerine direkt  $\pm 100$  aralığında PWM çalışma oranı (üretilen voltaj) uygulamasının kapalı çevrim pozisyon dögüsünün performansına etkisi kıyaslanmıştır. Donanımsal kısıtlamalar dahilinde sağlanabilecek farklı frekanslarda testler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde tüm testlerde PWM frekansını arttırdığımızda pozisyon yanıtının bant genişliğinin küçük bir miktar da olsa arttığı gözlemlenmiştir. Akım dögüsü kullanılan yazılım ile yapılan testlerde en iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Akım dögüsü olmayan fakat pozisyon dögüsü çalışma frekansı daha yüksek yapılan testlerde ise düşük olana kıyasla bir miktar sistem yanıtının daha hızlı olduğu fark edilmiştir. Sonuç olarak bir hareket sisteminde kaskad pozisyon akım dögü-

sünün performansı diğerlerine kıyasla çok daha yüksektir.

## 5. Teşekkür

Çalışmalar esnasında yardımlarından dolayı Gizem Mesci başta olmak üzere tüm Aselsan personeline teşekkür ederiz.

## 6. Kaynakça

- [1] B. D. Anderson, "Controller design: moving from theory to practice," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 16–25, 1993.
- [2] K. Ogata, *Discrete-time control systems*. Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [3] T. Ádám, S. Dadvandipour, and J. Futás, "Influence of discretization method on the digital control system performance," *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 8, no. 4, pp. 197–200, 2003.
- [4] Y. Şahin, "Yeni bir yüksek çıkışlı dc-dc dönüştürücünün geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi," 2013.
- [5] G. Bekey and R. Tomovic, "Sensitivity of discrete systems to variation of sampling interval," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 11, no. 2, pp. 284–287, 1966.
- [6] J. Hilkert, "Inertially stabilized platform technology concepts and principles," *IEEE control systems magazine*, vol. 28, no. 1, pp. 26–46, 2008.
- [7] G. Kopsakis, "Feedback control systems loop shaping design with practical considerations," 2007.
- [8] Ö. Günay, "Değişken pwm frekanslı pı tipi dc motor kontrolü," 2007.