

**T.C.**  
**MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ**  
**ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANA BİLİM DALI**  
**SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN**  
**ELEKTRİKSEL YÜK BENZETİMCİSİ**  
**TASARIMI VE MODEL ÖNGÖRÜLÜ**  
**KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Selen AKYILDIZ**  
**1781004**

**Tez Danışmanı**  
**Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY**

**ANKARA**  
**ŞUBAT 2021**

**T.C.**  
**MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ**  
**ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANA BİLİM DALI**  
**SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN**  
**ELEKTRİKSEL YÜK BENZETİMCİSİ**  
**TASARIMI VE MODEL ÖNGÖRÜLÜ**  
**KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Selen AKYILDIZ**  
**1781004**

**Tez Danışmanı**  
**Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY**

**ANKARA**  
**ŞUBAT 2021**

## ÖZGÜNLÜK RAPORU

Tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve ç) Sonuç ve Öneriler kısımlarından oluşan toplam 59 sayfalık kısmına ilişkin, 07/01/2021 tarihinde “Turnitin” adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %1’dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Özgünlük Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Usul ve Esasları’nı inceledim ve bu Uygulama Usul ve Esasları’nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Selen AKYILDIZ

/ /2021

## ETİK BEYANI

Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dökümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bu tezdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler bana aittir; Millî Savunma Bakanlığı, Türk Silahlı Kuvvetleri, Kara Kuvvetleri Komutanlığı, Millî Savunma Üniversitesi ve Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

Selen AKYILDIZ

/ /2021

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmaları boyunca bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren ve destekleyen danışmanım Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY ve birim amirim Berkay BAYKARA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmaların her adımında teknik bilgileri ile beni destekleyen başta Burak DENİZHAN, Dr. Ersin DAŞ, Dr. Mete AYDEMİR, Yasin YENİAYDIN ve Hamza KAMIŞLI olmak üzere tüm Mekatronik Sistemler Birimi'ndeki arkadaşlarıma teşekkürleri borç bilirim.

Tez sırasında sağladığı olanaklardan dolayı Tübitak SAGE'ye teşekkür ederim.

Son olarak süreç boyunca beni sonsuz sevgi ve anlayışla destekleyen aileme ve arkadaşlarıma, yüzümü sürekli güldüren ve en büyük motivasyon kaynağım olan sevgili eşim Ali AKYILDIZ'a teşekkür ederim.

Ankara; Şubat 2021

Selen AKYILDIZ

# İÇİNDEKİLER

<b>ONAY</b>	
<b>ÖZGÜNLÜK RAPORU</b>	
<b>ETİK BEYANI</b>	
<b>ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR</b>	
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>ÖZ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>3</b>
<b>3. ELEKTRİKSEL YÜK BENZETİMCİSİ</b> .....	<b>6</b>
3.1.Yüksüz En Fazla Hız Testi .....	7
3.2. Vuruntu Momenti Testi .....	8
3.3.Zıt EMK Testi .....	9
3.4.Sürekli Durdurma Torku Testi.....	9
3.5.Tork- Akım Testi .....	10
3.6.Tork-Hız Testi.....	10
3.7.EYB Tasarımı ve Bileşenleri .....	12
<b>4. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL (MPC)</b> .....	<b>14</b>
4.1. Tahmin ve Optimizasyon.....	15
4.2. Uzaklaşan Ufuk Kavramı.....	21
4.3. Maliyet Fonksiyonu ve Sınırlar .....	22
4.4. MATLAB MPC Bloğu Kullanımı ve Uygulama.....	24
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>27</b>
<b>6. MODELLEME, SİSTEM TANIMLAMA VE KONTROL</b> .....	<b>31</b>
6.1. Sistem Modelleme .....	31
6.1.1.Test Motorunun Modellenmesi .....	31
6.1.2. Yük Tarafının Modellenmesi .....	33
6.2.Sistem Tanımlama .....	34
6.2.1. Deneysel Girdi Sinyalinin Belirlenmesi .....	35

6.2.2. Test Motoruna Sistem Tanımlama Uygulanması.....	37
6.2.3. Yük Tarafına Sistem Tanımlama Uygulanması.....	40
6.3. Kontrolcü Tasarlanması.....	41
6.4. Model ve Kontrolcünün Doğrulanması .....	42
6.4.1. Test Motoru Tarafı için Benzetim ve Test Sonuçları.....	42
6.4.2. Yük Motoru Tarafı için Benzetim ve Test Sonuçları.....	43
6.4.3. Kontrolcü Doğrulanması için Benzetim ve Test Sonuçları.....	45
<b>7. BULGULAR , YORUMLAR VE TARTIŞMALAR .....</b>	<b>48</b>
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>56</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>58</b>



## TABLÖLAR LİSTESİ

<b>Tablo 3.1:</b> Yüksüz En Fazla Hız Testi Denklemleri Sembolik Parametreler.....	8
<b>Tablo 3.2:</b> Vuruntu Momenti Testi Denklemleri Sembolik Parametreler.....	9
<b>Tablo 5.1:</b> Test Motoru Parametreleri.....	28
<b>Tablo 6.1:</b> Test Motoru Modellerinin Gösterimi.....	39
<b>Tablo 6.2:</b> Tasarlanan Kontrolcünün Parametreleri.....	41
<b>Tablo 7.1:</b> Test Ölçüm Senaryoları .....	49
<b>Tablo 7.2:</b> MPC ve PID Tork Kontrolcileri Uygulanan Testlerdeki Mutlak Hatanın İntegrali Yöntemi ile Hesaplanan Tork Hata Miktarları.....	55



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1: EYB'nin Yapısı. ....	6
Şekil 3.2: Motor Tork-Hız Grafiği. ....	10
Şekil 3.3: EYB'deki Hız ve Tork Kontrolü Yapılan Bölümlerin Gösterimi. ....	11
Şekil 3.4: Tork - Hız Testi için Oluşturulan Diyagram ....	11
Şekil 3.5: Eksen Kaçıklıklarının Kaplinle Tolere Edilmesi.....	13
Şekil 4.1: Örnek MPC Modeli .....	14
Şekil 4.2: Tahmin Ufuğunun Grafik Üzerinde Gösterimi. ....	22
Şekil 4.3: Sınırların Grafik Üzerinde Gösterimi.....	24
Şekil 4.4: MPC Bloğu ve Parametrelerin Açıklaması. ....	25
Şekil 4.5: Sistem Girdi ve Çıktılarının Belirtilmesi. ....	25
Şekil 4.6: MPC Kontrolcüsünün Değişkenlerinin Ayarlanması.....	26
Şekil 5.1: Motor Test Düzeneginin Görünüşü.....	27
Şekil 5.2: EYB Sisteminin Gösterimi.....	29
Şekil 5.3: İzlenen Deneysel Çalışmanın Adımları.....	29
Şekil 6.1: Test Motoru Tarafının Blok Diyagram ile Gösterilmesi.....	32
Şekil 6.2: Blok Diyagramın İndirgenmesi.....	32
Şekil 6.3: Sistemin Modelinin Çıkarılması.....	32
Şekil 6.4: Yük Tarafının Modellenmesi.....	33
Şekil 6.5: Yük Motoru Tarafı Blok Diyagramı.....	33
Şekil 6.6: Sistem Tanımlama Adımları.....	35
Şekil 6.7: PRBS Sinyali Genliği ve Güç Spektrumu Yoğunluğu Gösterimi.....	36
Şekil 6.8: Test Motoru için Gerçek Zamanlı Test Blokları.....	38
Şekil 6.9: Yük Motoru Tarafı için Sistem Tanımlama Test Blokları.....	40
Şekil 6.10: Test Motoru Tarafı için Kullanılan Benzetim Blokları.....	42
Şekil 6.11: Test Motoru Tarafı için Kullanılan Gerçek Zamanlı Test Blokları.....	42
Şekil 6.12: Adım Referanslı Pozisyon ve Akım Test Sonuç Grafikleri.....	43
Şekil 6.13: Yük Motoru Tarafı için Kullanılan Benzetim Blokları.....	44
Şekil 6.14: Yük Motoru Tarafı için Kullanılan Gerçek Zamanlı Test Blokları.....	44
Şekil 6.15: Adım Referanslı Tork ve Akım Test Sonuç Grafikleri.....	45
Şekil 6.16: MPC Tork Kontrolcü için Kullanılan Benzetim Blokları.....	45
Şekil 6.17: MPC Tork Kontrolcü için Kullanılan Gerçek Zamanlı Test Blokları.....	46
Şekil 6.18: 0.7Nm'lik Tork Referanslı Gerçek Zamanlı Test Sonuçları.....	47

<b>Şekil 7.1:</b> Gerçek Zamanlı Tork-Hız Testleri'nde Kullanılan Test Blokları .....	48
<b>Şekil 7.2:</b> 0.1Nm Tork ve 100rpm Hız Referansı için Tork ve Akım Grafiği.....	50
<b>Şekil 7.3:</b> 0.1Nm Tork ve 100rpm Hız Referansı için Hız ve Akım Grafiği.....	50
<b>Şekil 7.4:</b> 0.3Nm Tork ve 500rpm Hız Referansı için Tork ve Akım Grafiği.....	51
<b>Şekil 7.5:</b> 0.3Nm Tork ve 500rpm Hız Referansı için Hız ve Akım Grafiği.....	52
<b>Şekil 7.6:</b> 0.5Nm Tork ve 500rpm Hız Referansı için Tork ve Akım Grafiği.....	53
<b>Şekil 7.7:</b> 0.5Nm Tork ve 500rpm Hız Referansı için Hız ve Akım Grafiği.....	53
<b>Şekil 7.8:</b> 0.5Nm Tork ve 750rpm Hız Referansı için Tork-Akım Grafiği. ....	54
<b>Şekil 7.9:</b> 0.5Nm Tork ve 750rpm Hız Referansı için Hız ve Akım Grafiği.....	55



## KISALTMALAR

<b>ARC</b>	:	Adaptive Robust Controller
<b>BLDC</b>	:	Brushless Direct Current
<b>ELS</b>	:	Electrical Load Simulator
<b>EYB</b>	:	Elektriksel Yük Benzetimcisi
<b>IO</b>	:	İnput - Output
<b>KP</b>	:	Kuadratik Programlama
<b>MPC</b>	:	Model Predictive Control
<b>PID</b>	:	Proportional Integral Derivative
<b>PRBS</b>	:	Pseudo Random Binary Sequences
<b>SAGE</b>	:	Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü

## ÖZ

# DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN ELEKTRİKSEL YÜK BENZETİMCİSİ (EYB) TASARIMI VE KONTROLÜ

Selen AKYILDIZ

Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü

Ankara, Şubat 2021

Motorlara olan ihtiyaçların artmasıyla birlikte motor performanslarının doğrulanmasında kullanılan Elektriksel Yük Benzetimcileri'ne (EYB) olan ihtiyaçlar da artmıştır. EYB kullanımları sırasında bazı sorunlarla karşılaşmaktadır. Karşılaşılan sorunlardan biri de bozucu momentlerin sistemin kontrolünü zorlaştırmasıdır. Tezde EYB sistemine etki eden bu bozucu momentleri tolere edebilecek bir tork kontrolcüsünün tasarımından bahsedilmiştir. Kontrolcü tasarımında Model Öngörülü Kontrol (*İng. Model Predictive Control, MPC*) yöntemi kullanılmıştır. Tez çalışmasında ilk olarak EYB sistemi tanıtılmış ve EYB ile yapılabilen motor testlerinden ve Model Öngörülü Kontrol'den bahsedilmiştir. Daha sonra EYB sisteminin sistem tanımlama uygulamaları ile modelleri çıkarılmış ve bu modeller benzetim ve gerçek zamanlı testler ile doğrulanmıştır. Çıkarılan modeller üzerinden bir MPC tork kontrolcüsü tasarlanmıştır. Tasarlanan MPC tork kontrolcüsü EYB sisteminde tork-hız testinde denenmiştir. Daha sonra Tork-Hız Testi'ndeki performansı, karşılaştırma amaçlı sentezlenen Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol (*İng. Proportional-Integral-Derivative Control, PID*) tork kontrolcüsünün Tork-Hız Testi'ndeki performansı ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda MPC tork kontrolcüsünün PID tork kontrolcüsüne göre daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler** : Elektriksel Yük Benzetimcisi (EYB), Model Öngörülü Kontrol (MPC), Tork Kontrolü, Sistem Modelleme, Doğru Akım Motorları.

Bilim Kodu : 91418

Sayfa Sayısı : 59

Tez Danışmanı : Doc. Dr. Tuncay KARAÇAY

## ABSTRACT

### DESIGN AND MODEL PREDICTIVE CONTROL OF ELECTRICAL LOAD SIMULATOR (ELS) FOR DIRECT CURRENT MOTOR

Selen AKYILDIZ

National Defence University, Alparslan Defence Sciences Institute

Ankara, February 2021

With the increase in the need for motors, the need for Electrical Load Simulators (ELS) used in the verification of motor performance has also increased. Some problems are encountered during the use of ELS's. One of the problems encountered is that disturbing moments make the system difficult to control. In the thesis, the design of a torque controller that can tolerate these disturbing moments affecting the ELS system is mentioned. Model Predictive Control (MPC) method was used in controller design. In the thesis study, the ELS system was first introduced and the motor tests and Model Predictive Control that be done with ELS were mentioned. Then, the system identification applications and models of the ELS system were created and these models were verified by simulation and real-time tests. An MPC torque controller was designed on the models that have been released. The designed MPC torque controller was tested in the torque-speed test in the ELS system. Then, its performance in the Torque-Speed Test was compared with the performance of the Proportional-Integral-Derivative Control (PID) torque controller synthesized for comparison purposes in the Torque-Speed Test. As a result of the comparisons, it is seen that the MPC torque controller performs better than the PID torque controller.

**Keywords :** Electrical Load Simulator (ELS), Model Predictive Control (MPC), Torque Control, System Modeling, Direct Current Motors.

Science Code : 91418

Pages : 59

Supervisor : Doc. Dr. Tuncay KARAÇAY

## 1. GİRİŞ

Günümüz teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte eyleyicilere olan ihtiyaçlar da çeşitlenmiş ve artmıştır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda tasarlanan ve üretilen yeni motorlar ise beraberinde motor performanslarını ölçebilecek yük benzetimcilerine olan ihtiyacı ortaya koymuştur. Oluşan bu ihtiyacın karşılanması için yük benzetimcileri tasarlanmıştır.

Yük benzetimcileri mekaniksel ekipmanların davranışlarının belirli koşullar altında ölçülmesinde kullanılan sistemlerdir. Testler ile elde edilen ölçümler sistem davranışlarını sayısal sonuçlar ile ortaya koyar. Kullanım alanlarına göre yük benzetimcileri elektrohidrolik, pnömatik ve elektromekanik yük benzetimcisi olmak üzere değişmektedirler. Hidrolik yük benzetimcileri genellikle yüksek tork gerektiren sistemlerde tercih edilen, gürültülü ve bakım gerektiren sistemlerdir. Elektromekanik benzetimciler ise yükteki hızlı değişimleri izleyebilmesi ve düşük gürültü seviyelerinde çalışabilmesi sebebiyle diğer yük benzetimcilere nispeten öncelikli olarak tercih edilmektedir (Mare, 2006).

Tezde bahsedilen Elektriksel Yük Benzetimcileri (EYB) yani elektromekaniksel yük benzetimcileri ise eyleyicinin farklı koşullar altındaki çalışma şeklini öğrenmek ve performans özelliklerinin doğrulanması için tasarlanmıştır. EYB sistemi motorlara hem yüksüz hem de yük altında test yapabilme imkanı sunabilmektedir. Bu da motorun performansı hakkında kullanıcıya bilgi vermektedir.

EYB sisteminde tork ve hız testlerinin yapılması sırasında sistemde istenmeyen ve sisteme bozucu etki olarak yansıyan momentlerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan bu momentler sistemin çalışma performansını etkilediği gibi sistemin kontrol edilmesini de zorlaştırmaktadır. Literatürde istenmeyen dış momentlerin azaltılması için birçok kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan bu kontrolcülerin yanında gelecek tahminlerine dayalı bir kontrolcü olan MPC yöntemi ile tasarlanan kontrolcünün de istenmeyen torkları tolere etmek için daha kullanışlı ve tork referansını daha küçük hatalarla takip eden bir kontrolcü ile hatanın azaltılabileceği değerlendirilmiştir. Bu

doğrultuda bu tezde, motor Tork-Hız Testi için hali hazırda kullanılan ve tez kapsamı dışında önceden tasarlanmış bir PID hız kontrolcüsüne karşı çalışacak bir MPC tork kontrolcüsü tasarlanmış ve sisteme uygulanmıştır. Daha sonra kontrolcünün performansı PID kontrolcü ile karşılaştırılarak sonuçlar paylaşılmıştır.

Tezde ilk olarak EYB sisteminin tasarımından ve sistemde kullanılan alt bileşenler anlatılmış ve EYS'de yapılmakta olan testlerden bahsedilmiştir. Ardından MPC ile ilgili teoriye dayalı bilgiler verilip MPC tasarımı için kullanılan arayüzün kullanımı anlatılmıştır. Sonraki kısımda EYB sistemine ait modeller sistem tanımlama uygulamaları ile elde edilmiştir. Elde edilen bu modeller benzetimler ve gerçek zamanlı testler ile doğrulanmış ve modellere uygun MPC tork kontrolcüsü tasarlanmıştır. Son olarak tasarlanmış olan MPC tork kontrolcüsü, Tork-Hız Testi'nde uygulanmış ve sonuçlar PID tork kontrolcüsü kullanılan testler ile karşılaştırılıp yorumlanmıştır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yük benzetimcilerinin kullanım alanları çok geniştir ve literatürde farklı tarzlardaki yük benzetimcileri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Yük benzetimcilerinin EYB, elektro-hidrolik yük benzetimcileri ve pnömatik yük benzetimcileri gibi çeşitleri bulunmaktadır. EYB sistemleri düşük torklar altında güvenilirlik, doğruluk ve süreklilik avantajlarına sahiptirler. Bu nedenle yüksek tork isterinin bulunmadığı durumda EYB öncelikli olarak tercih edilmektedirler.

Literatürde genellikle EYB sistemlerinin kontrolü sırasında sıkça karşılaşılan sürtünme, sisteme gelen bozucu moment ve belirsiz parametreler gibi problemlerin çözümü için çalışmalar yapılmıştır. Doğrusal olmayan sürtünmelerin modellenmesi için LuGre sürtünme modeli kullanılmış ve farklı kontrol yöntemleri denenerek bozucu momentlerin etkisi azaltılmaya çalışılmıştır. Doğrusal olmayan sürtünme ve dışardan gelen momentler Bulanık Mantık Sistemi (*İng. Fuzzy Logic System*) kullanılarak tahmin edilmiş ve LuGre sürtünme modeli kullanarak bu tahmin edilen momentlerin doğrulamasını gerçekleştirilmiştir (Ullah, Wang, & Aslam, 2011). Uyarlamalı Tahmin (*İng. Adaptive Prediction*) yöntemini kullanılarak bozucu momentte ise %90 oranında azalma elde edilmiştir (Yang & Wang, 2011). Farklı bir araştırmada tekrar doğrusal olmayan LuGre sürtünme modeli kullanılmıştır. EYB sistemi için Geri Adımlamalı Kontrolcü (*İng. Back Stepping Controller*) tasarlanmış ve kontrolcünün doğruluğu deneylerle ortaya koyulmuştur. Kontrolcünün geçici ve kalıcı durum performansları için oldukça etkili olduğunu görülmüştür (Ullah & Wang, 2013).

EYB sisteminin belirsiz parametrelerinin tahmini kontrol performansının artırılmasına katkıda bulunabilmektedir. Belirsiz parametrelerin tahmini için uygulanan farklı uygulamalar vardır. Ullah N.K., (2014) sürtünme, bozucu momentlere ve belirsiz değişkenlere sahip olan EYB sisteminin kontrolü için Kesir Dereceli Uyarlamalı Gürbüz tork kontrolcüsü kullanmayı önermiştir. Bozucu moment değerini ve belirsiz parametrelerin belirlenmesi için Uyarlamalı Bulanık Sistem

kullanmıştır. Parametre belirsizlikleri ile ilgili Ullah ve diğ., (2015) EYB'ye takip performansını arttırmak amacıyla bulanık geri adım kontrolcüsü uygulamıştır. Belirsiz parametrelerin bilinmesi için ise Cebirsel Değişkenler Uyum algoritması kullanmıştır. Bu şekilde izleme hatasını düşürmüştür. Ullah, (2013) ise EYB ve sürtünmelerin modellenmesinde yapılan hatalar ve belirsiz parametreler nedeniyle kontrol sırasında oluşan hatalar ile karşılaşılmasını için çalışmalar yapmıştır. Geri Adım Uyarlamalı Kontrol (*İng. Adaptive Backstepping Control*) yöntemi kullanarak geçici yanıtı garantilemiştir. EYB'nin parametrik denklemlerinden yüksek dereceli hata dinamikleri tabanlı geri adımlamalı tork kontrolcüsü türetmiş kararlılığını ise Lyapunov metodu kullanarak sağlamıştır. Benzetimler sonucunda ise tasarlanan kontrolcünün EYB'nin geçici ve kalıcı performansı için verimli olduğunu ortaya koymuştur.

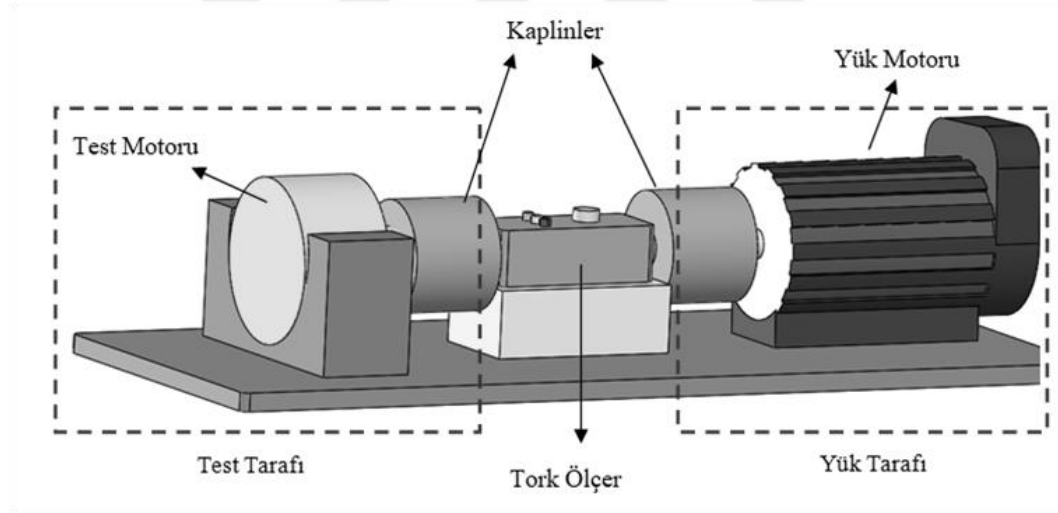
Bozucu momentler EYB sisteminin çalışmasını yüksek oranda olumsuz etkilemektedir. Bozucu momentler hareket olmasa bile sistemin doğası gereği oluşan ve sistemde istenmeyen değerlerdir. Birçok araştırmada bozucu momentlerin azaltılması veya kontrol edilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Wang ve diğ., (2009) dışarıdan gelen bozucu momenti Hız Döngülü Telafi (*İng. Velocity Loop Compensation*) yöntemi uygulayarak azaltmayı hedeflemiştir. Bir çalışmada Orantılı Rezonans (*İng. Proportional Resonant*) Kontrolcü uygulanmış ve sonuçların Sinir Ağları (*İng. Neural Network*) Kontrolcüsü ve Uyarlamalı Gürbüz Kontrolcü (*İng. Adaptive Robust Controller, ARC*) uygulanmış testlere göre daha iyi olduğunu görmüştür (Wang L. , Wang, Guo, Wang, Wang, & Li, 2017). Diğer bir çalışmada bozucu etkiler için sürekli sürtünme modeli türetilmiş ve model üzerinde uygulanan ARC ile bu bozucu etkiler etkisiz hale getirilmeye çalışılmıştır (Wang & Wang, 2011). EYB sisteminin gürbüzlüğü ve hassas tork takibini sağlayabilmesi için gerekli olan etkili kontrol methodunu sunmuştur. Deneyler sonucu ARC'nin PID kontrolcüye göre hataları daha iyi bir şekilde azalttığı tespit edilmiştir. EYB sistemindeki fazla torkun düşürülmesi için sisteme İleri Beslemeli Telafi Kontrol (*İng. Feedforward Compensation Control*) uygulamıştır. Kontrol sisteminin performansının geliştirilmesi için değişmez teoriye dayalı çoklu kanallı ileri beslemeli hareket kontrolcüsü tasarlanmıştır (Wei, 2013).

Bir çalışmada EYB performansını sürücü kartının etkilediği düşüncesiyle sürücü kartının ihtiyacı olan hızı sağlanması için çalışmalar yapılmıştır (Wang, Wang, & Guo, An Electric Load Simulator with Fast Dynamic Response Based on Matrix Converter, 2018). EYB'nin referansının ve harici bozucu etkinin dinamik olarak değişmesi nedeniyle, sürücü devresinin hızının dinamik yanıt üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koyulmuştur. Kullanılan sürücü devresi nedeniyle hız kısıtlanması problemini ortadan kaldırmak için matris dönüştürücü kullanılmıştır. Sürücü devresi olarak matris dönüştürücü kullanarak EYB'nin dinamik performansını etkili bir şekilde arttırılabileceği doğrulanmıştır.

Literatürde EYB ile ilgili birçok çalışma vardır. Çalışmaların genelinde sistemde oluşan bozucu momentten kaynaklanan hatayı azaltmak ve sistemin kontrolünü kolaylaştırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Tezde tahmine dayalı bir kontrolcü olan MPC tork kontrolcüsü ile bozucu momentlerin büyük oranda tolere edilebileceği düşünülmüştür. Bu amaçla tasarlanan MPC tork kontrolcünün gerçek zamanlı testi yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

### 3. ELEKTRİKSEL YÜK BENZETİMCİSİ

Tezde anlatılan EYB sistemleri Hall tipi sensöre sahip Fırçasız Doğru Akım Motorları'nın (*İng. Brushless Direct Current Motors, BLDC*) test edilmesinde kullanılan sistemlerdir. EYB'ler genel olarak Şekil 3.1'deki gibi tork uygulayan yük motoru, test motoru, tork ölçer ve miller arasında bulunan kaplinlerden oluşmaktadır. EYB'nin bir ucunda yük uygulayan motor yer alırken diğer ucunda test edilecek olan test motoru bulunur. Motorlar kaplinler yardımıyla benzetimcide bulunan tork ölçer sensöre bağlanmaktadır. Motorların milleri arasında oluşan tork farkı bu tork ölçer tarafından ölçülür. Anlatım kolaylığı için sistem test ve yük tarafı olmak üzere isimlendirilmiştir.



**Şekil 3.1: EYB'nin Yapısı.**

EYB sistemi kullanıcıya motorlar için farklı performans testleri yapabilme imkanı sunmaktadır. Yapılan testlere göre EYB'nin bağlantıları değişmektedir. Bazı testler için sadece test motoru ile test yapılırken bazı testlerde yük uygulayan motor sisteme dahil edilir. Bazı testlerde ise yük motoru sisteme dahil edilmez ve test motoru milinden dönemeyecek şekilde sabitlenir. EYB sisteminde genel olarak aşağıdaki testler yapılabilmektedir.

- Yüksüz En Fazla Hız Testi (*İng. No Load Speed Test*)
- Vuruntu Momenti Testi (*İng. Cogging Torque Test*)
- Zıt EMK Testi (*İng. Back EMF Test*)
- Sürekli Durdurma Torku Testi (*İng. Continuous Stall Torque Test*)
- Tork-Akım Testi (*İng. Torque-Current Test*)
- Tork-Hız Testi (*İng. Torque-Speed Test*)

### 3.1. Yüksüz En Fazla Hız Testi

Yüksüz En Fazla Hız Testi, test motoru yüksüz durumdayken yapılır, yani motora dışardan uygulanan tork sıfırdır. Test motoruna yüksüz akım değeri (*İng. No Load Current*) verilir. Verilen akım değeri ile motor en yüksek hız değerine çıkabilmesi gözlenir. Motorlara ait genel devre denklemi (3.1)'deki gibidir. Motor yüksüz hız seviyesine ulaştıktan sonra akım değişiminin sıfır olmasından dolayı  $\frac{L di}{dt} = 0$ 'dır. Denklem (3.2) ve (3.3), denklem (3.1)'de yerine konulursa (3.4) denklemi elde edilir.

$$V = R I_m + E_b + \frac{L di}{dt} \quad (3.1)$$

$$T_m = K_t I_m \quad (3.2)$$

$$E_b = K_e \omega_m \quad (3.3)$$

$$V = R \frac{T_m}{K_t} + K_e \omega_m \quad (3.4)$$

Motor mili boшта döndüğü ve motora iç sürtünmelerini yenmek için ihmal edilecek kadar küçük bir akım verildiği için  $T_m \approx 0$ 'dır.  $T_m$  değerini (3.4)'te yerine koyarsak Yüksüz En Fazla Hız Testi denklemi (3.5)'teki gibi olur.

$$V = K_e \omega_m \quad (3.5)$$

**Tablo 3.1: Yüksüz En Fazla Hız Testi Denklemleri Sembolik Parametreler**

V	Motor besleme gerilimi [V]
$E_{a,b,c}$	Zıt EMK gerilimi [V]
$I_m$	Motor devre akımı [A]
R	Motor devre direnci [ohm]
L	Endüktans [H]
$\omega_m$	Açısal hız [rad/s]
$T_m$	Motor torku [Nm]
$K_e$	Motor gerilim sabiti [V/rad/s]
$K_t$	Tork sabiti [Nm/A]

### 3.2. Vuruntu Momenti Testi

Vuruntu momenti fırçasız doğru akım motorundaki, rotor üzerindeki kalıcı mıknatıs ile statorun bobin yarıkları arasında oluşan hava boşluklarında meydana gelen tork kuvvetidir (Yedamale). Bu tork değeri motorun performansını olumsuz yönde etkilediği için motorda olabildiğince küçük olması istenmektedir.

Vuruntu momenti testinde test motoruna enerji verilmez ve düşük hızlarda yük motoru tarafından döndürülerek test motoru üzerinde oluşan moment tork ölçer ile ölçülür. Test motorunda  $i_m=0$  için Vuruntu Momenti denklemi (3.7)'deki gibidir. Ölçüm sonucunda oluşan vuruntu momenti değeri test motoru için değerlendirilir (Hsiao, Yeh, & Hwang, 2011).

$$R_i = \frac{1}{\mu A} \quad (3.6)$$

$$\tau_{cog} = -\frac{1}{2} \phi_g^2 \frac{dR_i}{d\theta_m} \quad (3.7)$$

**Tablo 3.2: Vuruntu Momenti Testi Denklemleri Sembolik Parametreler**

$\emptyset_g$	Hava Boşluğundaki Manyetik akı [Wb/m <sup>2</sup> ]
$R_i$	Relaktans [1/H]
$\theta_m$	Açısal pozisyon [rad]
$\mu$	Geçirgenlik [H/m]
$A$	Manyetik alan [m <sup>2</sup> ]
$\tau_{cog}$	Vuruntu momenti [Nm]

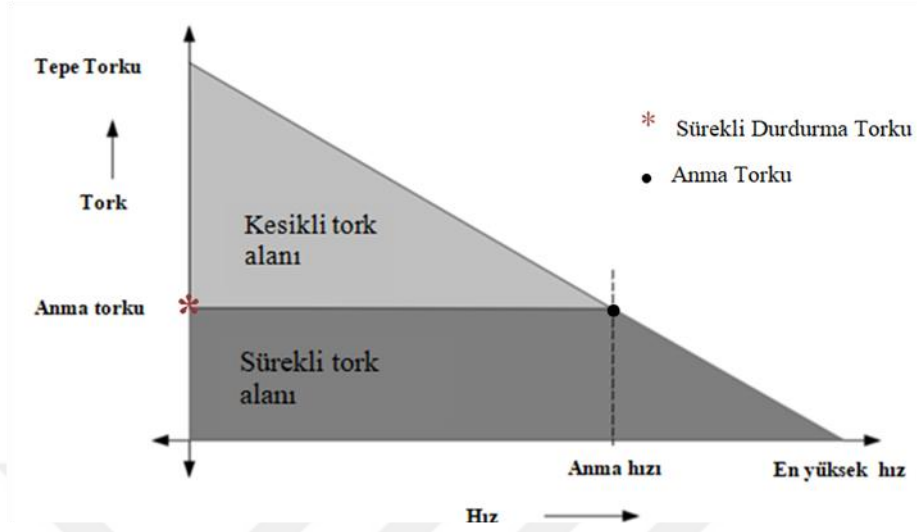
### 3.3. Zıt EMK Testi

Zıt EMK testi, test edilen motordaki faz geçişleri ile hall sensöründen alınan hall geçişlerinin uyumlu olduğunun kontrol edilmesi için gereklidir. Test ile motorun gerilim sabiti elde edilmektedir. Test motoruna enerji verilmeden, motor milinin dışardan döndürülmesiyle oluşan gerilimlerin ölçülmesi mantığına dayanmaktadır. Motorun mili döndürüldüğünde mıknatıslar tarafından oluşturulan manyetik alan çizgileri, rotorun hareketi ile kesilir. Bu durumda motorun hareketine ters yönde olacak şekilde gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilim motor çalışırken verilen gerilime ters yönde olduğu için Zıt EMK olarak isimlendirilir.  $K_e$  motor sabitinin hesaplanması için aktif iki fazın arasındaki en yüksek gerilim farkı hesaplanır. Denklem (3.3)'deki gerilim değerinde yerine koyulur. Testin yapıldığı hız değeri de denklemde yerine koyularak  $K_e$  değeri hesaplanır.

### 3.4. Sürekli Durdurma Torku Testi

Sürekli durdurma torku, motorun dönüş hızının sıfır olduğu değerdeki kararlı duruma geldiğinde sürekli olarak verebildiği tork değeridir. Sürekli durdurma testi sırasında tork ölçerin yük tarafındaki mili sabitlenir ve bu şekilde test motorunun milinin dönmesi engellenir. Test motoruna akım verilerek sürekli durdurma torku değeri kadar tork uygulanması sağlanır. Motorun sürekli durdurma torku değeri altında önceden belirlenen süre boyunca çalışma performansı kontrol edilir. Aynı zamanda motorun ulaştığı sıcaklık değeri de sensör yardımıyla ölçülür ve sıcaklık artışı gözlenir. Şekil

3.2’de sürekli durdurma torku değeri grafik üzerinde gösterilmiştir.



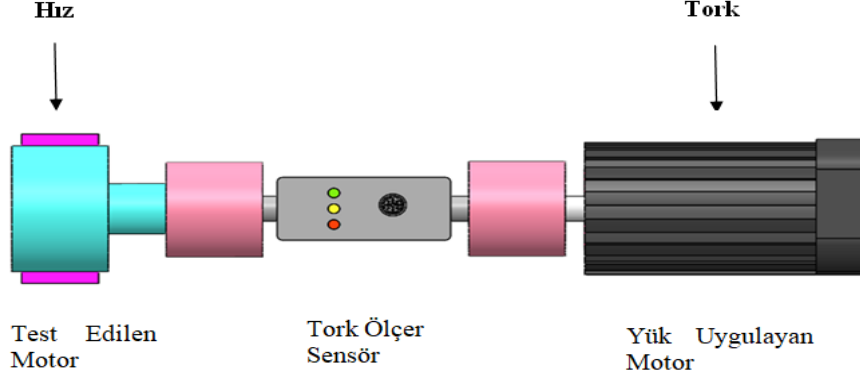
**Sekil 3.2: Motor Tork–Hız Grafiği.**  
(Yedamale)’den uyarlanmıştır.

### 3.5. Tork- Akım Testi

Tork-akım testinde amaç, karşı yük uygulayarak motora ait tork katsayısını doğrulamaktır. Test sırasında tork ölçerin yük tarafındaki mili sabitlenir ve bu şekilde test motorunun mili de sabitlenmiş olur. Akım değerleri arttırılarak test motoruna verilir. Tork ölçer ile ölçülmüş olan tork değerlerinden yararlanılarak bir grafik çıkarılır ve (3.6) denkleminde gösterildiği gibi verilen akım değerine karşılık oluşan tork değerleri motorun tork katsayısını verir.

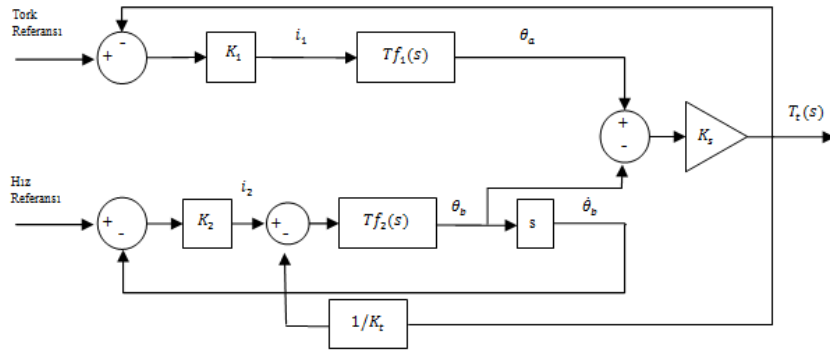
### 3.6. Tork-Hız Testi

Tork–Hız Testi’nin yapılmasındaki amaç, yük motoru tarafından uygulanacak tork altında, test edilen motorun belirlenen hızlara çıkabildiğini göstermektir. Tork-Hız Testi’nde yük motoru tarafında tork kontrolü yapılırken, test edilen motor tarafında ise hız kontrolü yapılır. Tork kontrolü için tork referansı, hız kontrolü için ise hız referansı sisteme verilir. Şekil 3.3’te tork ve hız kontrolü yapılan kısımlar gösterilmiştir. Test sırasında yük motoru ile test motorunun birbirine göre ters yönlerde dönmektedir.



**Şekil 3.3: EYB'deki Hız ve Tork Kontrolü Yapılan Bölümlerin Gösterimi.**

Tezde Tork-Hız Testi üzerinde durulmuş olup tork kontrolü için MPC tork kontrolcüsü tasarlanmış ve kullanılmıştır. Tork kontrolü sırasında yük motorundaki tork bilgisi EYB'deki tork ölçer ile sağlanmaktadır. Test motoru tarafında yapılan hız kontrolü için ise tez kapsamı dışında önceden tasarlanmış bir PID hız kontrolcüsü kullanılmaktadır. Hız kontrolü sırasında hız bilgisi test motorunun üzerindeki kodlayıcıdan alınmaktadır. Kodlayıcıdan okunan pozisyon bilgisinin türevi alınarak hız bilgisine ulaşılmaktadır. Tork-Hız Testi için oluşturulan blok diyagram Şekil 3.4'teki gibidir.  $K_1$  ve  $K_2$  sırayla tork ve hız kontrolcüleridir.  $Tf_1$  ve  $Tf_2$  ise sırasıyla yük motoru tarafı ve test motoru tarafı için sistem modelleridir.  $K_t$  ise yük motorunun tork sabitidir.  $\theta_a$  tork ölçerin test motoru tarafındaki milinin açısız pozisyonundaki değişimi ve  $\theta_b$  tork ölçerin yük motoru tarafındaki milinin açısız pozisyonundaki değişimidir.



**Şekil 3.4: Tork - Hız Testi için Oluşturulan Diyagram**

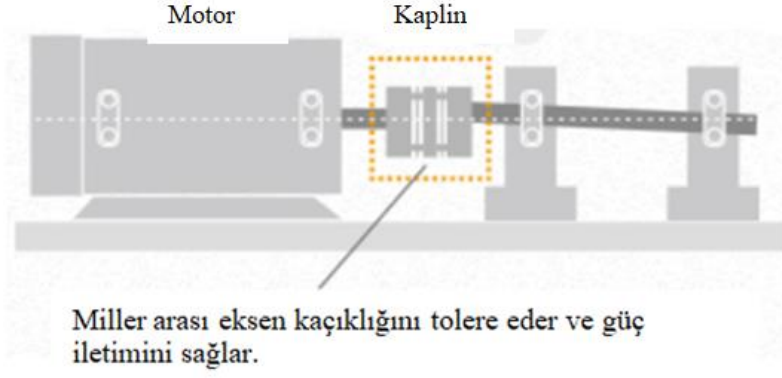
Tork-Hız Testi için çizilen blok diyagramından (3.8) denklemi çıkarılır.

$$T_t(s) = [Tf_1i_1(s) - Tf_2i_2(s)]K_s \quad (3.8)$$

### 3.7. EYB Tasarımı ve Bileşenleri

İdeal bir yük benzetimi sistemi tasarımından, öncelikli olarak sistemde yapılan test sonuçlarının güvenilirliğini ve sürekliliğini sağlaması beklenmektedir. Bu nedenle tasarım sırasında dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır.

- Sistemi oluşturan parçalardaki üretim toleransları olabildiğince hassas verilmeli ve bu şekilde eksen kaçıklığı olabildiğince en küçük değerde tutulmalıdır.
- Toleranslar doğrultusunda oluşabilecek en fazla hatanın sistemde kullanılacak kaplinler tarafından tolere edilebilmesi gerekmektedir. Hataları tolere edebilecek kaplinler kullanılmalıdır. Hizalanmama durumunda oluşabilecek eksen kaçıklıklarına ilişkin örnek Şekil 3.5'te gösterilmiştir.
- Bütünleme ve sökme işlemlerinin hızlı ve kolaylığı açısından mekanik parçalar arası bağlantıların mümkün olduğunca az olması ama oluşacak torca da karşı koyabilecek durumda olması gerekmektedir.
- Kullanılacak sensörlerin sistemden gelmesi beklenen en büyük değerleri ölçebilecek özellikte olmaları gerekmektedir.
- Sistemdeki kullanılan elektronik cihazlar (sürücü, güç kaynağı vb.) kullanıma uygun güç aralığında seçilmelidir.



**Sekil 3.5:Eksen Kaçıklıklarının Kaplinle Tolere Edilmesi.**  
(Miki Pulley)

EYB tasarımında düzeneğin elemanlarının hassas tolerans değerleri ile hizalanması gerekmektedir. Bu nedenle kaçıklıkların büyük oranda tolere edebilmesi için sistemde tork ölçerin her iki mili de kaplin ile bağlanmaktadır. Bağlanan kaplinlerin seçimi sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Kullanılacak olan kaplinin mümkün olduğunca eylemsizliği küçük ve çalışabildiği hız değeri uygun olmalıdır. Ayrıca kaplinin anma tork değeri (3.9)'daki şartı sağlaması faydalı olur.  $T_n$  değeri kaplinin nominal torku iken,  $T_y$  ise sistemde test edilecek en yüksek motor tork değeridir.

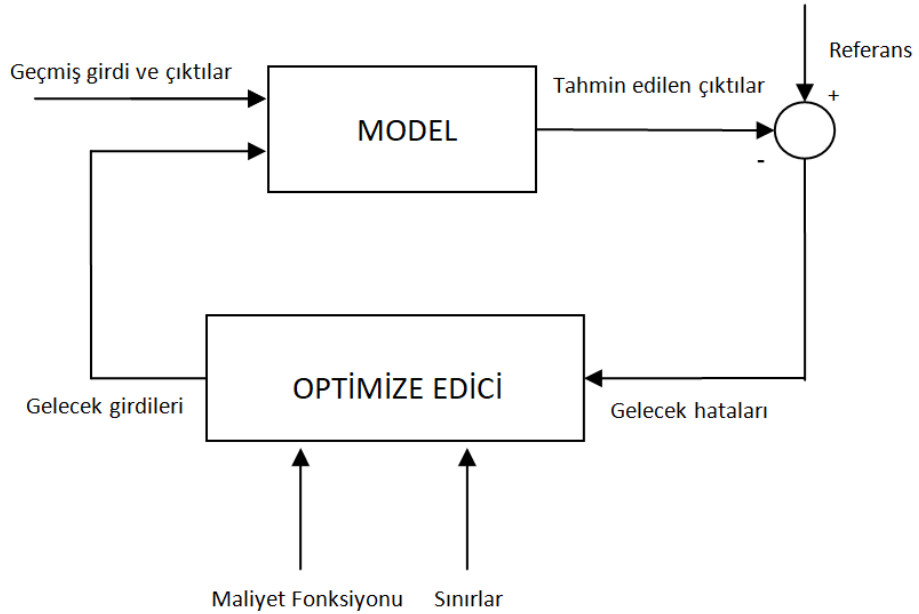
$$T_n > 1.5 T_y \text{ (Nm)} \quad (3.9)$$

Düzeneğin bir diğer elemanı tork ölçerdir. Sistemde, mil uçları arasında oluşan tork değerini ölçmek için kullanılmıştır. Kullanılacak olan tork ölçerin seçiminde ise sistemdeki oluşabilecek en yüksek tork değeri göre göz önünde bulundurulmalıdır. Tork ölçerin ölçebileceği en yüksek tork değeri sistemden beklenen en büyük değerden daha büyük olmalıdır. Aksi halde bu durum tork ölçer üzerinde kalıcı bir hatanın oluşmasına sebep olabilir.

#### 4. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL (MPC)

MPC modele dayalı bir kontrol yöntemidir. Bu kontrol yöntemi genellikle süreç gerektiren kimyasal işletmeler ve petrol rafineleri gibi alanlarda sıkça tercih edilmektedir. MPC'nin tasarlanması oldukça kolaydır ve ayrıca çok girdili ve çıktılı sistemleri çok değişkenle kontrol edilebilme imkanı sunar.

MPC'nin modele dayalı bir kontrolcü olması, sistem davranışlarını ortaya koyarken sistemin modelinden faydalanmasından ileri gelir. Gelecek kontrol girişlerini ve sistemin gelecek cevaplarını Şekil 4.1'deki gibi sistemin modeline ve performansına göre tahmin eder ve bu tahmin sırasında da optimizasyon temelli yöntemler kullanır. Bu yapılan tahminler belirlenen sınırlar çerçevesinde ve maliyet fonksiyonunu olabildiğinde en küçük değerinde tutulması amaçları doğrultusunda yapılır (Orukpe, 2012).



**Sekil 4.1: Örnek MPC Modeli**  
Orukpe(2012)'ten uyarlanmıştır.

Model öngörü temelli kontrolcüler temelde sistemin modeline dayalı olarak sistemin o andaki cevapları ve gelecek davranışlarıyla veya sisteme giren bozucu etkilerle ilgili tahminler yaparlar (Mikuláš O. , 2013). Bu nedenle MPC'nin temelinde tahmin algoritması yatmaktadır. Tahmin algoritmasından bahsederken ise tahmin, uzaklaşan ufuk (*İng. Receding Horizon*), optimizasyon, sınırlar ve maliyet fonksiyonunu gibi tanımlardan bahsetmek gerekmektedir.

Tanımlamalar yapılmadan önce vektör gösterimleriyle ilgili bir açıklama yapılmalıdır. Vektör gösterimleri sırasında ifade edilen değişkenin ilk indisi, tahmini yapılan verinin hangi örnek sayısına ait olduğunu gösterirken, ikinci indisi ise verinin hangi örnek sayısındaki veri için kullanıldığını göstermektedir. Örneğin  $x_{k+1lk}$  şeklinde gösterilen bir vektör için  $k+1$ 'inci örnek sayılı veri tahmini için  $k$ . verinin kullanıldığını göstermektedir.  $i$  adım kadar ileri ise (4.1)'deki gibi gösterilir.

$$x_{i+1Lr} = Ax_{iLk} + Bu_{iLk}, i = 0,1, \dots \quad (4.1)$$

#### 4.1. Tahmin ve Optimizasyon

Öngörülü kontrolcünün en önemli özelliği tahminlerde bulunmasıdır. Yapılan bu tahminler kontrolcü için sistemin gelecek davranışlarına ilişkin bilgi sağlamaktadır. Tahminlerin sayısı tahmin ufuğu (*İng. Prediction Horizon*) olarak isimlendirilir ve  $n_p$  ile ifade edilirler.

MPC kontrolcü klasik Durum-Uzay gösteriminde formüle edilen çözüm, çok değişkenli sistemin çözümünü kolaylaştırdığı için oldukça avantajlıdır. Yük motoru tarafı modelini Durum-Uzay Modeli şeklinde ifade etmek istersek sisteme ait (4.2) ve (4.3) genel denklemlerimizi kullanırız. Tork ölçerin test motoru tarafı kilit mekanizması ile sabitlendiğinden dolayı  $\theta_b = 0$  olarak alınır.

$$T_t = K_s(\theta_a - \theta_b) = K_s\theta_a \quad (4.2)$$

$$J_a\ddot{\theta}_a + B_a\dot{\theta}_a + T_t = T \quad (4.3)$$

Denklem (4.2) denklem (4.3)'te  $T_t$  yerine konulursa denklem (4.4) elde edilir.

$$J_a\ddot{\theta}_a + B_a\dot{\theta}_a + K_s\theta_a = K_t i \quad (4.4)$$

Daha sonra denklem (4.4), (4.6) denkleminde gösterildiği gibi (4.5)'e benzetilerek yazılırsa  $D_1, D_2$  ve  $D_3$ 'ün karşılıkları (4.7), (4.8) ve (4.9) denklemlerindeki gibi olur.

$$D_1\ddot{T} + D_2\dot{T} + D_3T = i \quad (4.5)$$

$$\underbrace{\ddot{\theta}_a \frac{J_a}{K_t K_s}}_{D_1} + \underbrace{\dot{\theta}_a \frac{B_a}{K_t K_s}}_{D_2} + \underbrace{\theta_a \frac{1}{K_t}}_{D_3} = i \quad (4.6)$$

$$D_1 = \frac{J_a}{K_t K_s} \quad (4.7)$$

$$D_2 = \frac{B_a}{K_t K_s} \quad (4.8)$$

$$D_3 = \frac{1}{K_t} \quad (4.9)$$

$z_1 = T$  ve  $z_2 = \dot{T}$  olarak alınırsa (4.5)'teki denklem (4.10) formuna, dönüşür. Burada  $z_2 = \dot{z}_1$ 'dir. Denklem (4.10) matris formda yazılırsa (4.11) denklemini elde edilir.

$$\dot{z}_2 = z_2 \left( -\frac{D_2}{D_1} \right) + z_1 \left( -\frac{D_3}{D_1} \right) + i \left( \frac{1}{D_1} \right) \quad (4.10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -D_3/D_1 & -D_2/D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/D_1 \end{bmatrix} i \quad (4.11)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

MPC'yi optimize etmek için modelimizin KP (Kuadratik Programlama) formuna benzetimi gerekmektedir. Bunun için model doğrusal zamanlı ayırık sistem olarak ifade edilmelidir. Diğer bir deyişle durum uzay matrisi şeklindeki denklem doğrusal zamanla değişmeyen ayırık sisteme (*İng. Linear Time Invariant Discrete System*) dönüştürülmelidir. Denklem (4.11)'deki sürekli zamanlı sistem modeli denklem (4.13)'teki gibi ifade edilip denklem (4.15)'teki forma göre tekrar yazılırsa denklem (4.16) elde edilir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix}}_{\dot{z}_k} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -D_3/D_1 & -D_2/D_1 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}}_{z_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1/D_1 \end{bmatrix}}_B u \quad (4.13)$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}}_{z_k} \quad (4.14)$$

$$z_{k+1} - z_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \dot{z}_k dt \quad (4.15)$$

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} \dot{z}_k dw = A \int_{t_k}^{t_{k+1}} z dt + B \int_{t_k}^{t_{k+1}} u dt \quad (4.16)$$

Denklem (4.15) ve denklem (4.16) denklemleri birbirine eşitlenirse denklem (4.17) elde edilir.

$$z_{k+1} - z_k = A \int_{t_k}^{t_{k+1}} z dt + B \int_{t_k}^{t_{k+1}} u dt \quad (4.17)$$

Denklem (4.17)'de bulunan  $\int_{t_k}^{t_{k+1}} z dt$  ve  $\int_{t_k}^{t_{k+1}} u dt$  kısımlarının ifadesini işlemsel olarak daha basit duruma getirmek için Trapezoidal Nümerik İntegral (*İng. Trapezoidal Rule*) hesaplama yöntemi uygulanırsa sırayla denklem (4.18) ve denklem (4.19) eşitlikleri elde edilir.

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} z dt = \frac{T_s}{2}(z_{k+1} + z_k) \quad (4.18)$$

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} u dt = \frac{T_s}{2}(u_{k+1} + u_k) \quad (4.19)$$

Denklem (4.18) ve (4.19), denklem (4.17)'de yerine konulur ve düzenlenirse denklem (4.19) elde edilir. Bu denklemde I birim matris,  $T_s$  ise örnekleme zamanıdır.

$$z_{k+1} = \underbrace{\begin{bmatrix} I - \frac{AT_s}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I + \frac{AT_s}{2} \end{bmatrix}}_{A_1} z_k + \underbrace{\begin{bmatrix} I - \frac{AT_s}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} BT_s \\ 2 \end{bmatrix}}_{B_1} [u_{k+1} + u_k] \quad (4.20)$$

Ayrık zamanlı denklem formuna dönüştürmek için  $z_k = x_k + x_{k+1}$  olarak alındığında, (4.20) denklemi (4.21) ve (4.22) denklemlerinin toplamı şeklinde yazılabilir. (Baskın, 2015).

$$x_{k+1} = A_1 x_k + B_1 u_k \quad (4.21)$$

$$x_{k+2} = A_1 x_{k+1} + B_1 u_{k+1} \quad (4.22)$$

Denklem (4.14) için ise denklem (4.23) gibi yazılır.

$$y_k = C z_k \quad (4.23)$$

Denklem (4.23) için  $z_k = x_k + x_{k+1}$  olarak yerine yazılırsa denklem (4.24) elde edilir.

$$y_k = C(x_k + x_{k+1}) \quad (4.24)$$

Denklem (4.24)'te  $x_{k+1}$  yerine (4.21) denklemi yazılırsa yeni denklem (4.25) gibi olur. Denklem düzenlenirse (4.27) denklemi elde edilir.

$$y_k = C(x_k + A_1 x_k) \quad (4.25)$$

$$y_k = \underbrace{C(I + A_1)}_{C_1} x_k \quad (4.26)$$

$$y_k = C_1 x_k \quad (4.27)$$

Denklem (4.28) ve (4.29)'da ayrık zamanlı doğrusal bir model ifade edilmiştir. Burada  $x_k$  durum değişkeni  $u_k$  girdi değişkeni ve  $y_k$  ise çıktı değişkeni olarak isimlendirilmektedir.  $A_1$  durum matrisi,  $B_1$  girdi matrisi ve  $C_1$  çıktı matrisi olarak isimlendirilmektedir.

$$x_{k+1} = A_1 x_k + B_1 u_k \quad (4.28)$$

$$y_k = C_1 x_k \quad (4.29)$$

n Adet örnek sayımız için ise u ve x vektörleri denklem (4.30) ve denklem (4.31)'deki gibi ifade edilir.

$$u_k = \begin{bmatrix} u_{0Lk} \\ u_{1Lk} \\ \vdots \\ u_{n-1Lk} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$x_k = \begin{bmatrix} x_{0Lk} \\ x_{1Lk} \\ \vdots \\ x_{nLk} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Her örnekleme anındaki durum (*İng. State*) ilk durum olarak denklem (4.32)'deki gibi atanır ve gerçek zamanlı kontrol sağlar.

$$x_{0Lk} = x_k \quad (4.32)$$

$x_{k+n}$  ve  $y_{k+n}$  vektörlerimizin açılımı denklem (4.33) ve denklem (4.34)'teki gibidir.

$$x_{k+nLk} = A_1^n x_k + A_1^{n-1} x_{kLk} + A_1^{n-2} x_{k+1Lk} + A_1 B_1 u_{k+n-2Lk} \dots \quad (4.33)$$

$$+ A_1 B_1 u_{k+n-1Lk}$$

$$y_{k+nLk} = CA_1^n x_k + C[A_1^{n-1} x_{kLk} + A_1^{n-2} x_{k+1Lk} + A_1 B_1 u_{k+n-2Lk} \dots \quad (4.34)$$

$$+ A_1 B_1 u_{k+n-1Lk}]$$

Burada  $CA_1^n x_k$  kısmının güncel ve geçmişe dayalı değerler olduğu için bilinirken, vektörün geri kalan kısmı gelecek değerlere bağlı olarak oluştuğu için bilinmeyen değerlerdir. Gelecekteki değerlerin vektörleri de oluşturulup matris ile gösterirsek

(4.35) ve (4.37) denklemleri elde edilir. Burada  $P_1, H_1, P_2$  ve  $H_2$  matrisleri durum ve çıktı matrisleri olarak isimlendirilmektedir. Matris formları daha kolay bir formda ifade edersek (4.36) ve (4.38) denklemleri elde edilir. Bu denklem sırasıyla sistemin durum ve çıktı tahmin denklemleridir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ x_{k+2} \\ \vdots \\ x_{k+p} \end{bmatrix}}_{x_{k+1,p}} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_1 \\ A_1^2 \\ \vdots \\ A_1^p \end{bmatrix}}_{P_1} x_k + \underbrace{\begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots \\ A_1 B_1 & B_1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ A_1^{p-1} B_1 & A_1^{p-2} B_1 & \dots \end{bmatrix}}_{H_1} \underbrace{\begin{bmatrix} u_k \\ u_{k+1} \\ \vdots \\ u_{k+p-1} \end{bmatrix}}_{U_1} \quad (4.35)$$

$$x_{k+1,p} = P_1 x_k + H_1 U_1 \quad (4.36)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_k \\ y_{k+1} \\ \vdots \\ y_{k+p-1} \end{bmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{bmatrix} C \\ CA_1 \\ \vdots \\ CA_1^{p-1} \end{bmatrix}}_{P_2} x_k \quad (4.37)$$

$$+ H \underbrace{\begin{bmatrix} D & 0 & 0 & \dots \\ CB_1 & D & 0 & \dots \\ CA_1 B_1 & CB & D & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ CA_1^{p-2} B_1 & CA_1^{p-3} B_1 & CA_1^{p-4} B_1 & \dots \end{bmatrix}}_{H_2} \underbrace{\begin{bmatrix} u_k \\ u_{k+1} \\ \vdots \\ u_{k+p-1} \end{bmatrix}}_{U_2}$$

$$Y = P_2 x_k + H_2 U_1 \quad (4.38)$$

MPC kontrolcünün amacı en düşük kontrolcü girdisi ile en yüksek sistem performansının elde edilmesidir. Bunu da optimizasyon ile sağlar. Her örnekleme anında bir optimizasyon problemi çözer ve en iyi tahmini yapmaya çalışır. Optimizasyon problemini elde edebilmek için kontrol problemini bir optimizasyon yöntemi olan KP formuna dönüştürmemiz gerekmektedir (Li, 2018). Bu da (4.39)'da verilen amaç fonksiyonumuzun (4.40)'ta verilen kuadratik form problemi genel denklemine benzetilmesi demektir.  $e$  Değişkeni hata vektörü ve  $U$  kontrol eylemleri dizisidir. Burada  $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$  ve  $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$  olup köşegen matrislerdir.

$$\min_{U_1} = (e^T Q e + U_1^T R U_1) \quad (4.39)$$

$$f(x) = \frac{1}{2} x^T F x + n^T x + C \quad (4.40)$$

Hata vektörü için genel denklem (4.41)'de verilmiştir. Denkleminde  $Y$  mevcut çıktı iken  $Y_d$  ise istenilen çıktıyı temsil etmektedir.

$$e = Y - Y_d \quad (4.41)$$

$Y$  değerini (4.38)'de tanımlamıştık. Hata denkleminizde  $Y$  yi yerine koyarsak (4.42)'yi elde ederiz.

$$e = P_2 x_k + H_2 U_1 - Y_d \quad (4.42)$$

Denklemin  $P_2 x_k - Y_d = q$  olarak alırsak denkleminiz (4.43)'teki gibi olur.

$$e = H_2 U_1 + q \quad (4.43)$$

Hata denklemi, (4.39)'da yerine konulursa (4.44) elde edilir.

$$\min_{U_1} = ((H_2 U_1 + q)^T Q (H_2 U_1 + q) + U_1^T R U_1) \quad (4.44)$$

Denklem (4.44)'ün (4.39)'da verilen KP denklemine benzetilmek için düzenlenir. Düzenlemeler sonucu denklem (4.49) elde edilir (Gu & Chen, 2020).

$$\min_{U_1} = ((H_2 U_1 + q)^T Q (H_2 U_1 + q) + U_1^T R U_1) \quad (4.45)$$

$$\min_{U_1} = (U_1^T H_2^T + q^T) Q (H_2 U_1 + q) + U_1^T R U_1 \quad (4.46)$$

$$\min_{U_1} = (U_1^T H_2^T Q H_2 U_1 + q^T Q H_2 U_1 + U_1^T H_2^T Q q + q^T Q q + U_1^T R U_1) \quad (4.47)$$

$$\min_{U_1} = U_1^T (H_2^T Q H_2 + R) U_1 + 2q^T Q H_2 U_1 + q^T Q q \quad (4.48)$$

$$\min_{U_1} = \frac{1}{2} U_1^T (2H_2^T Q H_2 + 2R) U_1 + 2q^T Q H_2 U_1 + q^T Q q \quad (4.49)$$

(4.49)'da verilen denklemde K köşegen matristir. KP genel denklemine benzetilmek için yazıldığında tekrar yazılırsa,  $F=H_2^T Q H_2 + R$  ve  $n^T=(2q^T Q H_2)^T M(x)$ 'dir. Denklem sınırları olmayan ağırlaştırılmış en küçük kareler yöntemi ile ifade edilirse (4.50) elde edilir (Gu & Chen, 2020).

$$\min_{U_1} = \frac{1}{2} U_1^T F U_1 + n^T U_1 + M(U_1)^T K M(U_1) \quad (4.50)$$

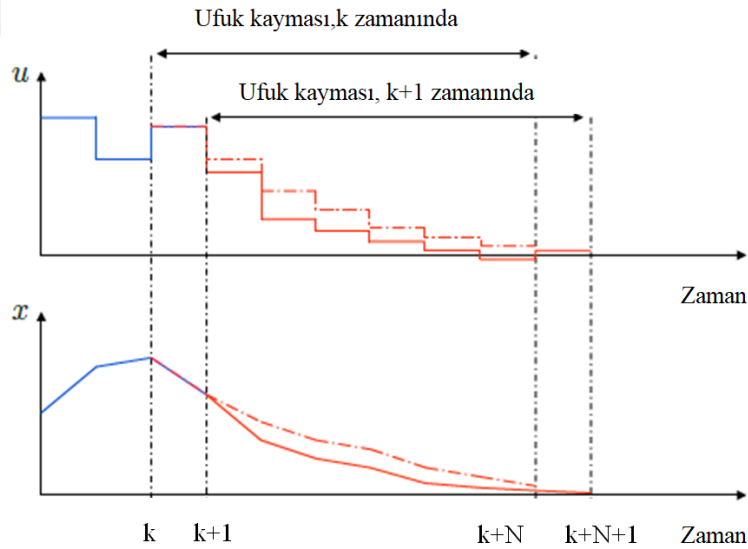
## 4.2. Uzaklaşan Ufuk Kavramı

Uzaklaşan ufuk kavramı MPC'nin sistemin gelecek davranışları hakkında tahminlerinden oluşan çıktı grubudur. Uygun giriş yörüngesi tahmin edildikten sonra sadece ilk eleman sisteme uygulanır, gerisi atılır. Bunun nedeni sadece ilk verinin gerçek veri olup geri kalan değerlerin tahmin sonucu oluşmuş olmasıdır. Uzaklaşan

ufuk MPC hesaplaması sırasında her adımda yeni tahminlerde bulunur. Yapılan tahminler her yeni gelen bilgilerle yenilenir (Bishop, 2005). Yeni oluşturulan tahminlerle ufuk ilerleyerek devam eder. Uzaklaşan ufuk kavramı da buradan gelmektedir.

Tahmin ufuğunun (*İng. Prediction Horizon*) kullanım amacına uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Doğru seçilmemesi durumunda sistemin çalışmasını olumsuz etkileyebilir. Örneğin tahmin ufuğunun sayının fazla olması maliyet fonksiyonunu arttırırken düşük olması ise sistemin agresifliğini arttırabilir (Ramasamy, 2019).

Tahminler için seçilen ufuğun performansının yeterli olabilmesi için yerleşme zamanı gibi tüm önemli dinamikleri de içermesi gerekmektedir (Ramasamy, 2019). Şekil 4.2'de ufuk kayması örneği verilmiştir. Yapılan tahminlerin sayısı ise ufuk sayısı olarak adlandırılır ve  $k$  olarak ifade edilmiştir. Yani ufuk  $k$  sayıda tahminde bulunmaktadır. Yeni veriler alındıkça ufuk kayması eksen üstünde ilerleyerek yeni tahminlerde bulunur.



**Şekil 4.2: Tahmin Ufuğunun Grafik Üzerinde Gösterimi.**  
Canon, (2016)'dan uyarlanmıştır.

### 4.3. Maliyet Fonksiyonu ve Sınırlar

Referansa göre oluşan hatalar maliyet fonksiyonu (*İng. Cost Function*) ve sınırlar (*İng. Constraints*) çerçevesinde optimizasyon bloğunda optimize edilir, modele verilir. Bu

döngü yeni tahminler yapıldıkça sürer. Pratikte en ideal MPC'yi oluşturmak için, maliyet fonksiyonun olabildiğince en düşük ve kontrolcü performansının ise en yüksek olduğu durumun sağlanması gerekmektedir.

Maliyet fonksiyonu tahmin edilen sistem çıktı kalitesini belirlemede kullanılan bir değerdir. Çıktı kalitesini sayısal yolla ortaya koyar. Maliyet fonksiyonunu performans indeksi olarak (4.51)'de olduğu gibi gösterebiliriz.

$$J = J_y + J_{\Delta u} \quad (4.51)$$

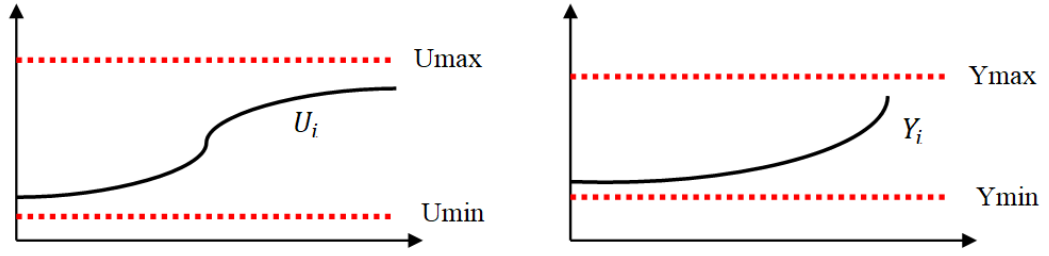
$J_y$ , sistemin referans değerini takip etmede ölçü olan terimdir. Referans takibi sırasında oluşan hatayı küçültmeye yarar. Yani mümkün olduğunca çıktı referans noktasına yaklaştırmaya çalışır.  $J_{\Delta u}$  girdi değişim oranıdır ve değiştirilmiş değişkenlerin artışını bastırmak için kullanılır. Denklem (4.39)'da verilen amaç fonksiyon cinsinden yazılırsa  $J$  denklem (4.52) gibi olur.  $n_p$  tahmin ufuğu sayısı ve  $n_c$  kontrol ufuğu sayısıdır (Ramasamy, 2019).

$$J = \sum_{i=k}^{k+n_p-1} e_i^T Q_i e_i + \sum_{i=k}^{k+n_c-1} U_i^T R_i U_i \quad (4.52)$$

Ağırlık değerleri değişkenleri hedef değeri olan değere yakın tutmak için kullanılan değerlerdir. Ağırlık değerleri bir bakıma girdi akımı ve cevap hızı arasındaki dengeyi sağlayan değişkenlerdir. Girdi ve çıktı ağırlıkları ile birlikte ağırlık oranı (*Ing. Rate Weight*) da değiştirilebilir. Girdi ve çıktı ağırlıkları hedefe olan yakınlığı değiştirirken ağırlık oranı ise değişkendeki değişim oranını sınırlar. Bu sınırlama kontrolcünün agresif olmasını ya da çok yavaş kalmasını engeller. Daha yumuşak değişimler göstermesini sağlar (Bemporad, Morari, & Ricker, 2000). Maliyet fonksiyonu bir bakıma ağırlık değerlerine ( $W$ ) de bağlıdır. Çünkü ağırlık değerlerinin yüksek olması, sistem izleme cevabının referans sinyalini izleme beceresini arttırırken aynı zamanda maliyet fonksiyonun artması anlamına gelir. Ağırlık değerleri arttıkça harcanılan enerji artar. Tam tersi durumda düşük ağırlık değerlerinin seçilmesi ise referans takibi sırasında hataların oluşumuna neden olabilir (Mendes, Catalão, Pouresmaeil, Oliveira, Rodrigues, & Pouresmaeil, 2015).

Sınırları kontrole dahil etmek MPC kontrolcü için iyi bir avantajdır. Sınırlar MPC'nin

hareket edebileceği değer aralığını göstermektedir. Sınırları yumuşak ve zor sınırlar olarak sınıflandırılır. Sisteme katı sınırlar dahil edilirse sistemi çok zorlayabilir. Sınırlar girdiler ve çıktılar için ayrı ayrı uygulanabilir. Bu sınırlar hem sisteme verilen değerler ve hem de sistemden elde edilen değerler için birer sınırdır. Sınırların Şekil 4.3'te grafiksel gösterimi, (4.53) ve (4.54)'te matematiksel gösterimi verilmiştir (Mendes, Catalão, Pouresmaeil, Oliveira, Rodrigues, & Pouresmaeil, 2015).



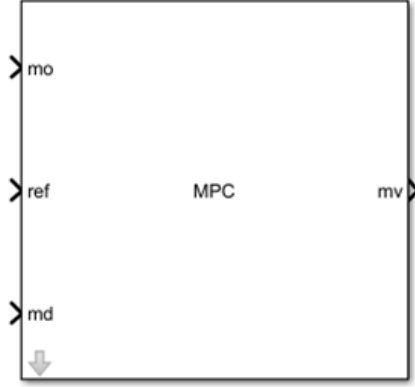
**Şekil 4.3: Sınırların Grafik Üzerinde Gösterimi.**

$$u = \{ u_i : u_{min} \leq u_i[k] \leq u_{max} \} \quad (4.53)$$

$$y = \{ y_i : y_{min} \leq y_i[k] \leq y_{max} \} \quad (4.54)$$

#### 4.4. MATLAB MPC Bloğu Kullanımı ve Uygulama

MPC uygulaması için 'MATLAB Simulink Toolbox'ta bulunan 'MPC Controller' kullanılmıştır. XPC Target yardımıyla veriler anlık olarak toplanmış ve kontrol uygulaması gerçekleştirilmiştir. MPC uygulaması için kullanılan blok Şekil 4.4'te verilmiştir. MPC bloğu MATLAB'in Simulink kütüphanesi üzerinden eklenir.



**mo:** Ölçülen çıktı değeridir.

**ref:** Kontrolcünün izlemesi beklenen sinyaldir.

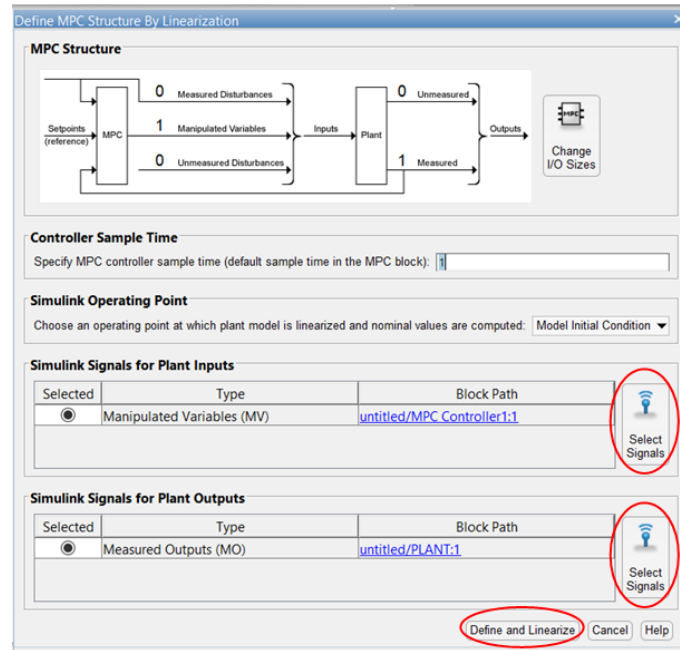
**md:** Ölçülen gürültü sinyalidir.

**mv:** İşlenen çıktı sinyalidir.

#### **Sekil 4.4: MPC Bloğu ve Parametrelerin Açıklaması.**

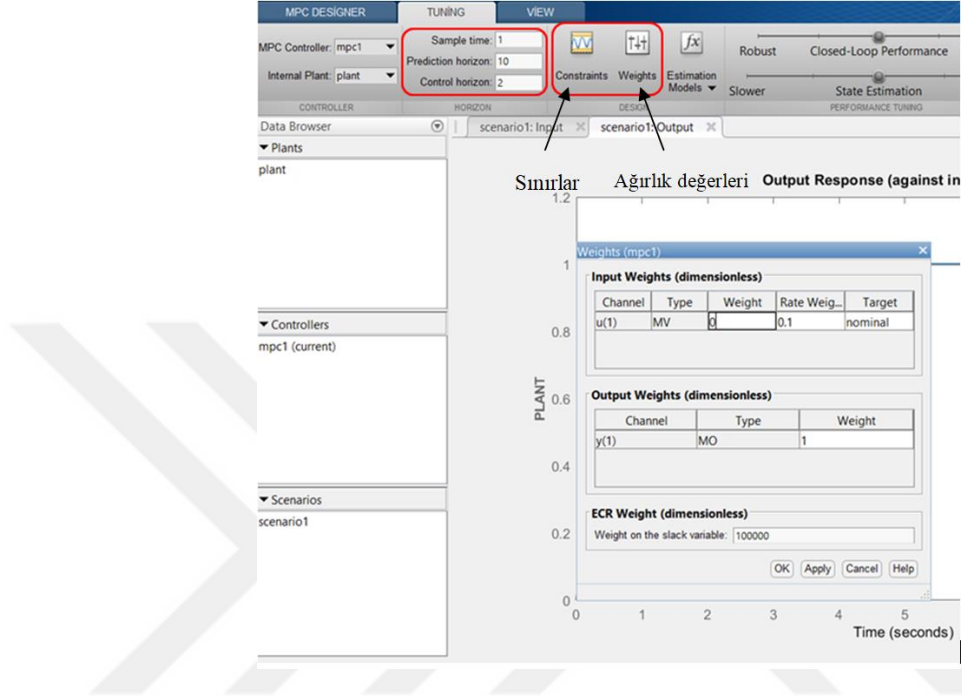
(Mendes, Catalão, Poursmaeil, Oliveira, Rodrigues, & Poursmaeil, 2015)

MPC bloğuna çift tıklanarak gelen ekran üzerinden ‘Design’ segmesine tıklanır ve Şekil 4.5 ekrana gelir. Gelen bu ekrandan ‘Selected Signal’ segmelerine sırayla tıklanır ve MV için sisteme girdi sinyali ,MO için ise sistemden çıkan çıktı sinyali seçilir. ‘Add Signal’ segmesi tıklanarak sinyaller eklenir. Sinyal ekledikten sonra ‘Define and Linearize’ tuşuna basıldığında MPC yapısı oluşturulmuş olur.



**Şekil 4.5: Sistem Girdi ve Çıktılarının Belirtilmesi.**

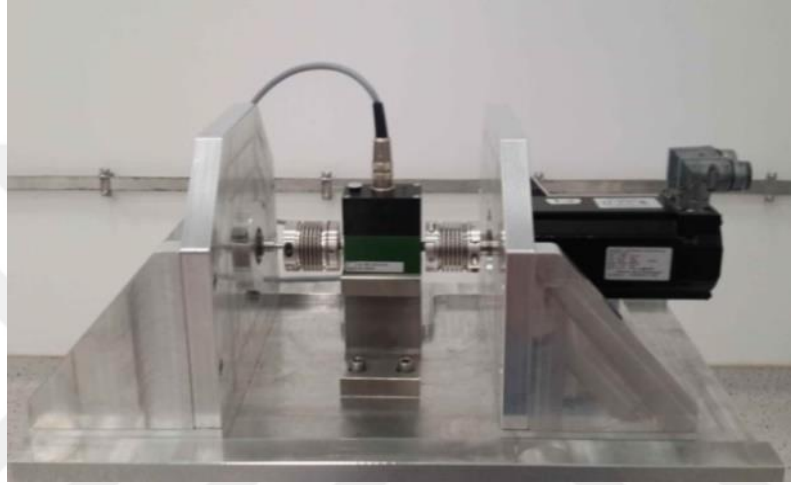
MPC yapısında girdi ve çıktı senaryolarına göre Şekil 4.6'daki gibi 'Tuning' sekmesinde 'Tahmin Ufuzu' ve 'Kontrol Ufuzu' değerleri, Sınırlar ve Ağırlık Değerleri bu sekmeden girilebilir. Girilen değerlerle oluşturulan MPC kontrolcünün girdiye ve çıktıya etkisi ekrandan görülebilir.



Şekil 4.6: MPC Kontrolcüsünün Değişkenlerinin Ayarlanması.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan deneysel çalışmalara EYB sisteminin tasarımı ile başlanmıştır. Tez için kullanılan EYB test düzeneğinin görünüşü Şekil 5.1'deki gibidir.



**Şekil 5.1: Motor Test Düzeneğinin Görünüşü.**

Sistemde kullanılan elemanların seçimi sistemde test edilecek motorların çalışma hızları ve sistemden beklenen en fazla tork değerleri doğrultusunda yapılmıştır ve 5Nm'lik ölçüm yapabilen tork ölçer sensör seçilmiştir. Kaplin seçiminde anma torku minimum 8Nm olmak üzere eylemsizlik momenti  $0.016 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$  olan iki adet yaylı kaplinler kullanılmaktadır. Motorlar ve tork ölçer aynı eksende hizalanacak şekilde bir tasarım yapılmıştır. Toleranslardan ve üretimden kaynaklanan eksen kaçıklıkları kaplinler tarafından tolere edilebilecek ölçü aralığında sınırlı tutulmuştur. Kaplinler ve tork ölçer seçiminden sonra test motoru seçimi yapılmıştır.

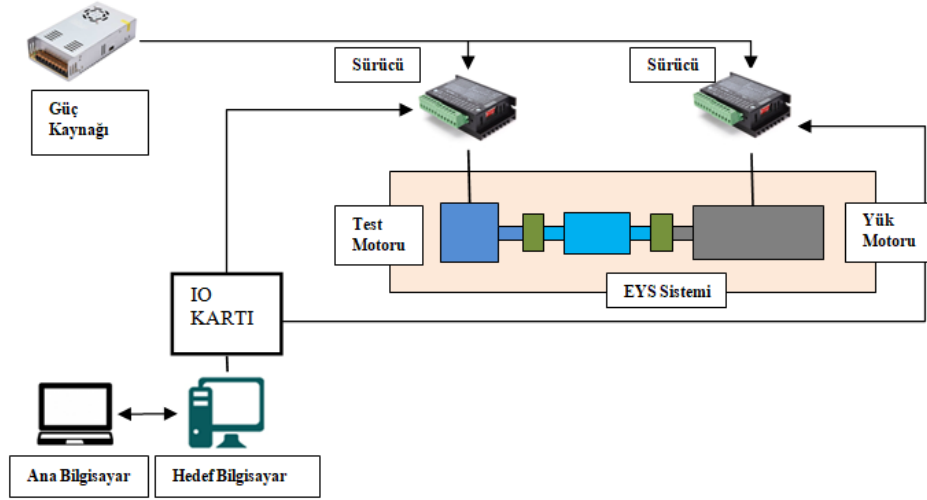
Testlerde karakteristiklere sahip olması nedeniyle test motoru olarak Fırçasız Doğru Akım Motoru tercih edilmiştir. Motorun doğrusal karakteristiklere sahip olması bize tork değerlerini kolayca bulabilme fırsatını oluşturur (Ölçer, 2013). Sistemdeki motorların akım kontrolleri için hem yük motoru hem de test motoru için motorlara ait olan sürücülere ihtiyaç duyulmuştur. Test motoruna ait pozisyon bilgisi ise motor

miline bağı olan optik kodlayıcı ile elde edilmektedir. EYB’de kullanılan Test motorumuza ait özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir.

**Tablo 5.1: Test Motoru Parametreleri.**

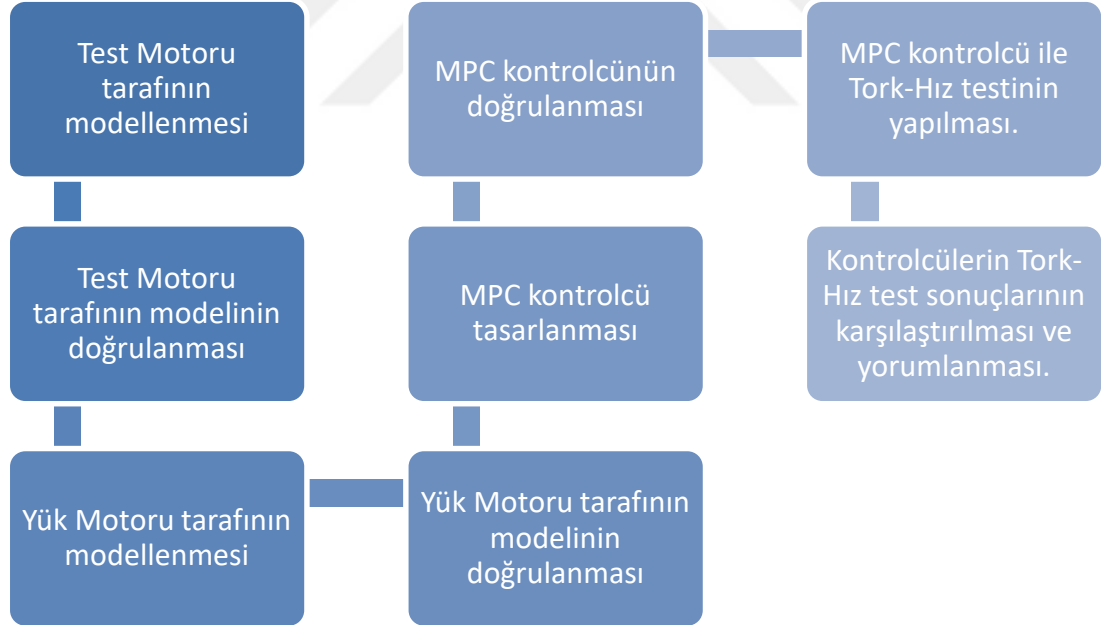
Direnç (Ohm)	0.3
Endüktans (mH)	2.5
Kutup çifti	4
Tork sabiti (Nm/A)	0.048

EYB sisteminin bileşenleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Tork- Hız Testi yapılırken EYB sisteminde bulunan test motoru ve yük motoru kaplinler aracılığıyla tork ölçere bağlanır. Yük motoruna referans tork değeri ve test motoruna referans hız değeri testler için oluşturulan test blokları üzerinden dönmesi istenen hız değeri ana bilgisayara girilir. Ana bilgisayardan çıkan akım ve tork emirleri hedef bilgisayar tarafından girdi-çıkı (*İng. Input-Output, I/O*) kartına aktarılır. IO kartından motor sürücülerine giden emir doğrultusunda motorlara akım verilir. Emir verilen tork değeri bilgisi tork ölçer ile hız bilgisi ise test motoru üzerinde bulunan kodlayıcı ile IO kartında bağı oldukları portlar üzerinden hedef bilgisayara aktarılır. Hedef bilgisayardan ana bilgisayara aktarılan sonuçlar ile grafik çizdirilir. Sistemden gerçek zamanlı veri toplamak için ise bu deneyde MATLAB programı ve XPC Target kullanılmıştır. MATLAB programı üzerinden girdi sinyalleri oluşturulmuş, sistem çıkı verileri XPC Target ile veri toplama kartı üzerinden toplanmıştır.



**Şekil 5.2: EYB Sisteminin Gösterimi.**

Tez için yapılan deneysel çalışmalar sırasında takip edilen adımlar Şekil 5.3'te verilmiştir.



**Şekil 5.3: İzlenen Deneysel Çalışmanın Adımları.**

EYB sistemi test motoru tarafı ve yük motoru olarak Şekil 3.1'de daha önce verildiği gibi iki parçaya ayrılmış ve çalışmalara test motoru tarafının modellenmesi ile başlanmıştır. Test motorunun mili boşa bırakılarak test motoruna akım referansları

verilmiş ve test motoru üzerindeki kodlayıcıdan pozisyon bilgisi alınmıştır. Test birçok kez tekrarlanmış ve elde edilen veriler sistem tanımlama uygulamasında kullanılarak model elde edilmiştir. Elde edilen modeller benzetimlerde kullanılmak üzere çıkarılmıştır. Benzetim ve gerçek zamanlı testlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak model doğrulanmıştır. Yük motoru tarafı için tork ölçerin test motoru tarafının mili sabitlenmiş ve motora akımlar verilerek tork ölçerden tork verisi elde edilmiştir. Bu verilerle sistem tanımlama uygulaması yapılarak model elde edilmiştir. Model doğruluğu benzetim testleri ve gerçek zamanlı testlerle doğrulanmıştır.

Yük motoru tarafı için bulunan modelin doğrulamasından sonra yük motoru tarafında kullanılmak üzere bir MPC tasarlanmış, benzetim ve gerçek zamanlı testler ile doğrulanmıştır. Doğrulanmış olan kontrolcü Tork-Hız Testi'nde MPC tork kontrolü için, daha önce kullanılmakta olan PID hız kontrolcüsü ise test motoru tarafı için kullanılmıştır. Testlerden elde edilen verilerin karşılaştırılması için PID tork kontrolcüsü tasarlanmış ve MPC tork kontrolcüsü ile yapılan testler ile karşılaştırılmıştır.

## 6. MODELLEME, SİSTEM TANIMLAMA VE KONTROL

Kontrolcü tasarlarken uygulanacak olan sistemin modelini oluşturmak, sistemin davranışlarını belirlemek için oldukça önemlidir. Sistemin modelini çıkarırken sisteme ait bazı bilinmeyen parametreler benzetim yoluyla bulunabilmektedir. Sistem tanımlama uygulaması ile elde edilen sistem modeline karşılık, oluşturulan matematiksel model arasında benzetim yapılarak parametreler elde edilebilir.

### 6.1. Sistem Modelleme

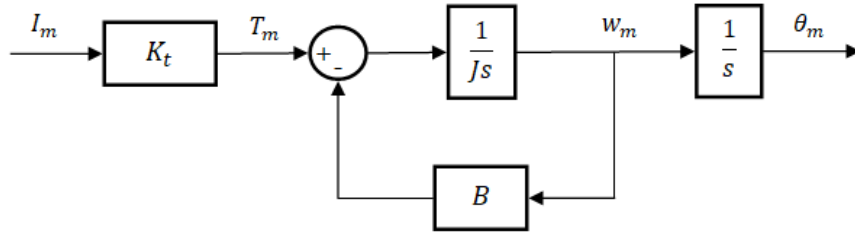
Sistemin genel modelini oluşturmak için sistem test tarafı ve yük tarafı olmak üzere parçalara bölünmüş ve parametreler elde edilmiştir. Test tarafı modellenirken testte kullanılan test motoru kullanılmıştır. Yük tarafı modellenmesinde ise yük motoru, bir adet kaplin ve tork ölçer kullanılmıştır.

#### 6.1.1. Test Motorunun Modellenmesi

Test motorunun modellenmesi yapılırken (6.1) ve (3.2)'de verilen doğru akım motorlarının genel denklemlerinden faydalanılmıştır.  $T_L$  yük dönme momenti,  $J_m$  motor eylemsizlik momenti ve  $B_m$  motor sürtünme katsayısıdır. Motor yüksüz durumda olduğu için  $T_L=0$  'dır.

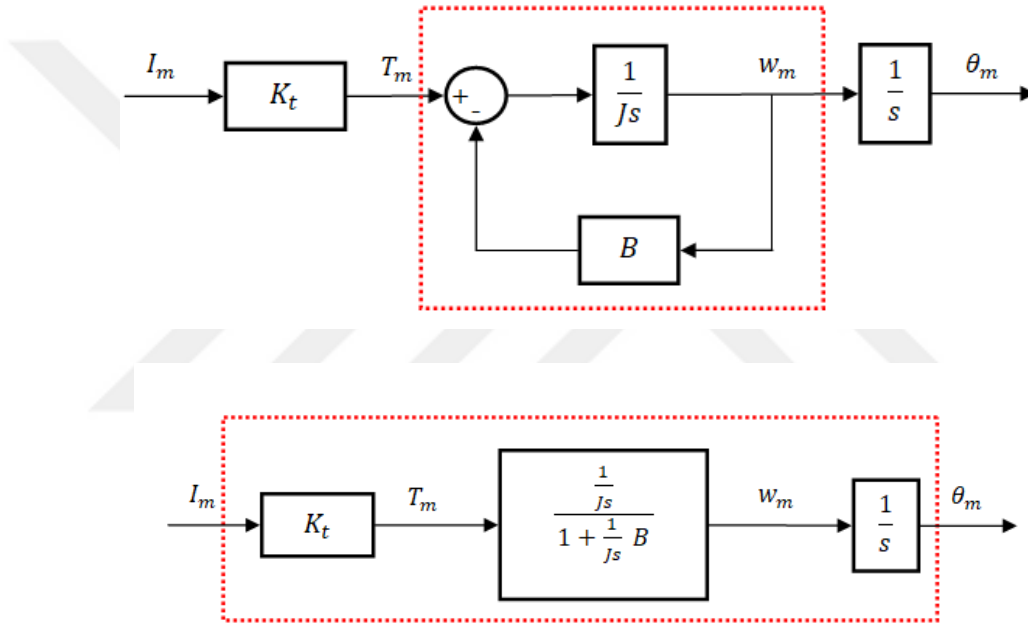
$$\frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} J_m + \frac{d\theta_m(t)}{dt} B_m + T_L = T_m \quad (6.1)$$

Denklemlerden elde edilen blok diyagram Şekil 6.1'deki gibidir. Blok diyagram oluşturulurken girdi akım iken çıktı ise pozisyon bilgisi olarak seçilmiştir.



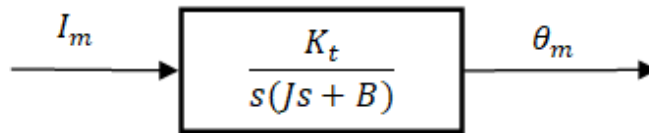
**Şekil 6.1: Test Motoru Tarafının Blok Diyagram ile Gösterilmesi.**

Şekil 6.1'deki blok diyagram indirgenirse Şekil 6.2 elde edilir.



**Şekil 6.2: Blok Diyagramın İndirgenmesi.**

Düzenlemeler sonucu Şekil 6.3 elde edilir. Böylece sistemin modeli çıkartılmış olur.



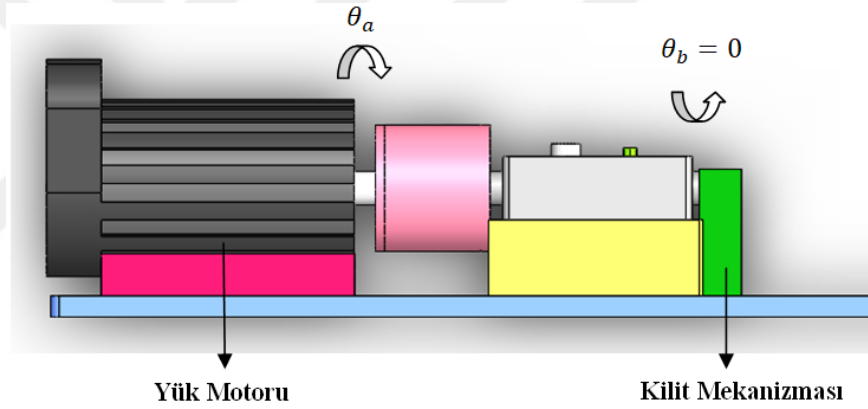
**Şekil 6.3: Sistemin Modelinin Çıkarılması.**

Şekil 6.3'e göre elde edilen akım ve pozisyona bağlı test motorunun transfer fonksiyonu (6.2)'deki gibi elde edilir.

$$\frac{\theta_m}{I_m} = \frac{K_t}{s(Js + B)} \quad (6.2)$$

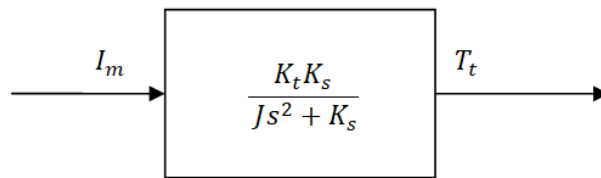
### 6.1.2. Yük Tarafının Modellenmesi

Yük tarafında modellenecek olan kısım Şekil 6.4'teki gibi tork ölçer kaplin ve yük motorundan oluşmaktadır. Tork ölçerin bir ucu yük motoruna bağlı iken diğer ucu ise kilit mekanizması ile sabitlenmiştir. Mil sabitlendiği için  $\theta_b = 0$  olarak alınır. Kaplinin sertliği (*Ing. Stiffness*) çok büyük olduğundan kaplin öncesi ve sonrası pozisyon değeri  $\theta_a$  olarak alınmıştır.



Şekil 6.4: Yük Tarafının Modellenmesi.

Yük motoruna verilen akımı  $I_m$  ve tork ölçer sensöründen okunan tork verisi  $T_t$  alınırsa blok diyagramımız Şekil 6.5'teki gibi olur. Blok diyagramından elde edilen modelimiz (6.3) denklemindeki gibi olur.



Şekil 6.5: Yük Motoru Tarafı Blok Diyagramı.

$$\frac{T_t}{I_m} = \frac{K_t K_s}{Js^2 + Bs + K_s} \quad (6.3)$$

## 6.2.Sistem Tanımlama

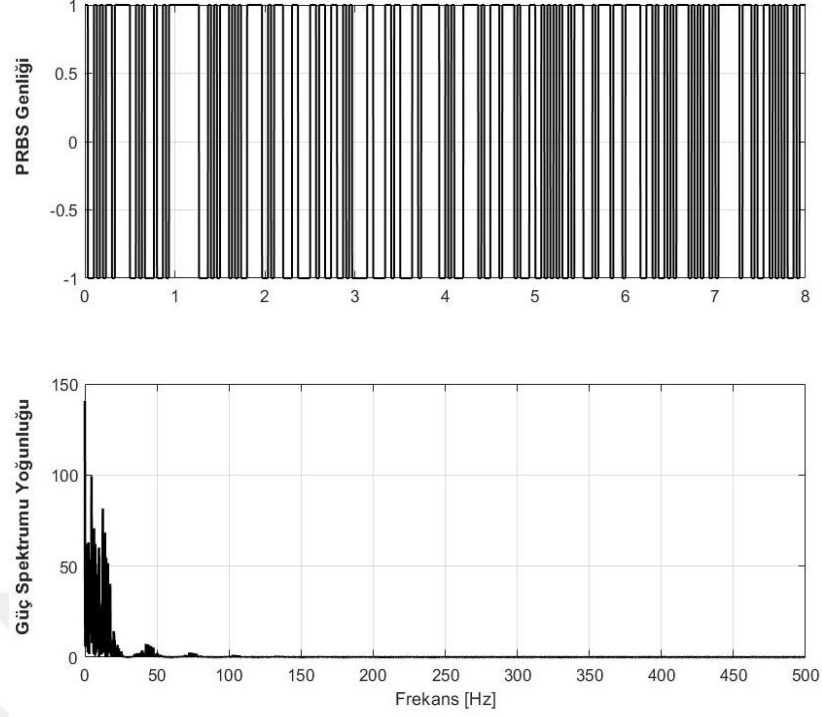
Sistem tanımlama basitçe bir sisteme verilen girdi sinyalleri sonucu elde edilen çıktı sinyallerinin toplanıp, bu sinyallerle sisteme uygun bir model oluşturma yöntemidir. Sistem tanımlama uygulaması genel olarak Şekil 6.6'da gösterildiği gibi uygulanmaktadır. İlk olarak sisteme verilecek deneysel girdi sinyalleri oluşturulur. Sonra oluşturulan girdi sinyalleri sisteme verilir. Bu girdi sinyaline karşı oluşan çıktı verileri toplanır. Toplanan çıktı verilerinin incelenmesi ve model elde edebilecek kadar iyi olması önemlidir. Çünkü çıktı verilerinin iyi olması sistem tanımlama ile elde edilecek olan modelin doğru oluşturulması demektir. Eğer çıktı verilerini iyileştirme ihtiyacı doğarsa filtreden geçirme ve bir yöne doğru eğiliminin azaltılması (*İng. Detrend*) gibi yöntemler uygulanabilir. MATLAB Sistem Tanımlama bloğu kullanılarak girdi ve çıktı sinyalleri tanımlanarak uygun bir model türetilir. Model yapılarındaki sistem değişkenleri bilinmiyorsa ve elimizde sisteme ait bir model varsa değişkenler benzetilerek bulunabilir. Modelin belirlendikten sonra modelin doğrulanması büyük önem taşır. Model doğrulanması ise MATLAB ortamında benzetim ile gerçekleştirilebilir.



**Şekil 6.6: Sistem Tanımlama Adımları.**

### 6.2.1. Deneysel Girdi Sinyalinin Belirlenmesi

Sistem için elde edilecek olan modelin doğruluğu öncelikle sisteme verilecek olan girdi sinyalinin uygunluğuna bağlıdır. Girdi sinyalinin uygunluğu için ise sinyalin sistemin neredeyse tüm dinamikleri uyaracak nitelikte olması gerekmektedir. Girdi sinyali seçiminde genellikle Beyaz gürültü veya PRBS sinyalleri tercih edilmektedir. Bu sinyallerin tercih edilme sebebi ise teorik olarak tüm frekans değerlerini kapsamalarıdır. Bu durum sistemin tüm dinamiklerinin uyarılmasını sağlamaktadır. Farklı frekans aralıklarıyla sabit genlikte değer vermesi nedeniyle sistem tanımlama uygulaması sırasında girdi sinyali PRBS (*İng. Pseudo Random Binary Sequence*) olarak tercih edilmiştir. PRBS sinyali periyodik, deterministik ve beyaz gürültüye benzer özellikler taşıyan ve sistem tanımlama alanında oldukça sık tercih edilen bir sinyaldir. Beyaz gürültüden farkı PRBS sinyalinin genliğinin sabit olmasıdır (Çardaklı, 2005). PRBS sinyali için kullanılan bir örnek Şekil 6.7’de verilmiştir. Sistem tanımlama uygulamaları sırasında test motoru ve yük motoru tarafına daha önce yapılan çalışmadan (Ölçer, 2013) yararlanılarak 30 Hz güç yoğunluğuna sahip 1A genliğinde farklı frekanslarda sinyal üreten PRBS sinyalleri verilmiştir.



**Şekil 6.7: PRBS Sinyali Genliği ve Güç Spektrumu Yoğunluğu Gösterimi.**

Her test için girdi sinyali sürekli değiştii için çıktı sinyali de sürekli olarak değişmektedir. Çıktı sinyalleri sistem modelini belirlemede kullanılacağı için mümkün olduğunca gürültüden uzak ve net olmalıdır. Bu nedenle bazı sistemlerden elde edilen çıktı sinyallerinin detrend veya filtreleme gibi bazı işlemlerden geçirilmesi gerekir.

Girdi sinyallerine göre elde edilen sistem çıktılarının model için uygunluğu için ise çıktıların varyans değerlerinin denklem (6.4)'te yerine koyularak elde edilebilir. Denklem modelin uyumluluk değerini yüzdelik olarak elde etmeyi sağlar.

$$VAF = \left( 1 - \frac{1 - \text{var}(y_1 - y_1^T)}{\text{var}(y_1)} \right) \cdot 100\% \quad (6.4)$$

Model uyumluluğu ayrıca Son Öngörü Hatası formülü ile elde edilebilir. Denklem (6.5)'te p parametre sayısını, M maliyet fonksiyonunu, v ise veri sayısını temsil etmektedir (Orukpe, 2012).

$$FPE = \left( \frac{1 + \frac{p}{v}}{1 - \frac{p}{v}} \right) \cdot M \quad (6.5)$$

Tezdeki sistem modelleri için farklı girdi sinyalleri uygulanarak elde edilen yüzdellikler arasında %70-90 değerleri veren modeller arasında en yüksek yüzdellik değerlerin transfer fonksiyonları model olarak seçilmiştir.

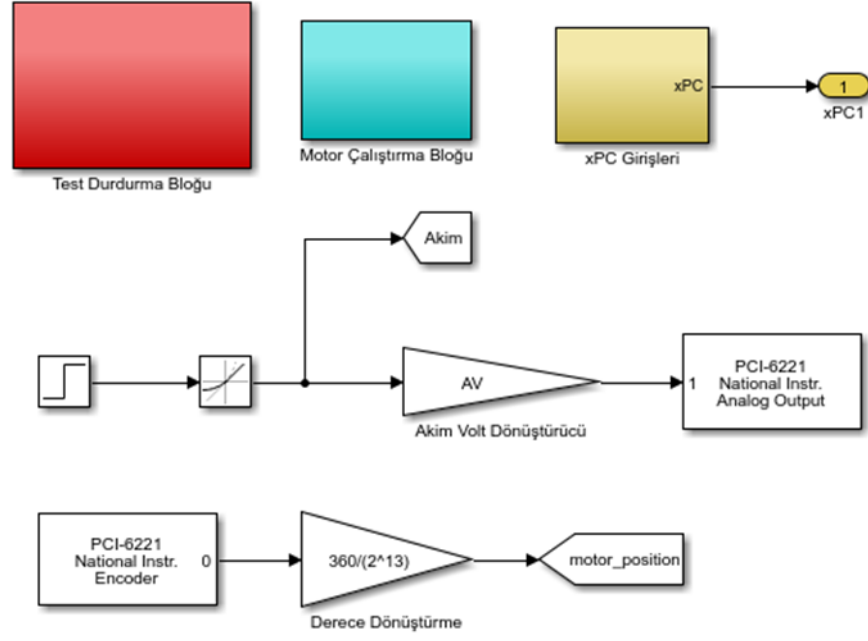
Sistem tanımlama uygulayabilmek için Uygulama (*Ing. Validation*) ve Eğitici (*Ing. Training*) olmak üzere iki farklı girdi verisine ihtiyaç duymaktayız. Bu girdi verilerinin sistemi en iyi şekilde ifade etmesi gerekmektedir.

EYB sistemi için doğru model türetmek kontrolcüden istenilen performansı sağlaması için önemlidir. Sistemin modelinin çıkarılması için test edilecek motor ile birlikte sisteme gerekli torku verecek olan motorun da modelinin çıkarılması gerekmektedir. Modellerin çıkarılması için de sistem tanımlama yöntemi uygulanmalıdır.

EYB Şekil 3.1’de gösterildiği gibi yük tarafı ve test tarafı olarak iki kısma bölünmüş ve sistem tanımlama uygulamaları bu iki kısma ayrı ayrı uygulanmıştır. Test tarafına uygulanan sistem tanımlama ile akım girdi olarak verilmiş çıktı pozisyon olacak şekilde model elde edilmiştir. Yük tarafına uygulanan sistem tanımlama ile ise akım girdisine karşılık çıktı tork olacak şekilde sistem tanımlama uygulanmıştır.

### 6.2.2. Test Motoruna Sistem Tanımlama Uygulanması

Test motoruna sistem tanımlama uygulaması yapılırken test motorunun ucu boşa bırakılmıştır. Girdi verisi olarak akım çıktı verimiz ise pozisyon bilgisi olarak alınmıştır. Sistem tanımlama uygulamasının yapılabilmesi test motorunun akıma karşı ürettiği pozisyon bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Test motoruna verilmek üzere MATLAB programı üzerinden 1A genliğinde farklı frekanslarda PRBS akımları türetilmiş ve test motoruna 8 saniye boyunca uygulanmıştır.



**Şekil 6.8: Test Motoru için Gerçek Zamanlı Test Blokları.**

Motorun hareketi sonucunda oluşan pozisyon bilgileri derece cinsinden elde edilmiştir. Testler sistem tanımlama uygulamasında eğitici (*İng. Training*) ve uygulama (*İng. Validation*) verileri olarak kullanılmak üzere yapılan test 10 kez tekrarlanmıştır. MATLAB programı üzerinden sistem tanımlama uygulaması yapılmıştır. Toplanan veriler ve verilere karşılık gelen transfer fonksiyonları VAF değerleriyle birlikte Tablo 6.1'e aktarılmıştır.

**Tablo 6.1. Test Motoru Modellerinin Gösterimi.**

	<b>TF</b>	<b>VAF (%)</b>	<b>J</b>	<b>B</b>
<b>DATA_1</b>	$\frac{0.3639z}{0.1044 s^2 + s}$	88.416	1.2919e-07	1.2374e-06
<b>DATA_2</b>	$\frac{3.787e04}{0.1013 s^2 + s}$	89.7686	1.2840e-07	1.2675e-06
<b>DATA_3</b>	$\frac{3.983e04}{0.109 s^2 + s}$	86.634	1.3136e-07	1.2051e-06
<b>DATA_4</b>	$\frac{3.961e04}{0.1073 s^2 + s}$	87.057	1.3003e-07	1.2118e-06
<b>DATA_5</b>	$\frac{3.792e04}{0.1031s^2 + s}$	91.71	1.3051e-07	1.2658e-06
<b>DATA_6</b>	$\frac{3.695e04}{0.09915s^2 + s}$	90.94	1.2880e-07	1.2991e-06
<b>DATA_7</b>	$\frac{3.77e04}{0.1031s^2 + s}$	95.18	1.3127e-07	1.2732e-06
<b>DATA_8</b>	$\frac{3.662e04}{0.10615 s^2 + s}$	95.08	1.2920e-07	1.2741e-06
<b>DATA_9</b>	$\frac{3.961e04}{0.1073s^2 + s}$	77.8108	1.3003e-07	1.2118e-06
<b>DATA_10</b>	$\frac{3.983e04}{0.109s^2 + s}$	78.0107	1.3136e-07	1.2051e-06

Sistem tanımlama sonucunda toplanan verilerden yüksek VAF değerine sahip olan (6.6)'daki model test motorunun modeli olarak seçilmiştir.

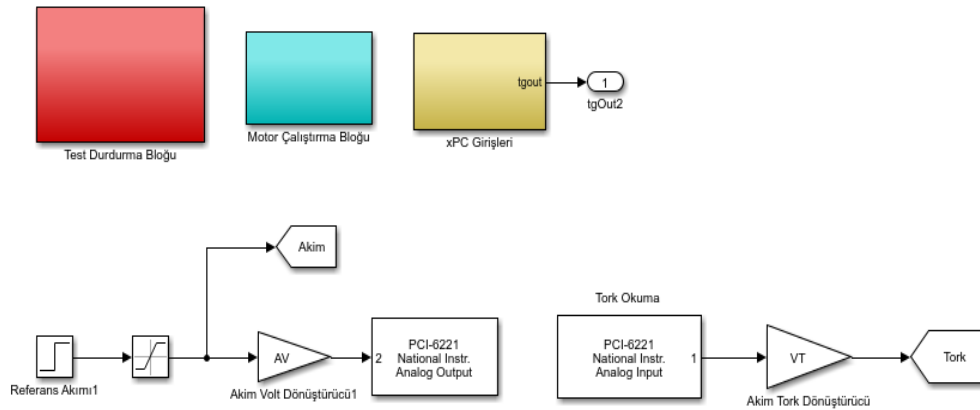
$$\frac{3.77e04}{0.1031s^2 + s} \quad (6.6)$$

Tablo 6.1’de test motoru için bulunan modeller, (6.7)’deki gibi düzenlenerek ve test edilen motorun  $K_t$  değeri  $0.048 \text{ kgm}^2/\text{s}^2\text{A}$  alınarak motorun parametreleri olan B ve J değerleri bulunmuştur. Bulunan B ve J değerlerinin ortalamaları ise bize yaklaşık motor için geçerli olan  $B = 1.2451 \times 10^{-6} \text{ Nms}$  ve  $J = 1.3002 \times 10^{-7} \text{ Nm/A}$  değerlerini verir.

$$\frac{\theta_m}{I_m} = \frac{K_t}{s(Js + B)} = \frac{\frac{K_t}{B}}{\left(\frac{J}{B}s^2 + s\right)} \quad (6.7)$$

### 6.2.3. Yük Tarafına Sistem Tanımlama Uygulanması

Yük tarafına uygulanacak olan sistem Şekil 6.4’te de daha önce verildiği gibi tork ölçer, kaplin ve yük uygulayan motordan oluşmaktadır. Tork ölçerin bir mili kaplinle yük motoruna bağlıken bir mili ise mekanik aparat yardımıyla kilitlemiştir. Girdi olarak yük uygulayan motora 0.9A genliğinde PRBS sinyaller verilmiştir ve 1Nm civarı tork cevapları elde edilmiştir. Testler her seferinde yeni üretilen PRBS sinyalleriyle tekrarlanmıştır. Sistem tanımlama için kullanılan arayüz Şekil 6.9’da verilmiştir.



**Şekil 6.9: Yük Motoru Tarafı için Sistem Tanımlama Test Blokları**

Girdi ve çıktı sinyalleri kaydedilmiş ve bu girdi ve çıktı sinyallerle uygulanan sistem tanımlama ile elde edilen model (6.8)’de verilmiştir. Model bulunurken MATLAB Sistem Tanımlama uygulaması kullanılmıştır. “Process Model” ile tahmin yapılmış ve

bulunan model ile %89 oranında VAF doğruluk değeri elde edilmiştir.

$$\frac{1.111}{6.65 \times 10^{-6} s^2 + 0.003544 s + 1} \quad (6.8)$$

Yük motoru tarafındaki toplam eylemsizlik kataloglardan elde edilen eylemsizlik değerlerinin toplamı (6.9)'da verilmiştir.

$$J_t = J_{yük\_motoru} + J_{kaplin} + J_{torkmetre} = 4.9 \times 10^{-3} \text{kgm}^2 \quad (6.9)$$

(6.8)'deki model (6.10)'daki gibi yazılırsa  $K_t$  değeri 1.111Nm/A'dir. Ayrıca

$\frac{J_t}{K_s} = 6.65 \times 10^{-6}$  ve  $\frac{B_m}{K_s} = 0.003544$ 'dir.  $\frac{J_t}{K_s} = 6.65 \times 10^{-6}$  eşitliğinde  $J_t$  değeri yerine

konulursa  $K_s = 736.8$  Nm/rad olarak bulunur.  $\frac{B_m}{K_s} = 0.003544$  için bulunan  $K_s = 736.8$

Nm/rad değeri yerine konulduğunda ise  $B_m = 2.61$ Nms olarak bulunur.

$$\frac{\theta_m K_s}{I_m} = \frac{T_m}{I_m} = \frac{K_t K_s}{J_t s^2 + B_m s + K_s} = \frac{K_t}{\frac{J_t}{K_s} s^2 + \frac{B_m}{K_s} s + 1} \quad (6.10)$$

### 6.3. Kontrolcü Tasarlanması

Yük tarafına uygulanan sistem tanımlama sonucu elde edilen (6.7)'deki sistem modeli kullanılarak MPC kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan MPC kontrolcü için seçilen parametre değerleri ise Tablo 6.2'deki gibidir.

**Tablo 6.2: Tasarlanan Kontrolcünün Parametreleri.**

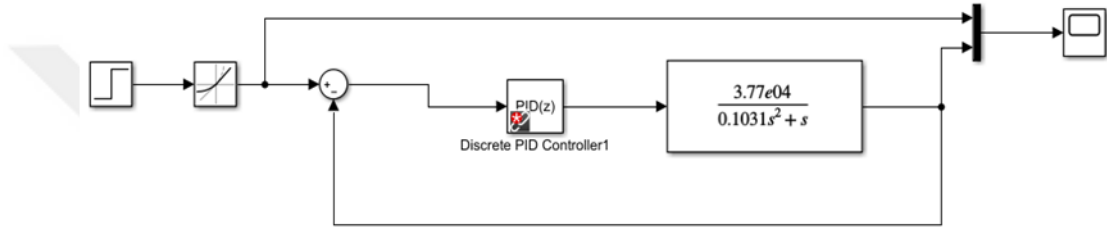
Tahmin Ufku Sayısı	50
Denetim Ufku Sayısı	20
İşlenen Değişken (MV) Ağırlık Değeri	1.1735
İşlenen Değişken (MV) Değişimi	272.69
Çıktı Değişkeni (OV) Ağırlık Değeri	82.145

## 6.4. Model ve Kontrolcünün Doğrulanması

Test motoru tarafı ve yük motoru tarafı için sistem tanımlama uygulamaları ile elde edilen modellerin doğrulanması için benzetimler yapılmıştır.

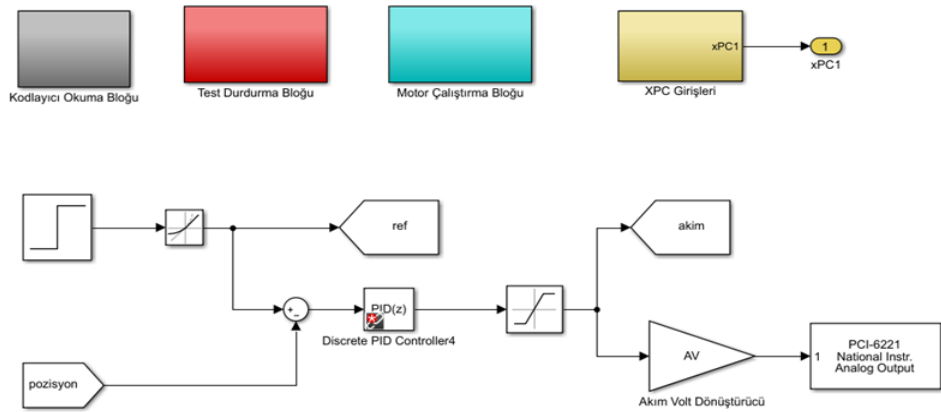
### 6.4.1. Test Motoru Tarafı için Benzetim ve Test Sonuçları

Test Motoru tarafı model benzetimi için kullanılan test blokları Şekil 6.10'daki gibidir. Test motoru modellemesi yapılırken girdi akım, çıktı ise pozisyon olarak alınmıştır. Testlerde hız kontrolü için pozisyon bilgisinin türevi alınarak hız bilgisine çevrilmiştir.



Şekil 6.10: Test Motoru Tarafı için Kullanılan Benzetim Blokları.

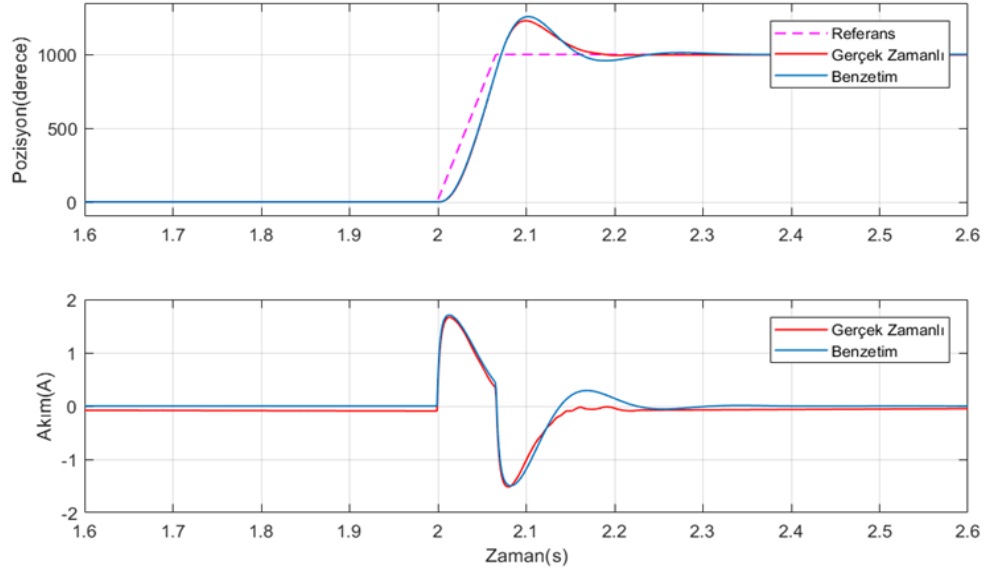
Test motoru tarafı için yapılan gerçek zamanlı testlerde kullanılan test blokları Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11: Test Motoru Tarafı için Kullanılan Gerçek Zamanlı Test Blokları.

Modelin doğrulanması için benzetimde 1000° adım sinyali referans olarak modele

verilmiştir. Aynı referans sinyali ile yapılan gerçek zamanlı test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Test sonuçları Şekil 6.12’de verilmiştir.

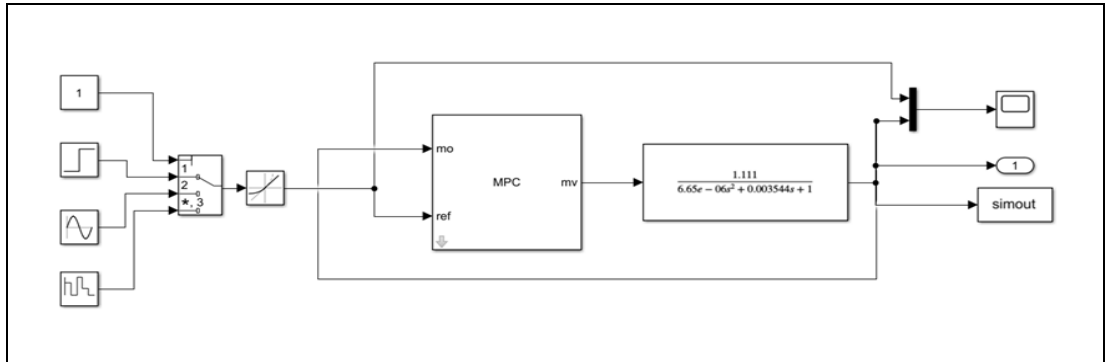


**Şekil 6.12: Adım Referanslı Pozisyon ve Akım Test Sonuç Grafikleri**

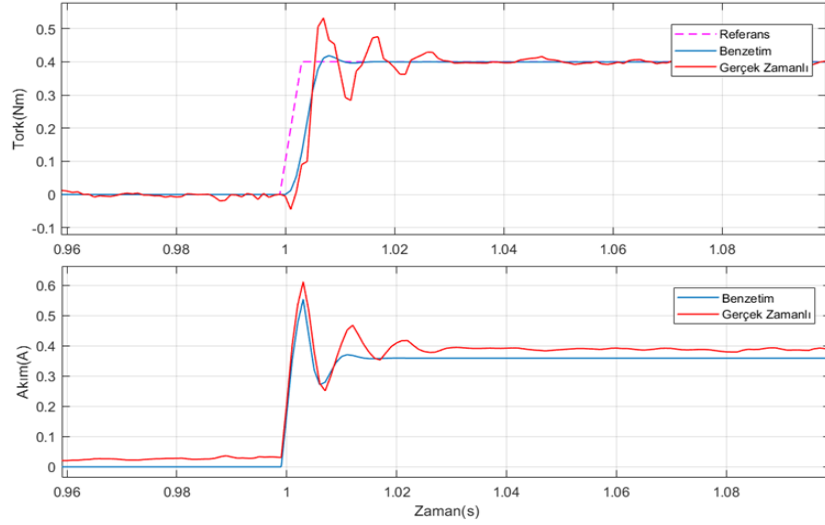
Çizdirilen grafiğe bakıldığında aynı pozisyon referansları verildiğinde elde edilen pozisyon bilgi grafiklerinin referansı takip ettiği ve kabul edilebilir düzeyde hata payı ile uyduğu gözükmemektedir. Test motoru için çıkarılan modelin doğruluğu gösterilmiştir.

#### 6.4.2. Yük Motoru Tarafı için Benzetim ve Test Sonuçları

Yük Motoru tarafı model benzetimi için kullanılan arayüz Şekil 6.13’teki gibidir.





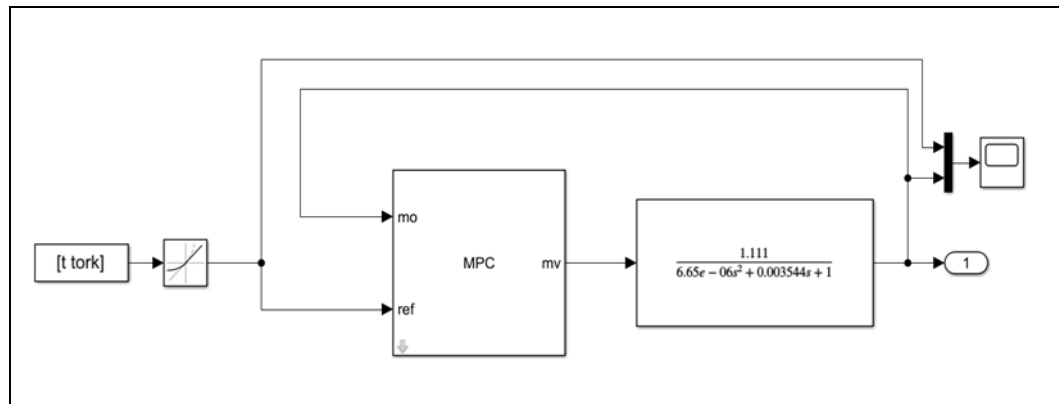


**Şekil 6.15: Adım Referanslı Tork ve Akım Test Sonuç Grafikleri**

Model doğrulaması için kullanılan benzetim ve gerçek zamanlı test grafiklerinde oluşan farklılığın modellenmeyen belirsizliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Modelin doğrulanması için referans torkun takip etmesi bizim için önemlidir. Çizdirilen grafiğe bakıldığında aynı tork referansları ile elde edilen tork grafiklerinin referansı takip ettiği gözükmektedir. Grafiklerden yük motoru tarafı için çıkarılan modelin doğruluğu gösterilmiştir.

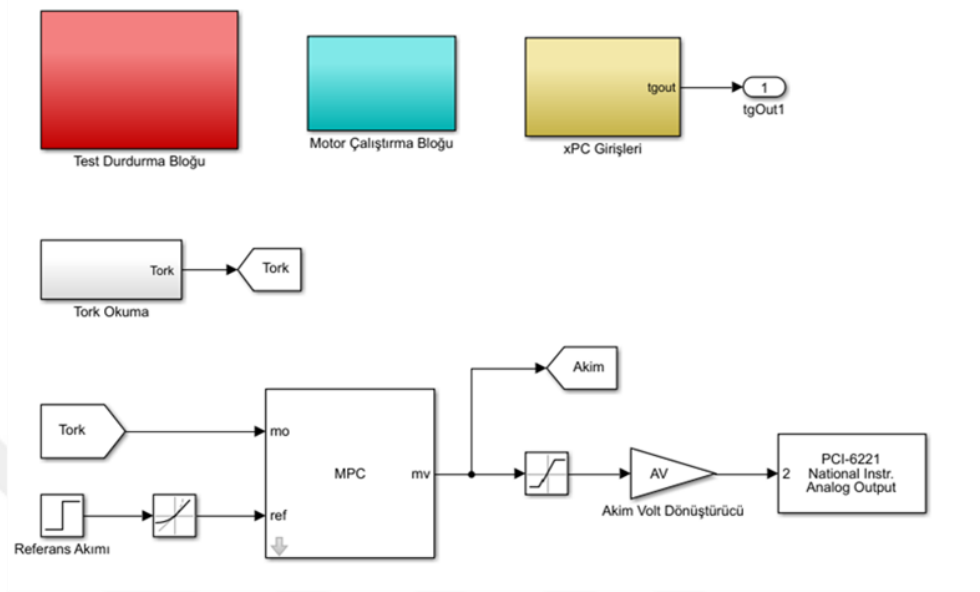
#### 6.4.3. Kontrolcü Doğrulaması için Benzetim ve Test Sonuçları

Tasarlanan MPC kontrolcü, sistem tanımlama ile edilen model ile benzetim testleri üzerinden karşılaştırılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Benzetim testinde kullanılan program arayüzü Şekil 6.16’da verilmiştir.



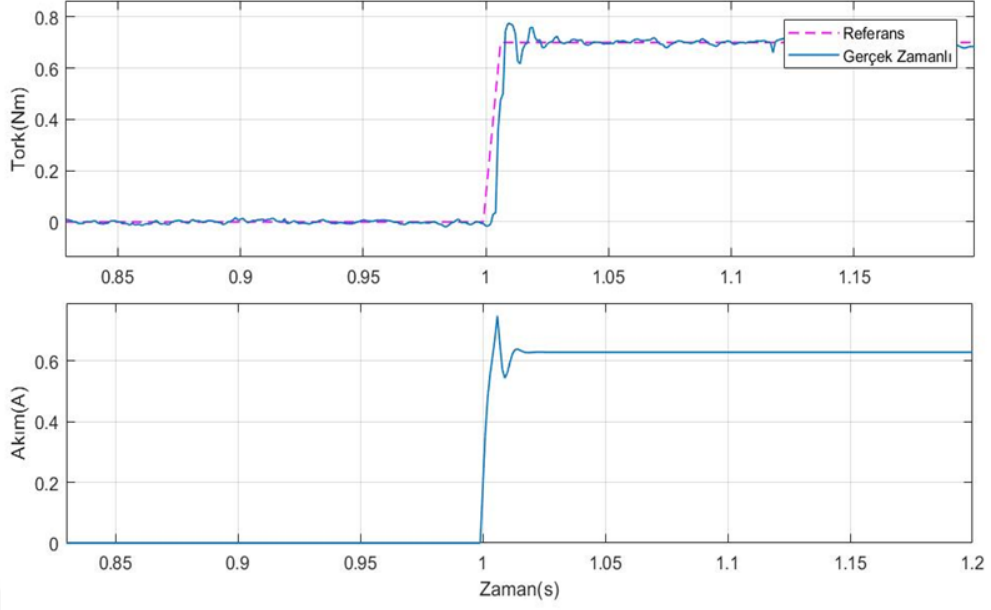
**Şekil 6.16: MPC Tork Kontrolcü için Kullanılan Benzetim Blokları.**

Benzetim testlerinden sonra MPC kontrolcüsü gerçek zamanlı olarak sistem üzerinde de denenmiştir. Girdi sinyali olarak 0.7 Nm tork referans sinyali kullanılmıştır. Test için kullanılan test blokları Şekil 6.17’de verilmiştir.



**Şekil 6.17: MPC Tork Kontrolcü için Kullanılan Gerçek Zamanlı Test Blokları.**

Kontrolcü doğrulamaları sırasında 0.7Nm tork değerinde adım referans sinyali gerçek zamanlı testte uygulanmıştır.0.7Nm’lik adım şeklindeki referans tork sinyali uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar ile referanslar Şekil 6.18’deki grafikte karşılaştırılmıştır.

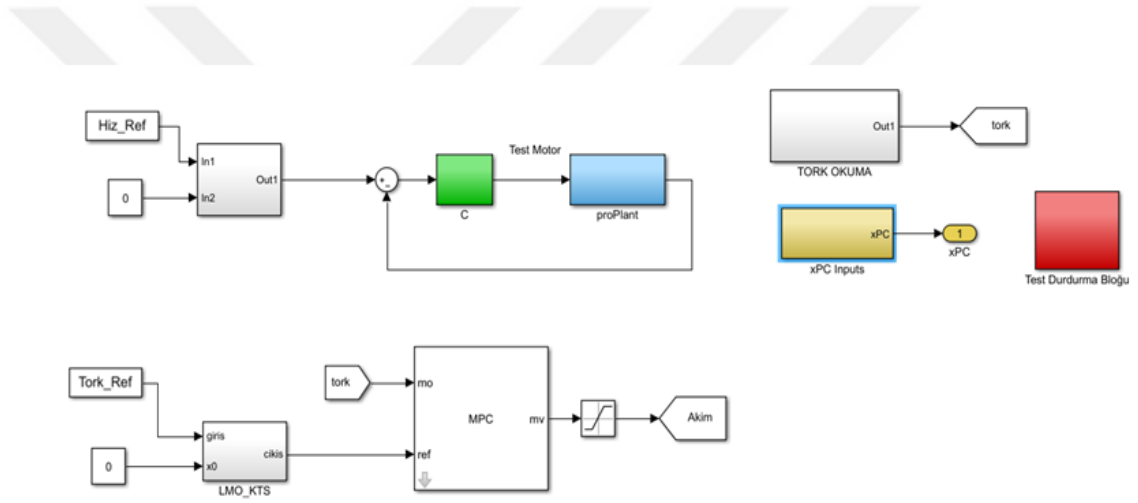


**Şekil 6.18: 0.7Nm'lik Tork Referanslı Gerçek Zamanlı Test Sonuçları.**

Şekil 6.18'deki grafiklere bakıldığında kontrolcü uygulaması ile elde edilen sonuçların tork kontrollü bir sistem için uygun olduğu görülmüştür. 0.7 Nm referans sinyaline karşılık 0.772 Nm tepe değerine ulaşmıştır. Çektiği akım ortalama 0.64A civarındadır.

## 7. BULGULAR , YORUMLAR VE TARTIŞMALAR

EYB sisteminde Tork-Hız Testleri yapılırken test motoru tarafında hız kontrolü, yük motoru tarafında ise tork kontrolü yapılmaktadır. Tez için yapılan çalışmada MPC tork kontrolcüsü yük tarafına uygulanmıştır. Hız kontrolcüsü olarak ise test tarafına halihazırda kullanılan PID hız kontrolcüsü uygulanmıştır. Gerçek zamanlı Tork-Hız Testleri'nde kullanılan test blokları Şekil 7.1'de verilmiştir.



**Şekil 7.1: Gerçek Zamanlı Tork-Hız Testleri'nde Kullanılan Test Blokları**

Tasarlanan MPC tork kontrolcüsünün performansının belirlenebilmesi için test sonuçları Daş ve Başlamışlı (2020) makalesine göre türetilen PID tork kontrolcüsü ile yapılan test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılan PID tork kontrolcüsü  $K_p=0.2388$  ve  $K_d=36.6502$  değerlerine sahip bir tork kontrolcüsüdür.

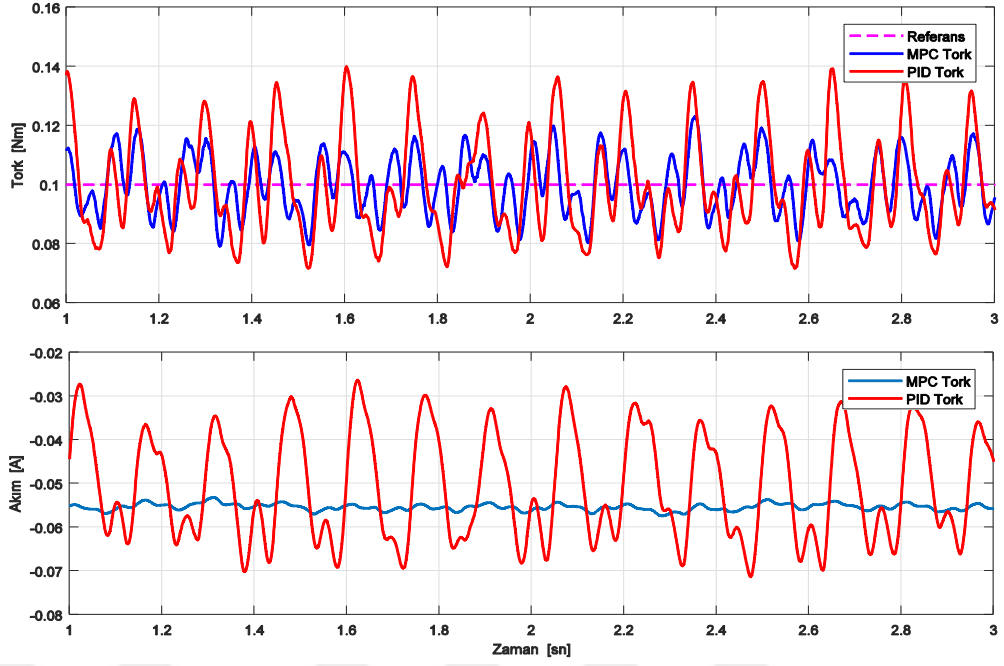
MPC tork ve PID tork kontrolcüleri ile yapılan gerçek zamanlı testlerin sonuçlarının kolay karşılaştırabilmesi için sisteme verilen tork referans sinyalleri ile birlikte üst üste çizdirilmiştir. Yapılan testlere ait ölçüm senaryoları Tablo 7.1'deki gibidir. Tork ve akım grafiklerinde tork kontrolcülerinin uygulanması sonucunda yük motorunun sisteme verdiği tork değeri ve çektiği akım değerleri gösterilmektedir. Hız ve akım

grafiklerinde ise yük motoruna tork kontrolcülerini uygulanırken, PID hız kontrolcüsünün uygulandığı test motorunun ulaştığı hız değerleri ve çektiği akım değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 7.1: Test Ölçüm Senaryoları**

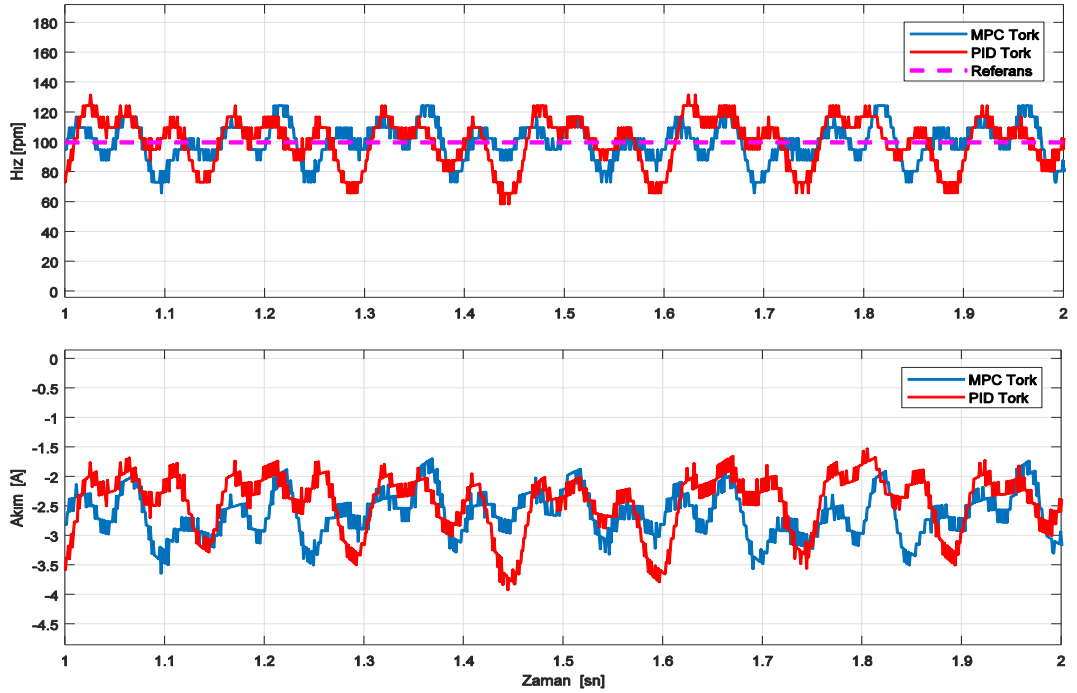
Test Numarası	Verilen Tork Referansı	Verilen Hız Referansı
Test-1	0.1 Nm	100 rpm (Devir / Dakika)
Test-2	0.3 Nm	500 rpm ( Devir / Dakika)
Test-3	0.5 Nm	500rpm ( Devir / Dakika)
Test-4	0.5 Nm	750 rpm ( Devir / Dakika)

Tork-Hız Testleri'ne 0.1Nm tork referansına karşılık 100 rpm hız referansı isteri ile başlanmıştır. MPC tork kontrolcüsünün uygulandığı yük motorunun sistemden çektiği akıma karşılık ürettiği tork değerlerini içeren grafik Şekil 7.2'de, hız kontrolcüsünün uygulandığı test motorunun ulaştığı hız bilgisi ve çektiği akım grafiği Şekil 7.3'te verilmiştir. MPC tork kontrolcüsünün uygulandığı yük motoru 0.1 Nm'lik tork referansını yaklaşık 0.08-0.12Nm tork bant değeri arasında takip ederken PID tork kontrolcüsünün uygulandığı yük motoru yaklaşık 0.07-0.14Nm tork bandında takip edebilmiştir. Şekil 7.2'de verilen akım değerlerine bakıldığında PID kontrolcüsünün çektiği akımdaki dalgalanmalar görülmektedir. MPC tork kontrolcüsünün uygulanması ile yük motoru ortalama 0.055A akım çekmiştir.



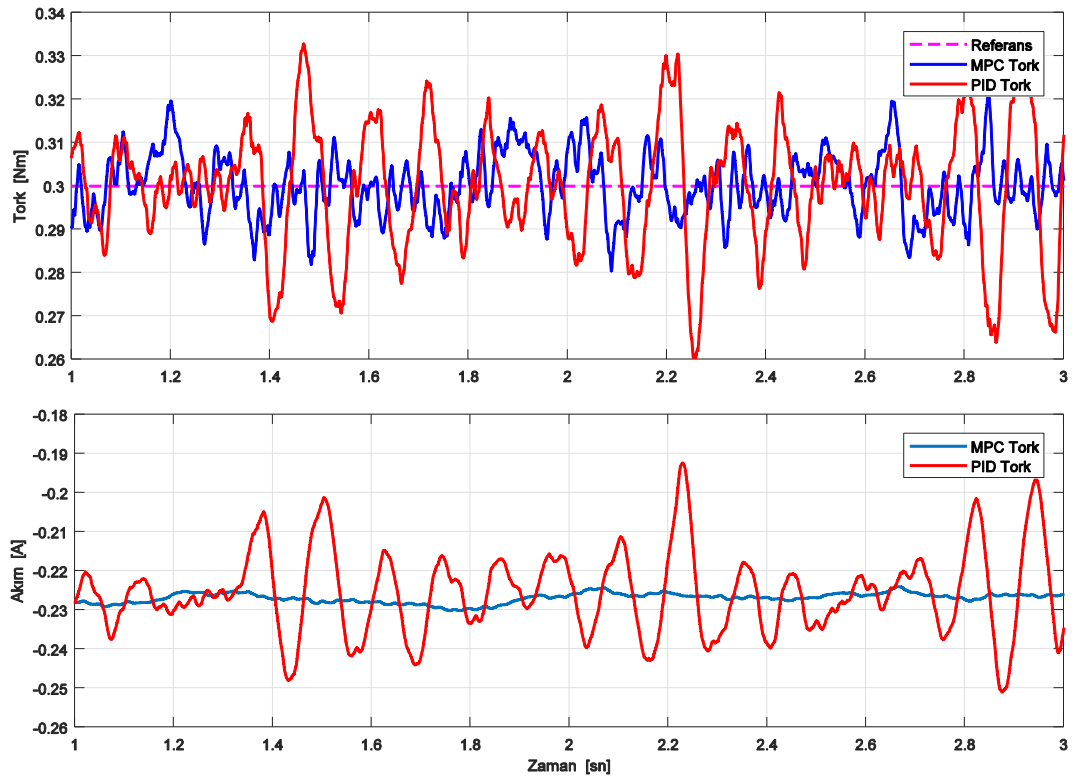
**Şekil 7.2: 0.1Nm Tork ve 100rpm Hız Referansı için Tork ve Akım Grafiği.**

0.1Nm tork referansı ile 100rpm hız referansı için hız-akım grafiği Şekil 7.3'te verilmiştir. Şekil 7.3'teki grafikte PID hız kontrolü uygulanan test motorunun referans hızı takip ettiği gözlenmiştir.



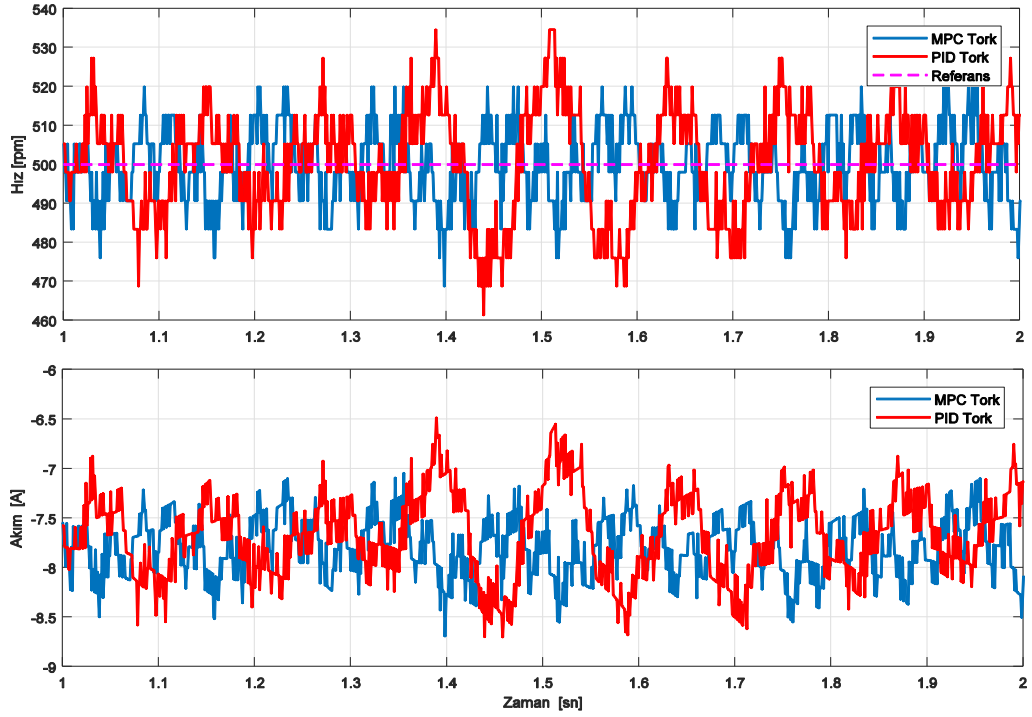
**Şekil 7.3: 0.1Nm Tork ve 100rpm Hız Referansı için Hız ve Akım Grafiği.**

0.3Nm tork referansı ve 500rpm hız referansı verilerek yapılan Tork-Hız Testi'nin sonuçları Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te verilmiştir. Tork ve hız referanslarındaki artışa rağmen MPC tork kontrolcüsü uygulanan yük motoru Şekil 7.4'teki grafikte de gözüktüğü gibi uygulanan PID tork kontrolcüsü uygulanan yük motorundan daha iyi bir performans sergilemiştir. MPC tork kontrolcüsü uygulanan yük motorunun çıktı torku 0.3 Nm'lik tork referansını 0.28-0.32 Nm tork bandında takip etmiştir. PID tork kontrolcüsü uygulanan yük motoru ise tork referansını 0.26-0.34 Nm tork bandında takip etmiştir. PID tork kontrolcüsü uygulandığında yük motoru tarafından çekilen akımdaki dalgalanmalar devam etmektedir.



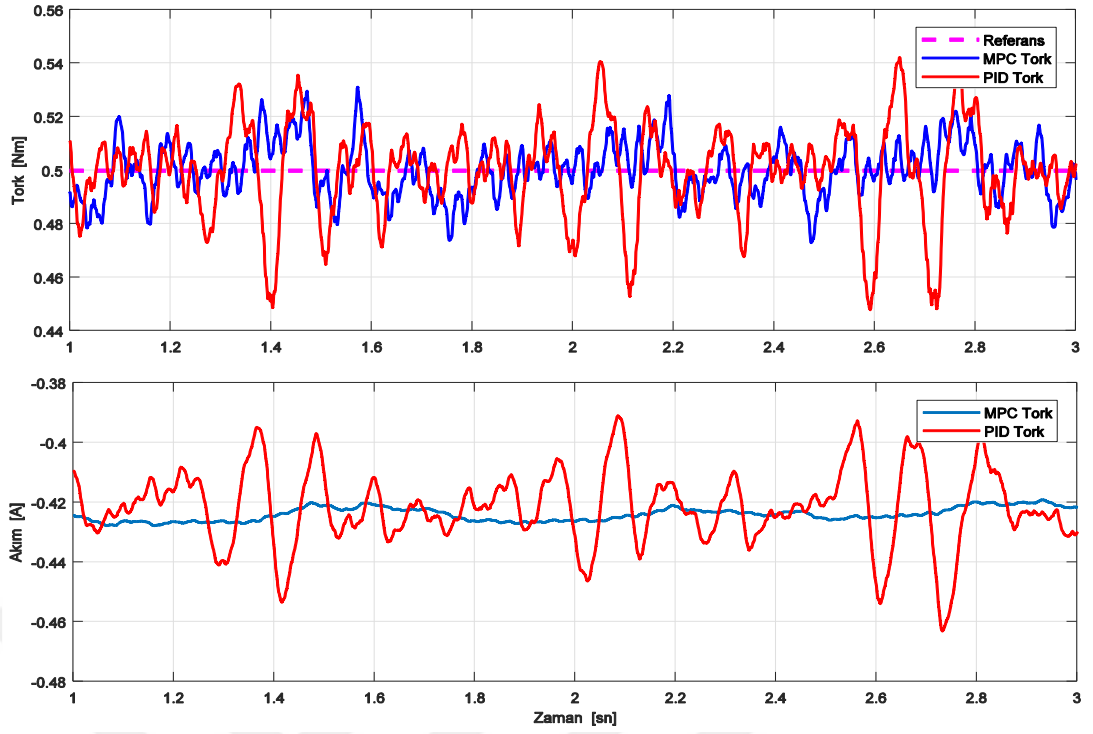
**Şekil 7.4: 0.3Nm Tork ve 500rpm Hız Referansı için Tork ve Akım Grafiği.**

0.3Nm tork referansı ile 500rpm hız referansı için hız ve akım grafiği Şekil 7.5'de verilmiştir.



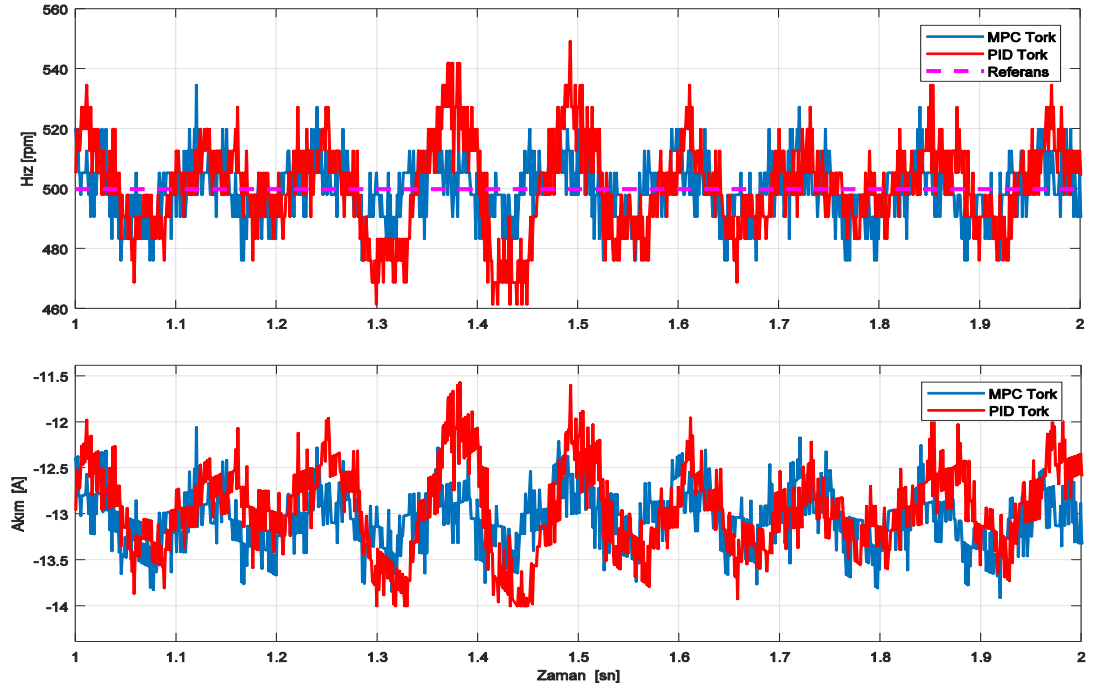
**Şekil 7.5: 0.3Nm Tork ve 500rpm Hız Referansı için Hız ve Akım Grafiği**

Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de sisteme 0.5Nm tork referansı ile 500rpm hız referansı verilmiştir. Tork ve hız referanslarındaki artışa rağmen MPC tork kontrolcüsü Şekil 7.6’daki grafikte de gözüktüğü gibi uygulanan PID tork kontrolcüsünden daha iyi bir performans sergilemiştir. MPC tork kontrolcüsü uygulanan yük motoru 0.5 Nm’lik tork referansını 0.53-0.485Nm tork bandında takip etmiştir. PID tork kontrolcüsü uygulanan yük motoru ise 0.455-0.545Nm tork bandında takip etmiştir. PID tork kontrolcüsü uygulandığında yük motoru tarafından çekilen akımdaki dalgalanmalar devam etmektedir.



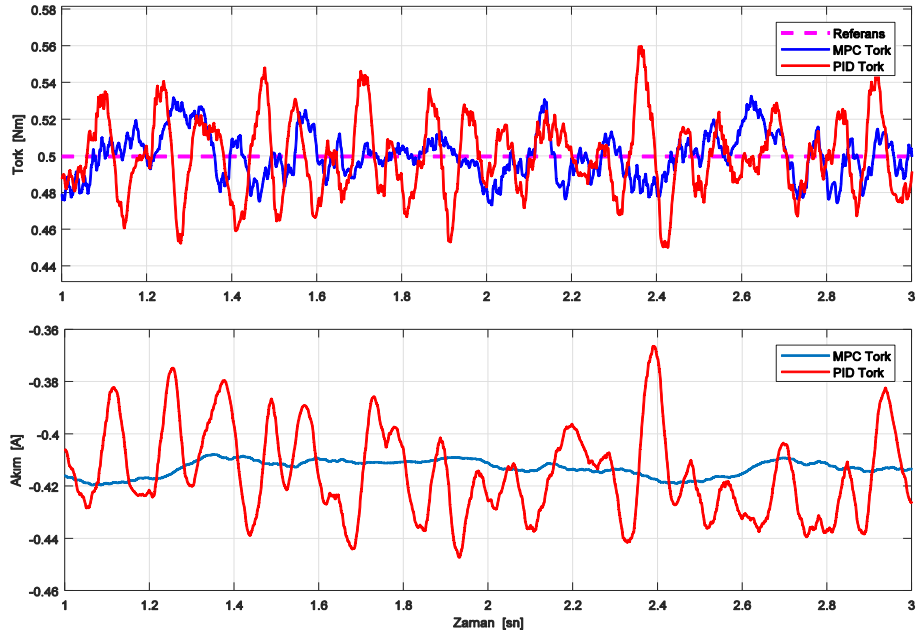
**Şekil 7.6: 0.5Nm Tork ve 500rpm Hız Referansı için Tork ve Akım Grafiği.**

0.5Nm tork referansı ile 500rpm hız referansı için hız ve akım grafikleri Şekil 7.7’de verilmiştir. Test motorunun hız referansını takip ettiği verilen grafikten anlaşılmaktadır.



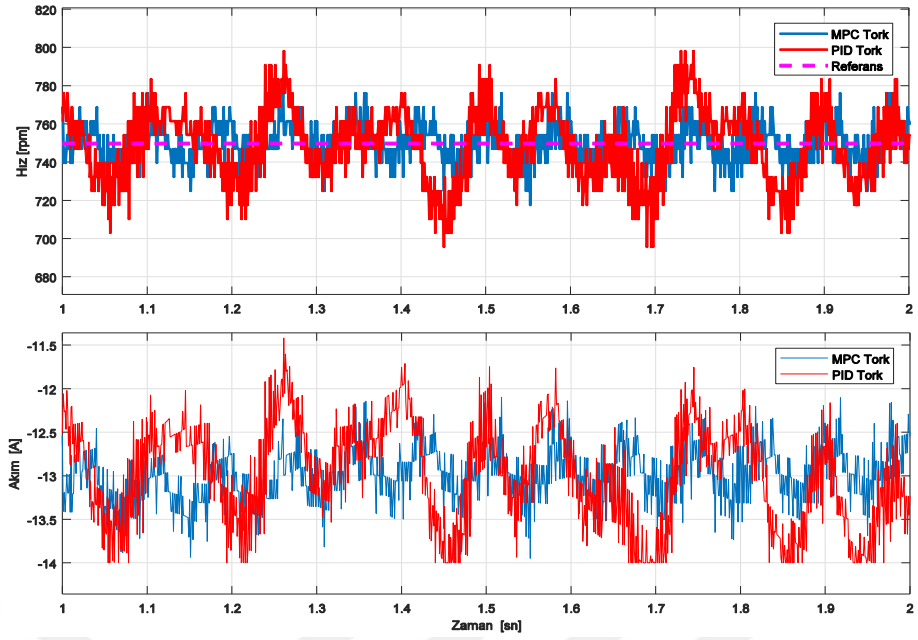
**Şekil 7.7: 0.5Nm Tork ve 500rpm Hız Referansı için Hız ve Akım Grafiği.**

Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da 0.5Nm tork referansı ile 750rpm hız referansı ile elde edilen grafikler verilmiştir. Yük motoruna uygulanan MPC tork kontrolcüsü PID tork kontrolcüsünden daha iyi bir performans sergilemiştir. MPC kontrolcü uygulanan yük motoru 0.5 Nm’lik tork referansını 0.47-0.53 Nm tork bandında takip etmiştir. PID tork kontrolcüsü uygulanan yük motoru ise 0.45-0.56 Nm tork takip bandında kalmıştır. PID tork kontrolcü uygulandığında çekilen akımdaki dalgalanmalar devam etmektedir.



**Şekil 7.8: 0.5Nm Tork ve 750rpm Hız Referansı için Tork-Akım Grafiği.**

0.5Nm tork referansı ile 750rpm hız referansı için tork ve akım grafiği Şekil 7.9’da verilmiştir. Test motorunun hız referansını takip ettiği görülmektedir.



**Şekil 7.9: 0.5Nm Tork ve 750rpm Hız Referansı için Hız ve Akım Grafiği.**

MPC ve PID tork kontrolcileri ile yapılan ve Tablo 7.2'deki referanslar ile elde edilen tork çıktı değerleri ile referans tork değerleri arasında oluşan hata miktarları Mutlak Hatanın İntegrali yöntemi ile hesaplanmış ve hata miktarları Tablo 7.2'de verilmiştir.

**Tablo 7.2: MPC ve PID Tork Kontrolcileri Uygulanan Testlerdeki Mutlak Hatanın İntegrali Yöntemi ile Hesaplanan Tork Hata Miktarları.**

Tork Referansı [Nm]	Hız Referansı [rpm]	MPC için Tork Takibi Hata Miktarı	PID için Tork Takibi Hata Miktarı
0.1Nm	100rpm	0.0336	0.0433
0.3Nm	500rpm	0.0435	0.0659
0.5Nm	500rpm	0.1021	0.1299
0.5Nm	750rpm	0.1031	0.1369

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada motor performanslarını ölçmek için kullanılan EYB sisteminin tasarımına ve kontrolüne değinilmiştir. EYB sistemi modellenmiş ve bu sistemde yapılan testlerden biri olan Tork-Hız Testi'nde kullanılmak üzere bir MPC tork kontrolcüsü tasarlanmıştır. Tasarlanan MPC tork kontrolcüsü sistemde kullanılan PID hız kontrolcüsü ile birlikte çalıştırılmış ve test sonuçları toplanmıştır.

MPC tork kontrolcüsü uygulaması ile elde edilen sonuçlar PID tork kontrolcüsü uygulaması ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmak üzere aynı grafikte çizdirilmiştir. Çizdirilen grafiklerden MPC tork kontrolcüsü ile sisteme verilen tork değer bant aralığının PID tork kontrolcüsü ile sisteme verilene tork değer bandına göre daha dar olduğu görülmüştür. Değer bantının dar olması MPC tork kontrolcüsünün sistemin tork referansını daha küçük hata değerleri ile takip etmekte olduğunu göstermektedir. Tork kontrolcülerinin hata karşılaştırması Tablo 7.2'de verilmiştir. Ayrıca PID tork kontrolcüsünün sisteme verdiği akım değerinde büyük dalgalanmalar görülmektedir. Akım grafiğinde gözlenen bu dalgalanmalar test sistemi için istenmeyen bir durumdur.

Test sonuçları değerlendirildiğinde MPC tork kontrolcüsünün uygulandığı sistemin referans tork değerlerini daha iyi takip ettiği gözlenmiştir. Ayrıca PID tork kontrolcüsü kullanıldığında görünen akımdaki büyük dalgalanmalar MPC tork kontrolcüsünün PID tork kontrolcüsünden daha iyi akım karakteristiğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Çizdirilen tork sonuç grafiğindeki PID tork kontrolcüsü yerine MPC tork kontrolcüsü kullanmak sistemde yapılan testlerdeki hata payını düşürdüğünden dolayı, MPC kontrolcüsünün tasarlanmış olan PID tork kontrolcüsüne tercih edilmesinin bir anlamda testlerin doğruluk payını yükseltmesi anlamına gelebilmektedir.

EYB sistemindeki oluşan bozucu momentlerle birlikte eksen kaçıklarından dolayı da test sistemi olumsuz etkilenebilmektedir. Dolayısıyla test sistemindeki elemanların eksenli olması ve mümkün olduğunca eksek kaçıklığının en küçük değerde tutulması son derece önemlidir. Ayrıca MPC tork kontrolcüsü tasarımı sonrası gerçek zamanlı testlerde doğrulanması sırasında kontrol bloklarına tork ve akım limitleri koyularak

tork ölçer sensör başta olmak üzere sistem için güvenlik önlemi alınmalıdır.

Gelecek çalışmalar için EYB sisteminde bozucu moment modellemesi yapılarak ve sistemdeki ikinci kaplin de modellemeye dahil edilerek sistem kontrolünde iyileştirme yapılması önerilmektedir.



## KAYNAKÇA

- Baskın, M. (2015). LQG/LTR, H-infinity and Mu Robust Controllers Design for line of sight stabilization. *Middle East Technical University* .
- Bemporad, A., Morari, M., & Ricker, N. L. (2000). *The MPC Simulink Library*. cse.lab.imtlucca.it. adresinden alınmıştır.
- Bishop, R. (2005). Model Based Predictive Control. *CRC Press*, 1 (16), 1-14.
- Canon, M. (2016). *C21 Model Predictive Control*.
- Çardaklı, H. İ. (2005). İnsan-Makina Etkileşimli Bilgisayar Deneyi Kullanarak İnsan Operatörlerin Parametreik ve Akıllı Sistemlerle Modellenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi* .
- Daş, E., & Başlamışlı, S. Ç. (2020). Robust data-driven fixed-order controller synthesis: Model matching approach. *IET Control Theory & Applications* .
- Gu, S., & Chen, X. (2020). The Basic Algorithm for the Constrained Zero-One Quadratic Programming Problem with k-diagonal Matrix and Its Application in the Power System. *Mathematics*, 1 (8), 138.
- Hsiao, C. Y., Yeh, S. N., & Hwang, J. C. (2011). A Novel Cogging Torque Simulation Method for Permanent-Magnet Synchronous Machines. 2166-2179.
- Li, Z. (2018). Robotics: ScienceandSystems Model Predictive Control (MPC). *University of Edinburgh* .
- Mare, J. C. (2006). Dynamic loading systems for ground testing of high Speed aerospace actuators. *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, 78, 275-282.
- Mendes, T., Catalão, J. P., Pouresmaeil, E., Oliveira, D., Rodrigues, E. M., & Pouresmaeil, E. (2015). MPC weightstunning role on the energy optimization in residential appliances. *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* , 1-6.
- Miki Pulley*. (2018). mikipulley.co. adresinden alınmıştır.
- Mikuláš, O. (2013). Quadratic Programming Algorithms for Fast Model-Based Predictive Control. Bachelorthesis. *Czech Technical University in Prague* .
- Orukpe, P. E. (2012). Model Predictive Control Fundamentals. *Nigerian Journal of Technology*, 2 (31), 139-148.
- Ölçer, T. U. (2013). *H2/H $\infty$  Mixed Robust Controller Synthesisfor A Fin Actuation System*.
- Ramasamy, V. S. (2019). Optimal Tuning of Model Predictive Controller Weights

- Using Genetic Algorithm with Interactive Decision Tree for Industrial Cement Kiln Process. *Processes*, 7 (12), 938.
- Ullah, N. K. (2014). High performance direct torque control of electrical aerodynamics load simulator using fractional calculus. *Acta Polytechnica Hungarica*, 10 (11), 59-78.
- Ullah, N., & Wang, S. (2013, January). Higher order error dynamics based backstepping controller design for electrical load simulator. *10th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST)* , 49-53.
- Ullah, N., Wang, S., & Aslam, J. (2011, August). Adaptive robust control of electrical load simulator based on fuzzy logic compensation. *International Conference on Fluid Power and Mechatronics* , 861-867.
- Ullah, N., Wang, S., & Wang, X. (2015). Fuzzy backstepping torque control of passive torque simulator with algebraic parameters adaptation. *Journal of Electrical Engineering*, 66 (4), 203-213.
- Wang, L., Wang, M., & Guo, B. (2018). An Electric Load Simulator with Fast Dynamic Response Based on Matrix Converter. *IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)* , 1–6.
- Wang, L., Wang, M., Guo, B., Wang, Z., Wang, D., & Li, Y. (2017). A loading control strategy for electric load simulators based on proportional resonant control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 6 (65), 4608-4618.
- Wang, X., & Wang, S. (2011, June). High performance torque controller design for electric load simulator. *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* , 2499-2505.
- Wang, X., Wang, S., & Wang, X. (2009). Electrical load simulator based on velocity-loop compensation and improved fuzzy-PID. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* , 238-243.
- Wei, Z. Q. (2013). Design and Application of Large Torque Electrical Load Simulator. *In Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publications Ltd.*, 427, 660-663.
- Yang, D., & Wang, X. (2011, August). Surplus torque elimination of electrical load simulator based on servo error signal. *International Conference on Fluid Power and Mechatronics* , 949-952.
- Yedamale, P. *Microchip AN885 Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. MicrochipTechnology Inc.