

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKSTREMUM ARAMA METODU VE ELEKTRİK SÜRÜCÜ
SİSTEMLERİNDE UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Zafer ONAT

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yaprak YALÇIN

OCAK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKSTREMUM ARAMA METODU VE ELEKTRİK SÜRÜCÜ
SİSTEMLERİNDE UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Zafer ONAT
518101025**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yaprak YALÇIN

OCAK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518101025 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Zafer ONAT** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**EKSTREMUM ARAMA METODU VE ELEKTRİK SÜRÜCÜ SİSTEMLERİNDE UYGULAMALARI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Yaprak YALÇIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Yaprak YALÇIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Nevra BAYHAN
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 18 Kasım 2015
Savunma Tarihi : 06 Ocak 2016

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın tüm safhalarında bana her konuda yardımcı olan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Yaprak YALÇIN'a ve yetişmeme katkı sağlayan tüm öğretmenlerime teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Tüm yaşamım boyunca benim için hiç bir fedakarlıktan kaçınmayan aileme, her koşulda destek olan eşime, çocukluğumdan beri yanımdan ayrılmayan değerli dostlarıma ve çalışırken yüksek lisans yapmama imkan sağlayan bütün yöneticilerime sonsuz şükranlarımı sunarım.

.

Kasım 2015

Mehmet Zafer ONAT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
2. EKSTREMUM ARAMA METODU	3
2.1 Amaç	3
2.2 Ekstreum Arama Metodunun Temel Prensibi	3
2.3 Ekstreum Arama Metodu için Farklı Yaklaşımlar	3
2.3.1 Analog Tabanlı Ekstreum Arama Metodları	4
2.3.1.1 Kaydırma Modu Tabanlı Ekstreum Arama Metodu	6
2.3.1.2 Bozucu Sinyali Tabanlı Ekstreum Arama Metodu	7
2.3.1.3 Eğim Tabanlı Ekstreum Arama Metodu	7
2.3.2 Sayısal Optimizasyon Tabanlı Ekstreum Arama Metodu	10
3. EKSTREMUM ARAMA METODU KULLANIM ÖRNEKLERİ ve	
YÖNTEMLERİN BAŞARIMININ İNCELENMESİ	13
3.1 ABS Fren Sisteminde Ekstreum Arama Metodu	13
3.1.1 Bozucu Sinyali Tabanlı Ekstreum Arama Metodu ile ABS	15
3.1.2 Kaydırma Modu Tabanlı Ekstreum Arama Metodu ile ABS	17
3.1.3 Sayısal Optimizasyon Tabanlı Ekstreum Arama Metodu ile ABS	19
3.2 Ekstreum Arama Metodu ile Güneş Enerji Sistemleri için Maksimum Güç	
Noktası Takibi	22
3.2.1 Eğim Tabanlı ESC Tekniği ile MPPT.....	24
3.2.2 Bozucu Sinyali Tabanlı ESC Tekniği ile MPPT.....	25
3.2.3 Kaydırma Modu Tabanlı ESC Tekniği ile MPPT.....	28
4. EKSTREMUM ARAMA METODU İLE MODEL ÖNGÖRÜLÜ	
KONTROLÜN BİRLİKTE KULLANIMI.....	31
4.1 Model Öngörülü Kontrol.....	31
4.2 Gerçek Zamanlı Optimizasyon (RTO) ve Model Öngörülü Kontrol	34
5. ESC YÖNTEMİNİN ELEKTRİK SÜRÜCÜ SİSTEMLERİNE	
UYGULANMASI	35
5.1 SMSM'nin Matematiksel Modeli ve Vektör Denetim İlkesi	35
5.2 SMSM Kontrolünde MPC Yönteminin Kullanılması.....	37
5.3 MPC Yönteminin Temelleri.....	37
5.4 MPC Yönteminin için Ayırık Zamanlı Sürücü Modeli.....	37
5.5 MPC Yönteminin MATLAB/SIMULINK ile Elektrik Sürücü Sistemine	
Uygulanması.....	38

5.6 ESC Yönteminin MPC ile Entegre Edilerek MATLAB/SIMULINK ile Elektrik Sürücü Sistemine Uygulanması	42
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45
KAYNAKLAR.....	47
EKLER	50
ÖZGEÇMİŞ.....	55

KISALTMALAR

ESC	: Ekstremum Arama Metodu ile Kontrol (Extremum Seeking Control)
MPC	: Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control)
MAC	: Model Algoritmik Kontrol
DMC	: Dinamik Matris Kontrol
GMC	: Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol
PV	: Güneş Enerjisi Paneli (Photovoltaic Panel)
RTO	: Gerçek Zamanlı Optimizasyon (Real Time Optimization)
ABS	: Blokaj Önleyici Sistem (Anti Blocking System)
MPPT	: En Yüksek Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking)
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
SMSM	: Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Ekstremum Arama Metodu Temel Kontrol Şeması [4].	2
Şekil 2.1 : Ekstremum Arama Metodu Genel Kontrol Şeması.[13]	4
Şekil 2.2 : Analog Tabanlı Ekstremum Arama Metodu Genel Kontrol Şeması [4]	5
Şekil 2.3 : Kaydırma Modu Tabanlı ESC Kontrol Şeması [15].	6
Şekil 2.4 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC Kontrol Şeması [15].	7
Şekil 2.5 : Eğim Tabanlı ESC Kontrol Şeması [18].	8
Şekil 2.6 : Newton Tabanlı ESC Kontrol Şeması [19].	9
Şekil 2.7 : Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC Kontrol Şeması [22].	11
Şekil 3.1 : Araç Tekerleğine Etki Eden Kuvvetler [9].	14
Şekil 3.2 : Sürtünme Kuvveti Katsayısı [9].	15
Şekil 3.3 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile ABS Kontrolünün Şeması [9].	15
Şekil 3.4 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile ABS Kontrolünün Simülasyon Sonuçları: (A) Sürtünme Kuvveti Katsayısı; (B) Kayma; (C) Doğrusal Hız ve Açısız Hız; (D) Frenleme Momenti [9].	17
Şekil 3.5 : Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile ABS Kontrol Sisteminin Blok Şeması [9].	18
Şekil 3.6 : Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile ABS Kontrol Sisteminin Simülasyon Sonuçları: (A) Sürtünme Kuvveti Katsayısı; (B) Kayma; (C) Doğrusal Hız ve Açısız Hız; (D) Frenleme Momenti [9].	19
Şekil 3.7 : Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC ile ABS Kontrol Sisteminin Blok Şeması [9].	20
Şekil 3.8 : Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC ile ABS Kontrolünün Simülasyon Sonuçları: (A) Sürtünme Kuvveti Katsayısı; (B) Kayma; (C) Doğrusal Hız ve Açısız Hız; (D) Frenleme Momenti [9].	21
Şekil 3.9 : PV Eşdeğer Devresi [25].	23
Şekil 3.10 : PV Güç-Akım ve Gerilim Karakteristiği [25].	23
Şekil 3.11 : PV MPPT Temel Kontrol Şeması [25].	24
Şekil 3.12 : Eğim Tabanlı ESC ile MPPT Temel Kontrol Şeması [25].	24
Şekil 3.13 : Eğim Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan Değerindeki PV Sisteminin 25°C’de 1 kW/m ² Düzenli Aydınlatma Altındaki Zaman Cevabı [25].	25
Şekil 3.14 : Eğim Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan PV Sisteminin Aydınlatma Seviyesinin T=2s’de 25°C’de 0.6 kW/m ² Değerine Düştüğünde Zaman Cevabı [25].	25
Şekil 3.15 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile MPPT Temel Kontrol Şeması [25].	26
Şekil 3.16 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile MPPT Gösterimi [25].	26
Şekil 3.17 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan Değerindeki PV Sisteminin 25°C’de 1 kW/m ² Düzenli Aydınlatma Altındaki Zaman Cevabı [25].	27

Şekil 3.18 :Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan PV Sisteminin Aydınlık Seviyesinin $T=2s$ 'de $25^{\circ}C$ 'de 0.6 kW/m^2 Değerine Düştüğünde Zaman Cevabı [25].	27
Şekil 3.19 :Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile MPPT Temel Kontrol Şeması [26].	28
Şekil 3.20 :Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan Değerindeki PV Sisteminin $25^{\circ}C$ 'de 1 kW/m^2 Düzenli Aydınlık Altındaki Zaman Cevabı [25].	29
Şekil 3.21 :Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan PV Sisteminin Aydınlık Seviyesinin $T=2s$ 'de $25^{\circ}C$ 'de 0.6 kW/m^2 Değerine Düştüğünde Zaman Cevabı [25].	29
Şekil 3.22 :PV MPPT için Kullanılan ESC Tekniklerinin Grafikselsel Karşılaştırması [25].	30
Şekil 4.1 : Model Öngörülü Kontrol Örneği [27].	32
Şekil 4.2 : Model Öngörülü Kontrol Blok Şeması [27].	33
Şekil 4.3 : ESC ile MPC Kontrol Blok Şeması [27].	34
Şekil 5.1 : SMSM'nin D-Eksen Eşdeğer Devresi [28].	36
Şekil 5.2 : SMSM'nin Q-Eksen Eşdeğer Devresi [28].	36
Şekil 5.3 : MATLAB/SIMULINK MPC Bloğunun Giriş-Çıkış Yapısı [32].	39
Şekil 5.4 : MPC ile SMSM Sürücü Modelinin Hız Kontrolü	40
Şekil 5.5 : SMSM Sürücü Modelinin MPC ile Kontrolü Durumunda Kontrol İşaretleri (MV)	40
Şekil 5.6 : MPC Kontrolörünün Ölçüt Fonksiyonu	40
Şekil 5.7 : MPC ile SMSM Sürücü Modelinde Belirsizlik Olması Durumundaki Hız Kontrolü	42
Şekil 5.8 : MPC&ESC ile SMSM Sürücü Modelinin Hız Kontrolü	43
Şekil 5.9 : SMSM Sürücü Modelinin MPC&ESC ile Kontrolü Durumunda Kontrol İşaretleri (MV)	43
Şekil 5.10 :MPC Kontrolörünün Ölçüt Fonksiyonu	44
Şekil 5.11 :MPC&ESC ile SMSM Sürücü Modelinde Belirsizlik Olması Durumundaki Hız Kontrolü	44

EKSTREMUM ARAMA METODU VE ELEKTRİK SÜRÜCÜ SİSTEMLERİNDE UYGULAMALARI

ÖZET

Bu çalışmanın amacı Elektrik Sürücü Sistemlerinde Ekstreum Arama Metodu (ESC) ile performans iyileştirilmesinin sağlanmasıdır. Bu amaca yönelik olarak öncelikle Ekstreum Arama Metodu üzerinde durulmuş, kontrol yapısının hangi farklı yaklaşımlarla oluşturulduğu anlatılmıştır. Literatürde yer alan farklı tipteki ESC algoritmaları Analog Tabanlı ESC Kontrolü ve Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC Kontrolü ana başlıkları altında incelenmiştir. Analog Tabanlı ESC Kontrolü ana başlığı altındaki yöntemler olan Kaydırma Modu Tabanlı ESC, Eğim Tabanlı ESC ve Bozucu Sinyali Tabanlı ESC yöntemleri ayrı ayrı tanıtılmıştır. ESC kontrol algoritmasının gerçek zamanlı optimizasyon yapılmak amacıyla kullanıldığı sistemler uygulama örnekleri verilerek aktarılmıştır. Uygulama örnekleri, literatürde ESC'nin en yaygın olarak araştırılan konular olan otomobillerdeki “Blokaj Önleyici Sistem (ABS) ile güneş enerjili alternatif enerji kaynaklarının verimini arttırmak için kullanılan “En Yüksek Güç Noktası Takibi” (MPPT) uygulamalarıdır. Literatürde yer alan bu uygulama örneklerinin sonuçları üzerinden edinilen izlenimler ve karşılaştırma sonuçları doğrultusunda tez çalışmasına şekil verilmiştir. ESC kontrol tekniklerinin incelenmesiyle, elektrik sürücü sistemlerinde gerçek zamanlı optimizasyon yöntemi olarak sadece ESC'nin kullanılmasının yetersiz olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda başka bir optimizasyon yapısı olan Model Öngörülü Kontrol (MPC) konusu incelenmiştir. MPC'nin kullanımı araştırılmış ve gerçek zamanlı optimizasyon yöntemi olan ESC ile birlikte kullanımı incelenmiştir. Daha sonra elektrik sürücü sistemlerinin tanımlaması yapılmış ve elektrik sürücü sistemlerinde günümüzde yaygın olarak kullanılan kontrol yapısı incelenmiştir. Benzer şekilde elektrik sürücü sistemi tarafından kontrol edilecek Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) yapısı incelenmiş ve elektriksel eşdeğer devresi üzerinden matematiksel modeli ortaya çıkarılmıştır. SMSM'e ait elektriksel, mekanik ve dinamik denklemler elde edilmiş ve bunlar durum uzay denklemi formatında ayrık zamanlı hale getirilmiştir. Böylelikle SMSM, bir kontrol algoritması tarafından kontrol edilmeye uygun şekilde ifade edilmiştir. Bu bağlamda önceki bölümlerde araştırılan MPC'nin elektrik sürücü sistemlerinde kontrolör olarak kullanılmasına yönelik simülasyon çalışması yapılmıştır. Son olarak ise elektrik sürücü sisteminin gerçek zamanlı kontrol performansının artırılabilmesi için MPC ile ESC yönteminin birlikte kullanımının elektrik sürücü sistemlerine uygulanması simülasyon ortamında gerçekleştirilerek başarımlı incelenmiştir.

EKSTREMUM SEEKING CONTROL AND APPLICATIONS IN ELECTRIC DRIVE SYSTEMS

SUMMARY

The goal of thesis is to provide better performance in electrical drive systems with using Extremum Seeking Control. In the direction of this goal, firstly, Extremum Seeking Control (ESC) has been researched and the different approaches to ESC algorithm are defined in detail. The different types of ESC algorithm in the literature are separated under two main classes. First class is named as Analog Based Extremum Seeking Control and the second class is Numerical Optimization Based Extremum Seeking Control. The methods, which are observed under first class, Analog Based Extremum Seeking Control, are Sliding Mode Based Extremum Seeking Control, Gradient Based Extremum Seeking Control and Perturbation Based Extremum Seeking Control. The second type of ESC, which is observed in the class of Numerical Optimization Based Extremum Seeking Control, is given in detail with the different types of the numerical optimization methods. Then, implementation examples exists in the literature are researched in the scope of the different ESC techniques. One of the implementation example is ABS system, which provides life-saving protection for the people and the sector. This implementation example is not only a very critical technological improvement, but also a spotlight to make ESC understandable in this thesis. The other implementation example for the ESC is maximum power point tracking systems for solar energy systems. These implementation examples then determined for making comparison of the different ESC methods. After making comparison, the objective of the thesis become clear. By researching different types of ESC, it is clarified that using only ESC as a control method of the electrical drive system may not meet the drive's real time optimization requirements. For this reason, Model Predictive Control (MPC), which is another optimization method, is observed. Furthermore, the research become deeper in the objective of using MPC with integration of ESC as a real time optimization control method.

In this thesis, the permanent magnet synchronous motor is considered, which will be driven by the electrical drive. This kind of motor become popular because of its innovative technology. With the improvement of the permanent magnet technology, this kind of motors become more feasible than classical asynchronous motors. It allows to a better speed control of the loads. Due to its high torque output at the low speed, it is not necessary to use extra reduction units such as gearboxes. By this way, it is possible to make more reliable and economical systems with eliminating an equipment from a drive system. For this thesis, the equivalent circuits of the permanent magnet synchronous motor are given. In the spotlight of the equivalent circuits, motor's state-space equations are obtained. This state-space equations then used as system model in model predictive control. It should be mentioned that the system model and controllers in this thesis are in linear form.

MPC is a model based control method that is based on prediction of the controlled system's behaviors on next time steps. In order to achieve this goal, a prediction horizon is defined within MPC. In MPC using larger horizons has the great potential to give better performance, but requires more computational effort at each sampling period to solve optimization problem. Electrical drives are an interesting application area for MPC at least two reasons

- It can be obtained its linear model both by analytical means and by identification techniques.
- Limits on drive variables are important for the drive system dynamics. The presence of the system constraints is one of the main reasons why state-space controllers have limited application in electrical drives.

Despite MPC has this kind of advantages for the electrical drive systems, MPC applications to electrical drives are still largely unexplored. In this thesis, system constraints, which are very important for MPC, are defined carefully.

The control of an electrical drive, which drives a permanent magnet synchronous motor with MPC, is simulated via MATLAB/SIMULINK in this thesis. First, system model is created on an m-file then it is sent to the MATLAB workspace. Then, the discrete-time state-space system, which is ready on the workspace, is introduced to the MPC controller, which takes place on SIMULINK. After introducing the system model to the controller, the prediction horizon, the control horizon, constraints and tuning parameters such as weights are defined. Then the control system is simulated with two different simulation scenarios. In the first scenario, while the system works normally in its reference speed, the load is changed (increased). By this way, the MPC controller is tested in varying load conditions. The second scenario is a little different from the normal conditions. In this scenario, system has uncertainties on the parameters of inertia and friction of the rotor. By this way, the MPC controller is tested on a system, which has an uncertainty.

To achieve the goal of this thesis, a simulation in MATLAB/SIMULINK is done for simulating an ESC controller in the electrical drive application. As mentioned before, ESC and MPC controllers are integrated and applied to an electrical drive system. The idea that is introduced in this thesis is that the performance of a model based MPC controller can be combined with the robustness of a model-free ESC algorithm for simultaneous identification and control of linear discrete time systems with structural uncertainties. While regulation and identification are conflicting objectives, by identifying the system dynamics online and updating the MPC prediction model, the closed loop performance is improved relative to a standard MPC controller. ESC&MPC controller, which combines two different methods together, merges a model based linear MPC algorithm with a model free ESC algorithm to realize an iterative learning MPC that adjusts to structured model uncertainties. In the simulation of the ESC&MPC controller in MATLAB/SIMULINK, very similar to the MPC controller's simulation, first an m-file is compiled to define system's nominal operating point. Then, in order to combine ESC algorithm with the MPC, a code generated in a Matlab Function on a SIMULINK model with appropriate input-output configuration. On the other hand, the MPC controller must allow updating the defined system model. For this reason, Adaptive MPC Controller block is used for the simulation. To complete the integration of two controllers, the system model parameters that comes from ESC Matlab Function Block are arranged with the correct order for the Adaptive MPC

controller. The MPC parameters such as constraints and weights are adjusted and the two different simulation scenarios that are defined above are applied for ESC&MPC controller.

In order to make a comparison between the simulation results of the MPC controlled electrical drive and ESC&MPC controlled electrical drive, same simulation steps are applied to both of the controllers. Both of the controllers are seems successful for normal conditions in speed control of the PMSM electrical drive. They both follow the reference speed without any problem. To make the simulation harder, a load is applied to the motor while it is operating. In the second simulation scenario, the system that will be controlled is become a system which contains uncertainties. These uncertainties are added to the system parameters and simulated with both of the controllers. In Simulation of the MPC controller is lost its speed reference and never tried to catch the reference again. Oppositely, in simulation of the ESC&MPC controller, system tried to catch the reference again and finally – within very short time period- catches the reference again and succeeds to eliminate the structural uncertainties.

To conclusion, when the MPC controller is supported with a real time optimization algorithm ESC, it became highly effective controller even with the parametric uncertainties. However, a big problem must be solved before make this controller usable in the real life. ESC&MPC controllers need very high computational capabilities in very short time steps. Therefore, implementation of this controller for real applications would be possible when faster and much capable microprocessors will be produced.

1. GİRİŞ

Ekstremum Arama, yerel minimum veya maksimuma sahip doğrusal olmayan giriş-çıkış ilişkisi bulunan sistemler gibi hakkında sadece sınırlı bilgiye sahip olunan dinamik modeller için model temelli olmayan gerçek zamanlı bir yaklaşımdır [1]. Aslında temeli 1920'li yıllara dayanan bu yaklaşım [2], uygulamalarda popüler olmaya başladığı yirminci yüzyılın ortalarında kararlılığı kanıtlanana kadar on yıllar boyunca neredeyse üzerinde hiç durulmamıştır. Ancak kararlılığı kanıtlandıktan sonra ileri teorik geliştirmeler ve uygulamalar yapmak için ilgi çekici hale gelmiştir [3]. Ekstremum arama metodu (ESC), 1940'lı yıllardan beri kontrol sistemlerinde ilgi çekici bir araştırma konusu olmuştur. Akışkanlar dinamiği, biyomedikal sistemler, otomatik pilot sistemleri, ABS, elektrikli sürücü sistemlerindeki son uygulamalar bu karakteristiği gösteren başlıca uygulama alanlarıdır [1, 4].

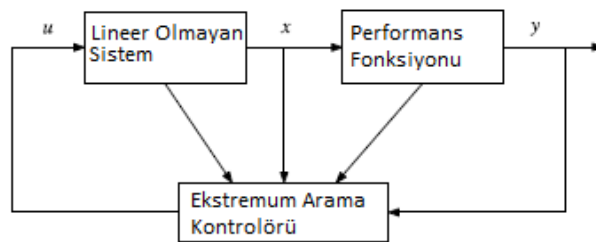
Elektrik enerjisi ihtiyacı, teknolojik yeniliklerin büyük bir hızla ilerlemesi, insanların yaşam koşullarının farklılaşması ve sanayinin gelişmesiyle birlikte günden güne artarak kritik bir hale dönüşmüştür. Ülkeler elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilmek için büyük yatırımlar yaparak yeni tesisler kurmaktadır. Bu tesislerin inşası ve üretime geçmesiyle birlikte çeşitli çevresel etkiler oluşmakta ve bu etkilerin doğaya verdiği zarar dolayısıyla dünyanın ekosistemi bozulmakta, bu da yaşamı olumsuz etkilemektedir. Dünyanın doğal dengesinin bozulmasını önlemek adına alternatif enerji sistemleri geliştirilmiş ve elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar, güneş, jeotermal, dalga vb. gibi dünyanın doğal ve sürdürülebilir kaynaklarının kullanılmasıyla elde edilmesi sağlanmıştır. Böylece fosil yakıtlarla üretilen elektriğin yerini alternatif enerji kaynaklarının alması ve CO₂ salınımının azaltılarak doğal dengeyi bozan en önemli unsur olan küresel ısınmanın önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Ancak, günümüz teknolojisindeki alternatif enerji kaynaklarının yeterince verimli olmaması ve aynı zamanda bu kaynaklarla üretilen elektriğin yeterince ekonomik olmaması, artan ihtiyacı karşılamak adına elektrik üretiminin büyük bölümünün halen fosil yakıtlarla karşılanmasına devam edilmesine yol açmaktadır [5].

Alternatif enerji teknolojisi bir yandan geliştirilmeye devam edilirken, diğer bir yandan elektriğin tüketim noktasında neler yapılabileceği araştırılmakta ve verimli enerji kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Böylelikle üretilen elektriğin en yüksek oranda kullanımı sağlanarak üretim kapasitesinin boş yere işgal edilmesi önlenip elektrik enerji ihtiyacının artış hızının düşürülmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, enerji verimliliği üzerine uluslararası standartlar belirlenmiş ve bu standartlara uyum konusunda tüketiciler çeşitli yaptırım zorunluluklarıyla kontrol altına alınmıştır [6].

Elektrik enerjisinin daha verimli kullanılmasına yönelik ihtiyaç, teknolojinin bu doğrultuda geliştirilmesine eğilimi arttırmıştır. Bu doğrultuda elektrik enerjisinin ana kullanım alanları araştırılmış ve elektriğin çok büyük oranda sanayide elektrik motorları üzerinde harcandığı anlaşılmıştır. Bu alanda hem enerji verimliliğini artırmak için hem de operasyon sırasında yaşanan sorunların önüne geçebilmek için elektrik motorlarının çalıştırılmasında sürücü teknolojisi keşfedilmiş ve kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan motor sürücülerinde enerji verimliliği şartlarını sağlamak ve kullanıldığı sistemi daha kontrol edilebilir hale getirmek adına farklı kontrol yaklaşımları uygulanmaktadır [7, 8]. Bu nedenle bu tezde ESC yöntemleri incelenmiş ve MPC yöntemi ile birlikte kullanımı ile sürücü sistemlerinin performans iyileştirilmesinin olanakları araştırılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezde Ekstremum Arama Metodu araştırılıp, bu yaklaşımdaki farklı teknikler ve aralarındaki farklılıklar incelenecektir. Başka bir optimal kontrol yöntemi olan Model Öngörülü Kontrol ile tezin araştırma konusu olan Ekstremum Arama Metodunun birleştirilmesi incelenecek ve elektrikli sürücü sistemlerinin performansının iyileştirilmesi amacıyla bu iki yöntemin birleşiminin bir elektrikli sürücü sistemine uygulaması gerçekleştirilecektir.



Şekil 1.1 : Ekstremum Arama Metodu Temel Kontrol Şeması [4].

2. EKSTREMUM ARAMA METODU

2.1 Amaç

Bu bölümde Ekstreum Arama Metodu araştırılıp, bu yaklaşımdaki farklı teknikler ve aralarındaki farklılıklar incelenecektir.

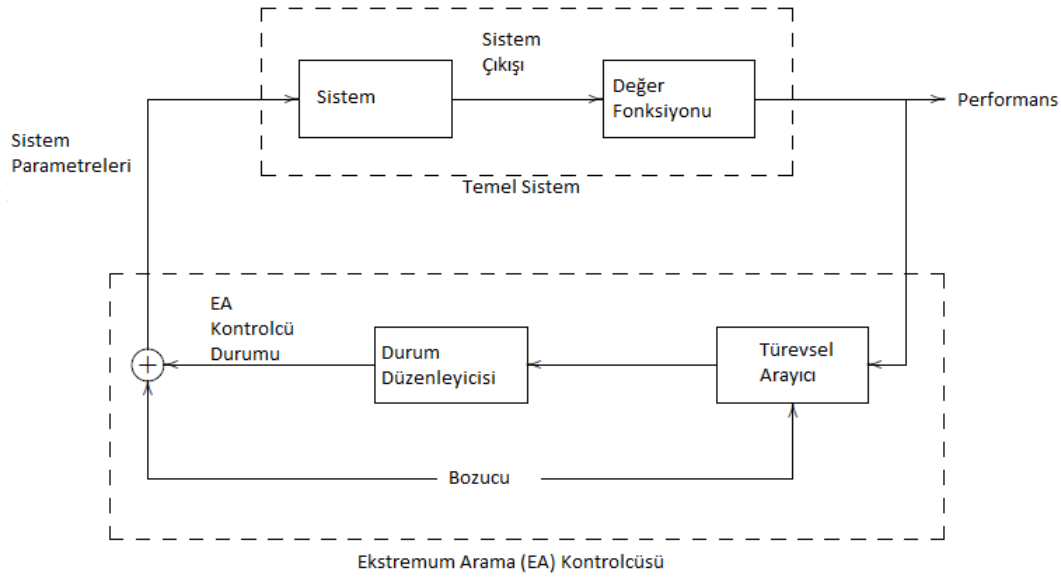
2.2 Ekstreum Arama Metodunun Temel Prensibi

Ekstreum Arama Metodu (ESC), sistemin performans (ölçüt) fonksiyonunun maksimum veya minimumunu arayan bir kontrol algoritmasıdır ve referans eğrisi veya referans noktası bilinmeyen ancak bunların çalışma esnasında canlı olarak arandığı sistemlerin kontrol problemlerini kapsar [8]. ESC, aynı zamanda bir uyarlamalı kontrol metodudur ancak uyarlamalı kontrol metodu ile ESC arasındaki temel fark; ESC'nin, uyarlamalı kontroldeki referans model davranışının sistem parametre belirsizlikleri ya da değişimleri durumunda da takip edilmesi (model referans sistem ile aynı başarımın elde edilmesi amacı) amacındaki model izleme kavramını tam olarak içermemesidir. ESC'nin bu model temelli olmayan karakteri, son dönemdeki kontrol sistemlerini iyileştirme metotları arasında ön plana çıkmasını sağlamıştır. ESC, doğrusal olmayan ve yerel maksimum ve minimum noktaları barındıran kontrol problemleri için hem sistem çıkışının istenen en uygun değere ulaşmasını ayarlamak hem de geri besleme parametrelerinin ayarlamasını sağlamak amacıyla uygulanabilecek bir kontrol metodudur [8, 9, 10].

2.3 Ekstreum Arama Metodu için Farklı Yaklaşımlar

Ekstreum arama metodu için literatürde genel olarak iki başlık altında dört farklı yöntem önerilmiştir. Bu iki ana başlık Zhang'ın [4] Analog Tabanlı Ekstreum Arama ve Sayısal Optimizasyon Tabanlı Ekstreum Arama yaklaşımlarıdır. Analog Tabanlı Ekstreum Arama ana başlığı; Kaydırma Modu Tabanlı Ekstreum Arama [11], Bozucu Sinyali Tabanlı Ekstreum Arama [1] ve Eğim Tabanlı Ekstreum Arama [12] olarak anılan üç yöntemi içermektedir. Dördüncü yöntem ise aynı

zamanda ikinci ana başlığa da adını veren Sayısal Optimizasyon Tabanlı Ekstremum Arama Metodu 'dur. [13] .



Şekil 2.1 : Ekstremum Arama Metodu Genel Kontrol Şeması.[13]

2.3.1 Analog Tabanlı Ekstremum Arama Metodları

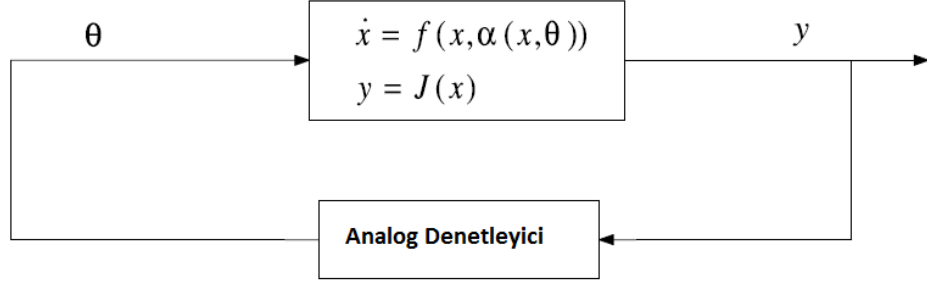
Bu bölümde genel doğrusal olmayan sistemin, doğrusal olmama durumunun referanstan çıkışa eşitlik haritası ile ekstremum noktasına ulaştığı maksimum arama kontrolü şeklinde ifade edilebilecek kontrol metodu üzerinde durulacaktır. Burada sistemin her bir denkleminin kararlı olduğu veya yerel bir geri besleme kontrolörü ile kararlı hale getirilebileceği varsayılmıştır. Basit kontrol kuralının bilindiği varsayılarak;

$$u = \alpha (x, \theta) \quad (2.1)$$

skaler θ parametreleriyle ifade edilmiştir. Kapalı çevrim sistem;

$$\dot{x} = f (x, \alpha (x, \theta)) \quad (2.2)$$

Daha sonra θ parametreleriyle dengelenmiştir.



Şekil 2.2 : Analog Tabanlı Ekstremum Arama Metodu Genel Kontrol Şeması [4]

Buradaki kapalı çevrim sistem için bazı varsayımlar yapılmıştır.

A1. $l: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ olan bir düzeltme fonksiyonu mevcuttur.

A2. $f(x, \alpha(x, \theta)) = 0$ ancak ve ancak $x = l(\theta)$

A3. Her $\theta \in \mathbb{R}$ için sistemdeki $x = l(\theta)$ eşitliği yerel üstel kararlıdır.

A4. $\theta^* \in \mathbb{R}$ için

$$(J \circ l)'(\theta^*) = 0 \quad (2.3)$$

$$(J \circ l)''(\theta^*) < 0 \quad (2.4)$$

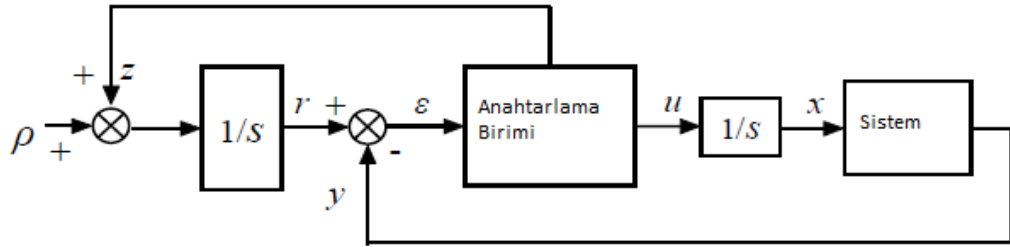
varsayımları yapılmıştır. Bu varsayımlar doğrultusunda, çıkış haritasının $\theta = \theta^*$ durumundan maksimumu olduğu düşünülebilir.

$$y = J(l(\theta)) \quad (2.5)$$

Amacımız, θ^* , J ve l fonksiyonlarına gerek duymadan y 'nin kararlı hal değerini maksimize edecek bir geri besleme mekanizması geliştirmektir. Bu varsayımlarda bulunmak, performans fonksiyonunun n -boyutlu optimizasyonunu kararlı haldeki tek boyutlu optimizasyon problemine dönüştürür. Böylece Ekstremum Arama Kontrolünün tasarımı, θ parametresi için nasıl bir optimizasyon kuralının tasarlanması gerektiği üzerinde durur. Bu çerçevede, Analog Tabanlı Ekstremum Arama Metodunun modelden bağımsız olmasına olanak tanır [4].

2.3.1.1 Kaydırma Modu Tabanlı Ekstremum Arama Metodu

Kaydırma Modu Tabanlı Ekstremum Arama Metodu 70'lerin başlarında Korovin ve Utkin tarafından önerilmiştir. Bu metot sisteme öncü bir sinyalin verilmesini temel alır. Geleneksel kontrol problemlerinin aksine, Ekstremum Arama Metodu çerçevesinde amaç fonksiyonunun optimum değeri bilinmediğinden referans değer de bilinmemektedir [14]. Kaydırma Modu Tabanlı Ekstremum Arama Metodunda performans fonksiyonunun bilinmediği ancak çıkışının ölçülebildiği kabul edilmektedir. Buradaki kaydırma yüzeyi, performans fonksiyonunun artan (ya da azalan) yönde takip etmeye zorlandığı fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda arama sinyali, sürekli olmayan periyodik anahtarlama olarak seçilmektedir.



Şekil 2.3 : Kaydırma Modu Tabanlı ESC Kontrol Şeması [15].

Şekil 2.4 ile verilen Kaydırma Modu Ekstremum Arama Metodu örnek kontrol şemasında yer alan değişkenler aşağıda tanımlanmıştır.

x: Sistemin düzeltilmiş giriş sinyali

y: Sistemin çıkışı

u, z: x ve y sinyallerini optimum değerde tutmak için gerekli anahtarlama elemanları

r: Sistem çıkışının optimum değeri

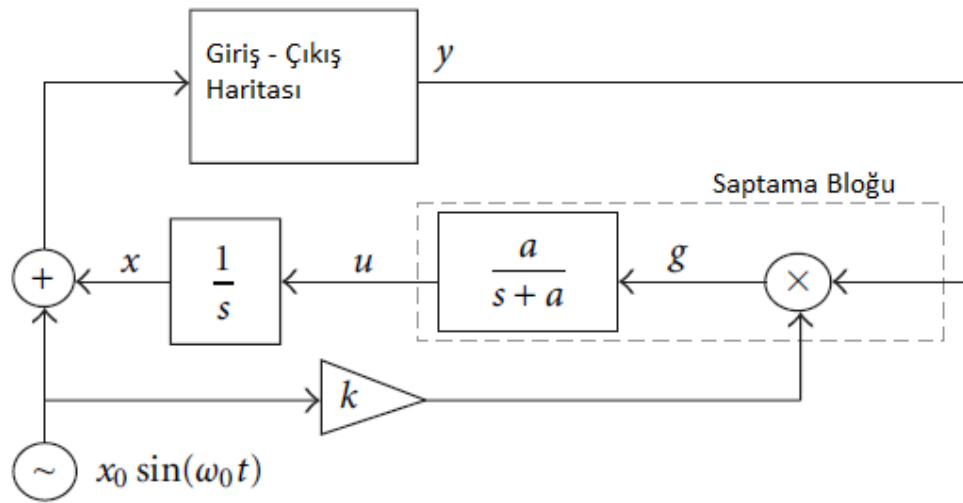
ϵ : Hata sinyali ($\epsilon = r - y$)

ρ : r'ye verilen giriş değeri (sabit)

Sisteme etki eden ρ parametresinin sistemin vermesi istenen cevaba uygun olarak seçilmesi büyük önem taşımaktadır. ρ parametresinin gereğinden büyük ya da küçük seçilmesi, sistemin ekstremum noktalarına uzak kalmasına ya da cevabın gecikmesine yol açacaktır [15].

2.3.1.2 Bozucu Sinyali Tabanlı Ekstremum Arama Metodu

Sistem hakkında çok sınırlı bilginin mümkün olduğu model tabanlı olmayan gerçek zamanlı optimizasyon sistemleri için belirleyici periyodik bozucu sinyallerin kullanılarak Ekstremum Arama Metodunun uygulanması en etkin metotlardan biri olarak ortaya çıkmaktadır. Bozucu Sinyali Tabanlı Ekstremum Arama Metodu, ortalama değeri sıfır olan bozucu sinyalleri kullanarak bir eğim tahmini oluşturan gerçek zamanlı optimizasyon yöntemidir. Buradaki eğim tahmini, daha sonra durum değişkenlerinin ekstremum noktalarına kaydırılması için kullanılır [16]. Mevcut Bozucu Sinyali Tabanlı Ekstremum Arama uygulamalarında periyodik (sinüzoidal) bozucu sinyali öncelikle lineer olmama durumunu inceler ve eğim tahmininde bulunur. Şekil 2.3'te gösterilen Bozucu Sinyali Tabanlı ESC özetlenecek olursa; giriş-çıkış haritası verilen bir lineer olmayan sistemde, eğer giriş sinyali olan x 'e küçük genlikli bir sinüs sinyali eklenirse çıkış sinyali olan y , ortalama değerine yakın bir şekilde salınır. Buradaki Saptama Bloğu, çıkış sinyali olan y 'nin demodüle edilmesi için kullanılır [17].

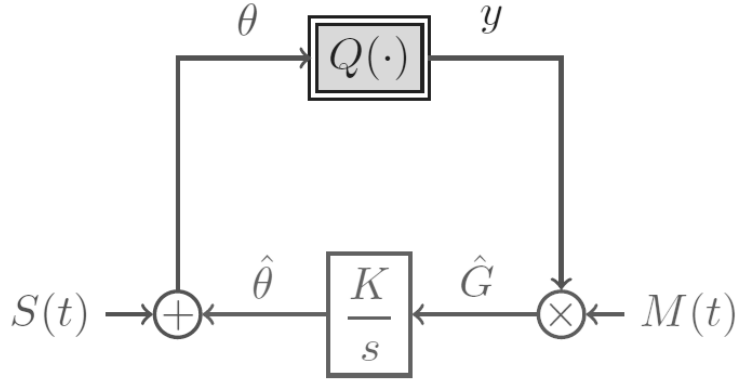


Şekil 2.4 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC Kontrol Şeması [15].

2.3.1.3 Eğim Tabanlı Ekstremum Arama Metodu

Eğim Tabanlı Ekstremum Arama Metodunda, diğer metotların aksine hedef fonksiyonun açık bir şekilde temel yapısının bilinmesi gerekmektedir. Bu metot, hedef fonksiyonunun, sistemin dinamik denklemlerinde sistem durumları ve kesin olmayan parametrelerin bilinen bir dışbükey fonksiyonu olduğunu varsayar.

Geleneksel ekstremum arama metotlarının aksine, amaç fonksiyonu doğrudan ölçülebilir değildir. Parametrik belirsizlik, gerçek zamanlı doğru değerleri bulmayı imkansız kıldığından, parametre tahminleri sadece öngörülen parametreler ile yapılabilmektedir. Eğim tabanlı ekstremum arama metodunun kontrol hedefi, en düşük değerli çalışma noktasını kesin olmayan parametrelere dayanarak sistemi anlık olarak tanımlayıp düzenlemektir [11].



Şekil 2.5 : Eğim Tabanlı ESC Kontrol Şeması [18].

Model, öncelikle çıkış sinyali $y(t) = Q(\theta(t))$ 'nin büyüklüğünü ölçer. Burada $Q(\cdot)$, girişi $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ vektörü olan bilinmeyen değerler haritasıdır. Bu haritanın, $\theta^* = [\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_n^*]^T$ noktasında tekil bir maksimum noktası bulunur. Eğim tahmini;

$$S(t) = [a_1 \sin(\omega_1 t) \dots a_n \sin(\omega_n t)]^T \quad (2.6)$$

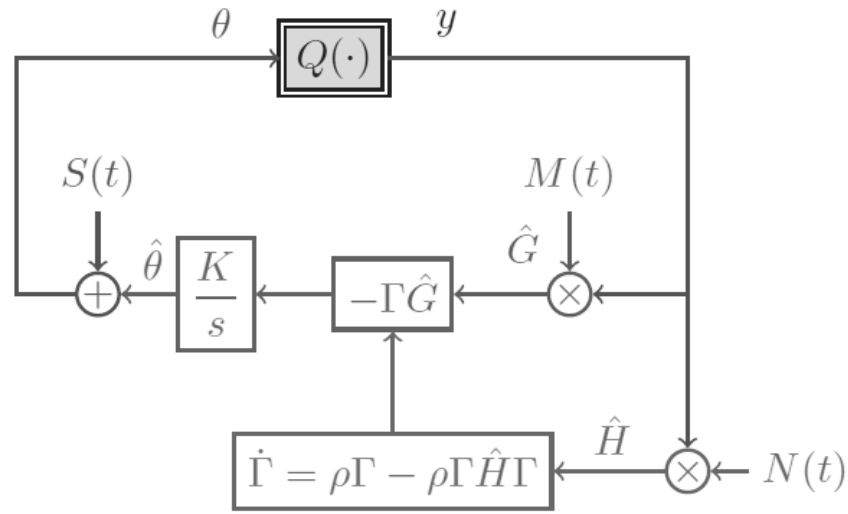
$$M(t) = [\frac{2}{a_1} \sin(\omega_1 t) \dots \frac{2}{a_n} \sin(\omega_n t)]^T \quad (2.7)$$

Sinyalleri tarafından bozucu genlikler sıfırdan farklı olan a_i ile ve köşegeni K olan kazanç matrisi ile desteklenir. Araştırmacı sinyal ω_i için bazı kısıtlamalara uyulması zorunludur. Bilinmeyen giriş haritası $Q(\cdot)$ için ortalaması alınmış sistem optimal giriş vektörünün tahmini olan

$$\dot{\tilde{\theta}} = KH\tilde{\theta} \quad (2.8)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada eğer ki kazanç matrisinin elemanları pozitif seçilirse sonuç kesinlikle yakınsak olacaktır. Ancak yakınsaklık oranı bilinmeyen Hessian

matrisi H 'ye bağılı olacaktır. Eğim tabanlı ekstremum arama metodunun bu zayıflığı, Newton tabanlı Ekstremum Arama metodu ile ortadan kaldırılmaktadır [19].



Şekil 2.6 : Newton Tabanlı ESC Kontrol Şeması [19].

Eğim tabanlı ekstremum arama metoduyla Newton tabanlı ekstremum arama metodu arasındaki temel farklılık, eğim tabanlı ESC’de yakınsama, bilinmeyen değerler haritasının ikinci mertebeden türevi (Hessian matrisi) tarafından belirlenirken Newton tabanlı ESC’de yakınsama, Hessian matrisinden bağımsızdır ve rastgele atanabilir. Newton tabanlı ESC’nin gücü, çok girişli optimizasyon problemlerinde ortaya çıkmaktadır. Hessian matrisinin tanımlama matrisinden çok farklı olması, eğim tabanlı ESC’nin giriş vektörünün farklı elemanlarının ciddi derecede değişik hızlarla yakınsamasına yol açmaktadır. Bunu düzeltmek için Hessian matrisinin tersi alınarak sistemin yeniden geliştirilmesi gerekmektedir ancak Hessian matrisi bilinmediği için bu mümkün olmamaktadır. Diğer bir taraftan Newton tabanlı ESC’de eğer Hessian matrisi için bir yakınsama öngörücüsü kullanıldıysa giriş vektörünün bütün elemanlarının yakınsama değerlerine aynı oranda ulaşılabilir. Şekil 2.6’da gösterilen Newton tabanlı ekstremum arama metodunda iki önemli kısım bulunur. Bunların ilki Hessian matrisine tahmin oluşturan bozucu matrisi $N(t)$, diğeri ise Hessian matrisinin tersinin tahminini oluşturan ve $\dot{\Gamma} = \rho\Gamma - \rho\Gamma\hat{H}\Gamma$ ile ifade edilen Riccati eşitliğidir. Bu metotta yakınsama oranı, K ve ρ terimlerinin uygun seçilmesi ile tasarımcı tarafından belirlenebilmektedir [20, 21].

2.3.2 Sayısal Optimizasyon Tabanlı Ekstremum Arama Metodu

Ekstremum Arama Metodunda kullanılan farklı fikirler, sadece performans çıkışının ölçümü ya da bunun eğimini bulmanın gerekli olduğu sayısal tabanlı optimizasyon yönteminden transfer edilmiştir. Ekstremum Arama Metodunun geleneksel uygulamalarında optimal parametrelerin nispeten daha yavaş çeşitlendiği farz edilir ve sistem dinamikleri tipik olarak ihmal edilerek ESC algoritması geleneksel statik optimizasyon teknikleriyle incelenip tasarlanır. Statik sistemlerin Ekstremum Arama metodu, temel olarak “Analog Optimizasyon” olarak isimlendirilebilecek bazı optimizasyon yöntemlerinin sürekli (analog) yaklaşımlar yapılabilen bir sayısal optimizasyon problemidir. Yukarıdaki başlıklarda bahsedilen Ekstremum Arama Metodu yöntemleri, daha önceden de bahsedildiği gibi Analog Ekstremum Arama Yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu bölümde ise Sayısal Optimizasyon Tabanlı Ekstremum Arama Metodu anlatılacaktır.

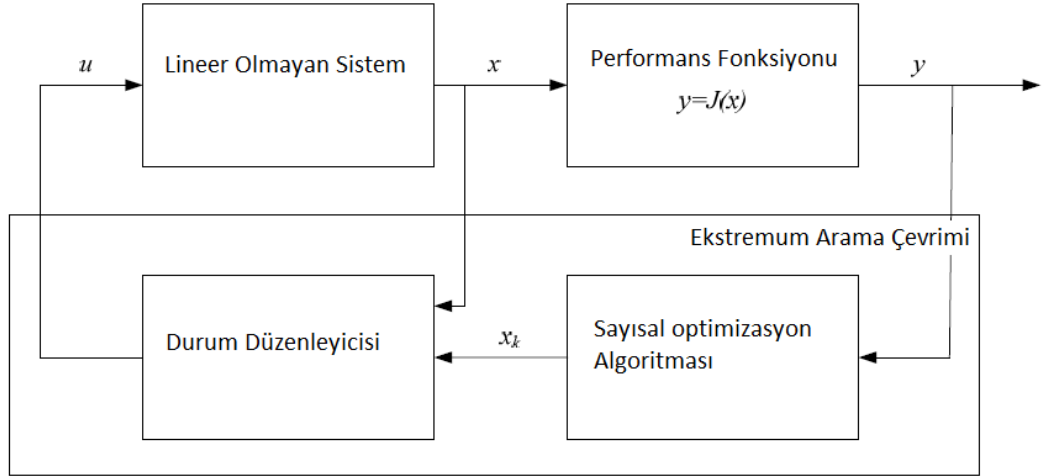
Sayısal optimizasyon tabanlı ekstremum arama metodu yapısı, çeşitli yinelemeli (iterative) yöntemler kullanır. Sayısal optimizasyon algoritması, “sonraki durumu” seçer ve durum düzenleyicisi sistemi bu yeni durumu takip etmeye zorlar. Şekil 2.7 ile sayısal Optimizasyon Tabanlı Ekstremum Arama Metodunun temel kontrol şeması verilmiştir. Bu şemada da yer alan temel prensibe göre performans fonksiyonundaki x 'in ayarlanması, dolaylı olarak u girişi tarafından yapılmaktadır. Böylece ekstremum arama kontrol problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [22]:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.9)$$

fonksiyonuna bağlı olarak

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} J(x) \quad (2.10)$$

Böylece x durumu sadece bir dinamik sistem çözümü olması durumunda mümkün olacaktır. Ekstremum arama kontrolünün hedefi; çıkış ve durum ölçümlerine dayanan bilinmeyen performans fonksiyonunun bilinmeyen minimumuna ulaştıran bir durum düzenleyicisi tasarlamaktır.



Şekil 2.7 : Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC Kontrol Şeması [22].

Sayısal Optimizasyon Tabanlı Ekstremum Arama Metodunun genel çerçevesi aşağıda verilmiştir.

Adım 0: $t_0 = 0$ 'da $x_0 = x(t_0)$ ve $k = 0$ olarak ayarlanır.

Adım 1: Güncel durum $x_k = x(t_k)$ ve performans fonksiyonu ölçümleri olan $J(x(t_k))$, $\nabla J(x(t_k))$ veya $\nabla^2 J(x(t_k))$ işlemlerinin sonuçlarına dayanan x_{k+1} üreten optimizasyon algoritması kullanılır.

$$x_{k+1} = \text{ENİYİLEŞTİRİCİ}(x(t_k)) \quad (2.11)$$

Adım 2: $t_{k+1} = t_k + \delta_k$ olacak şekilde, sonlu δ_k zamanı içinde $x(t_k)$ durumunu x_{k+1} 'e düzenleyen bir u durum düzenleyicisi tasarlanır.

Adım 3: $k \leftarrow k + 1$ olarak ayarla ve Adım1'e geri dön [11,21,22].

3. EKSTREMUM ARAMA METODU KULLANIM ÖRNEKLERİ ve YÖNTEMLERİN BAŞARIMININ İNCELENMESİ

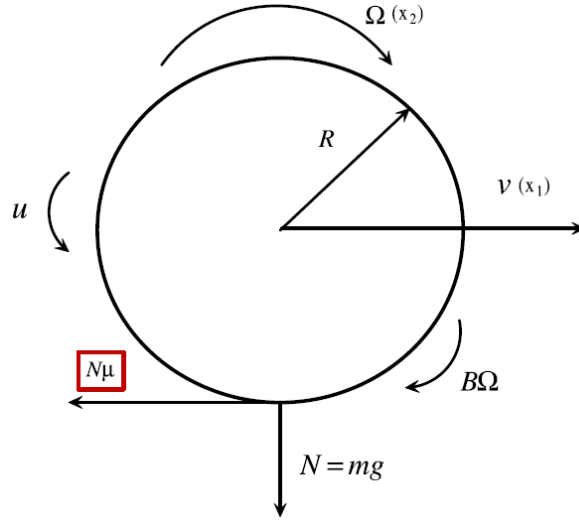
Literatürde yer alan farklı ekstremum arama metodu yaklaşımlarının daha iyi kavranabilmesi için yine literatürdeki en yaygın olarak incelenen ve metodun karakteristiğini en iyi tanımlayan gerçekleşmiş sistem örnekleri üzerinde durulacaktır.

3.1 ABS Fren Sisteminde Ekstremum Arama Metodu

Günümüz otomobillerinin vazgeçilemez bir unsuru olan ABS fren sistemi, frene basıldığında devreye girerek tekerleklerin kilitlenmesini önleyerek hem daha çabuk bir duruş sağlar hem de tekerleklerin kilitlenmesi sonucu oluşabilecek kontrol kaybını önler. Prensip olarak temelde ABS'nin çalışma mantığı, tekerleklerin açısal hızı ve muhtemel hızlanmasının ölçülmesiyle tekerleğin kayma durumunun anlaşılması halinde karar vermesi şeklindedir. Eğer kayma durumu gerçekleşiyorsa fren basıncı, tekerlek hızı belirli bir eşik değerini geçene kadar azaltılır. Sonra fren basıncının yeniden artırılmasına izin verilir ve böylelikle tekerleklerin kilitlenmesi engellenmiş olur. Tekerleklerle etki eden sürtünme kuvveti karakteristiği yol şartlarına göre değişkenlik göstermektedir. Kaygan olmayan bir yolda sürtünme kuvveti maksimum iken yolun kayganlığı arttıkça sürtünme kuvveti azalır. Standart ABS sistemlerinde kesintili bir frenleme rejimi uygulanırken bazı ABS sistemlerinde kesintili çalışmanın amacı sürtünme kuvvetinin en yüksek olduğu noktayı aramaktır. Sistemin modellenmesi için Şekil 3.1'de gösterilen tek tekerlek modeli kullanılmıştır ve sistemin dinamik denklemleri aşağıda belirtilmiştir [9]:

$$m\ddot{x}_1 = -N\mu(\lambda) \quad (3.1)$$

$$m\ddot{x}_1 = -N\mu(\lambda) \quad (3.2)$$



Şekil 3.1 : Araç Tekerleğine Etki Eden Kuvvetler [9].

Denklem 3.1 ile 3.2’de ve Şekil 3.1’de yer alan;

$v(x_1)$: tekerleğin doğrusal hızı

$\Omega(x_2)$: tekerleğin açısal hızı

m : tekerleğin kütlesi.

$N = mg$: tekerleğin ağırlığı

R : tekerleğin yarıçapı

I : tekerleğin atalet moment

Bx_2 : frenleme sürtünme moment

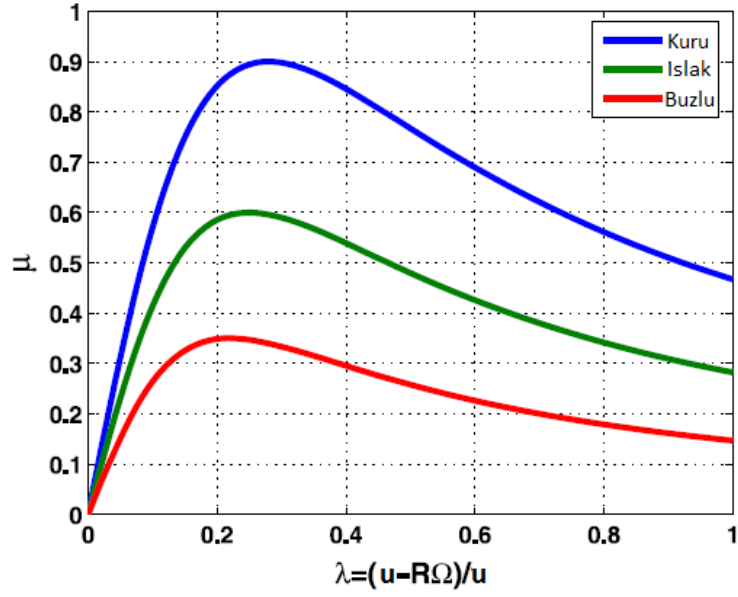
u frenleme momenti

$\mu(\lambda)$: sürtünme kuvveti katsayısı

$\lambda = \frac{x_1 - Rx_2}{x_1}$ olarak $Rx_2 \leq x_1$ olduğunda tanımlanmış tekerlek kayması.

olarak açıklanabilir.

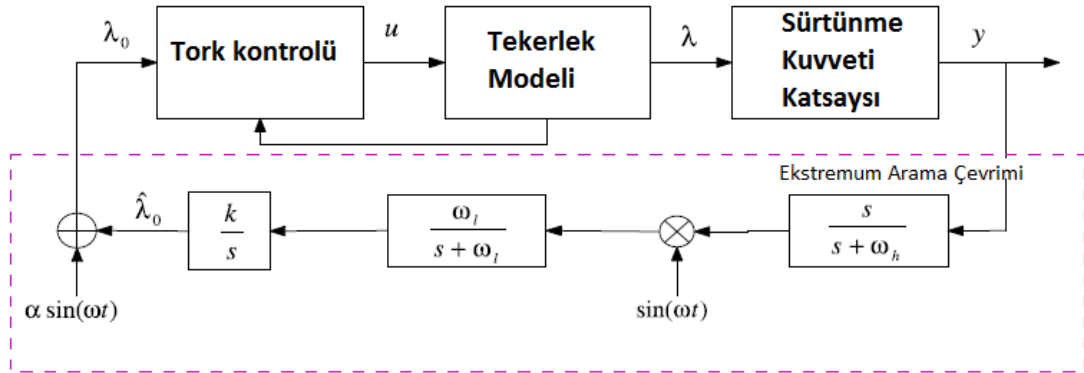
Şekil 3.2 ile de anlaşılabileceği gibi yol koşullarına göre değişmesine rağmen $\mu(\lambda)$ fonksiyonu ile belirtilen sürtünme katsayısını μ^* en yüksek değerine taşıyan λ^* değeri mevcuttur. ABS tasarımının asıl amacı, sürtünme kuvveti $\mu(\lambda)$ ’nin yol şartlarından bağımsız olarak en yüksek değerini yakalayacak bir “ u ” girişi üretmektir. Kurulacak kontrol algoritmasında $\mu(\lambda)$ fonksiyonunu bilmek mümkün olmamaktadır. Ancak, doğrusal hızlanma $\dot{x}_1$ ’in ivmeölçerlerle ölçüldüğü ve $\mu(\lambda)$ ölçüm sonuçlarının elde edildiği varsayılmıştır.



Şekil 3.2 : Sürtünme Kuvveti Katsayısı [9].

3.1.1 Bozucu Sinyali Tabanlı Ekstremum Arama Metodu ile ABS

Problemi Bozucu Sinyali Tabanlı Ekstremum Arama Metoduna göre ayarlayabilmek için bilinmeyen bir sabit olarak λ_0 verilir ve $\tilde{\lambda} = \lambda - \lambda_0$ tanımı yapılır [9].



Şekil 3.3 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile ABS Kontrolünün Şeması [9].

otomobillerinin $\tilde{\lambda}$ için korunum denklemi (3.3) ile ifade edilmiştir.

$$\dot{\tilde{\lambda}} = \tilde{\lambda} = \left(\frac{R x_2}{x_1^2} + \frac{m R^2}{I x_1} \right) x_1 + \frac{R B}{I x_1} x_2 + \frac{R}{I x_1} u \quad (3.3)$$

$\dot{x}_1$, ivmeölçerler tarafından ölçülebildiğinden dolayı basit geri besleme kontrol kuralı kolaylıkla görülebilir.

$$u = -\frac{cI_{x_1}}{R}(\lambda - \lambda_0) - Bx_2 - \frac{Ix_2}{x_1}\dot{x}_1 - mR\dot{x}_1 \quad (3.4)$$

(3.4) numaralı denklemde c ile ifade edilen pozitif sabit, (3.5) eşitliğinde belirtilen şekilde λ_0 değerini üstel kararlı hale getirir.

$$\dot{\tilde{\lambda}} = -c\tilde{\lambda} \quad (3.5)$$

Yeniden ifade etmek gerekirse, (3.3) eşitliğindeki u kontrolü, $\dot{x}_1$ 'in ölçülebildiği varsayımıyla bilinmeyen $\mu(\lambda)$ fonksiyonuna gerek duymaz. (3.4) eşitliğinde yer alan geri besleme kontrolü altındaki tekerlek modeli, giriş dinamikleri ve statik haritanın ardışık denklemleri olarak yazılabilir.

$$\frac{1}{c}\dot{\tilde{\lambda}} = -(\lambda - \lambda_0) \quad (3.6)$$

$$y = \mu(\lambda) \quad (3.7)$$

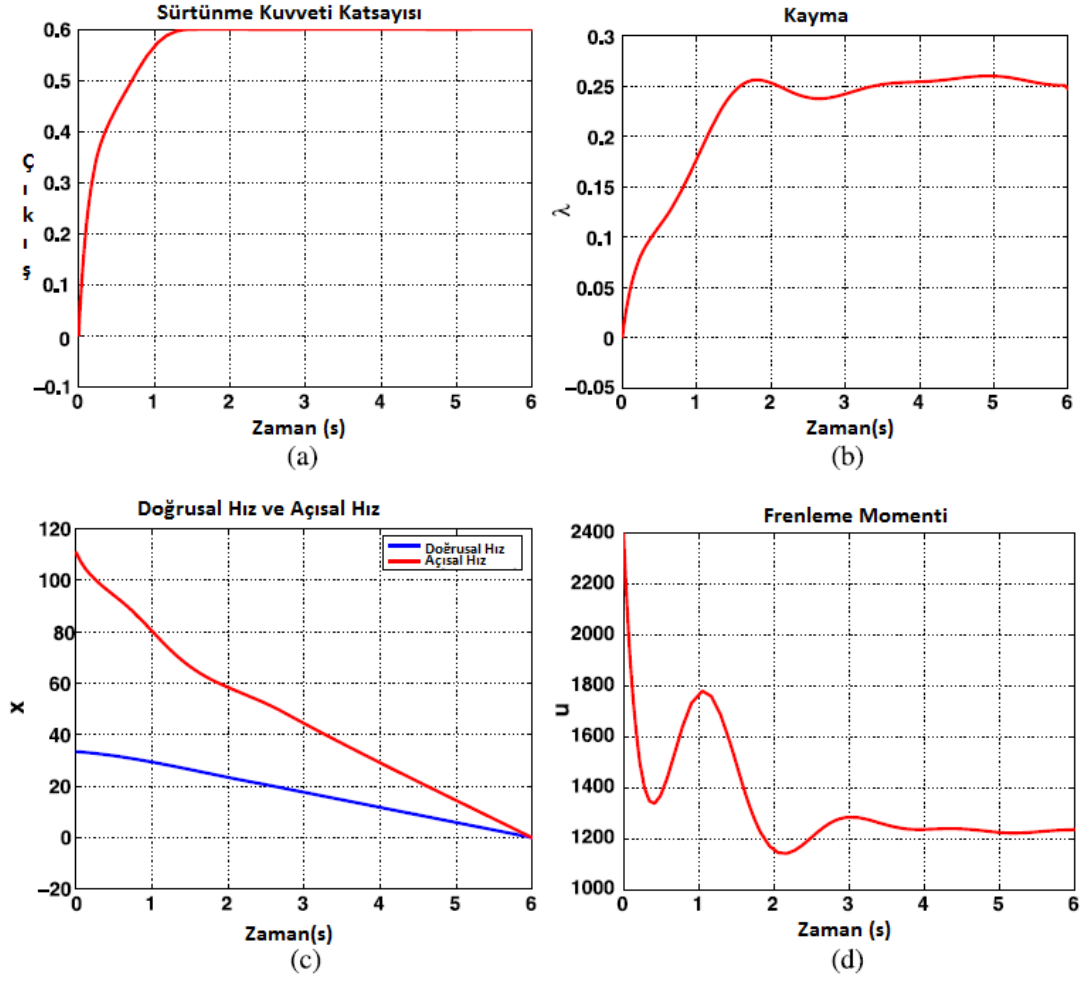
Şekil 3.3 ile verilen Bozucu Sinyali Tabanlı ESC kontrolünün uygulanabilmesi için bozucu sinyali sisteme (3.8)'deki gibi verilmiştir.

$$\lambda_0 = \hat{\lambda}_0 + \alpha \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

[8] ve [9]'de yer alan simülasyon için sürtünme kuvveti fonksiyonu $\mu(\lambda)$, (3.9) numaralı denklemdeki şekilde kullanılmıştır.

$$\mu(\lambda) = 2\mu^* \frac{(\lambda^*)\lambda}{(\lambda^*)^2 + \lambda^2} \quad (3.9)$$

Bu fonksiyon, $\lambda = \lambda^*$ noktasında, $\mu(\lambda^*) = \mu^*$ değerinde bir maksimuma sahiptir. [8] ve [9]'de yer alan simülasyon $\lambda^* = 0.25$ ve $\mu^* = 0,6$ noktalarında yapılmıştır. Tekerlek parametreleri $m=400\text{kg}$, $B=0.01$ ve $R=0.3\text{m}$ olarak alınmıştır. Başlangıç şartları olarak ise, doğrusal hız $x_1=33.33\text{m/s}$, açısal hız $\lambda(0)=0$ eşitliğini sağlayan $x_2(0)=400/3.6$ seçilmiştir. Şekil 2.10'da yer alan sisteme uygulanan Bozucu Sinyali Tabanlı ESC, $\alpha=0.01$, $\omega=3$, $\omega_h=0.6$, $\omega_l=0.8$, $c=20$, ve $k=1.5$ parametre kabulleriyle uygulanmıştır. $\lambda_0=0.1$ için simülasyon sonuçları Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile ABS Kontrolünün Simülasyon Sonuçları: (A) Sürtünme Kuvveti Katsayısı; (B) Kayma; (C) Doğrusal Hız ve Açısal Hız; (D) Frenleme Momenti [9].

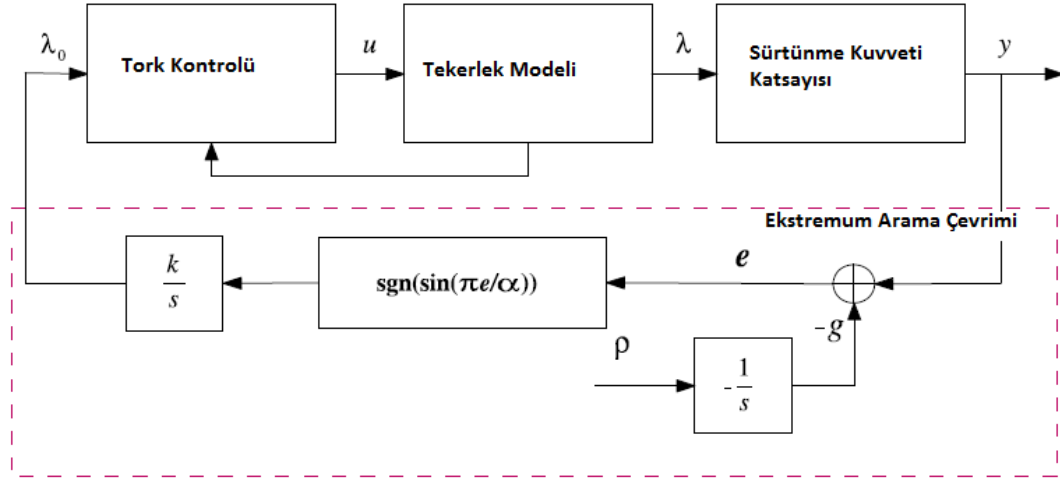
Simülasyon sonuçlarından da görülebileceği gibi frenleme esnasında en yüksek sürtünme katsayısına ulaşılmış ve araç en kısa süre ve mesafede durdurulmuştur [8,9].

3.1.2 Kaydırma Modu Tabanlı Ekstremum Arama Metodu ile ABS

Kaydırma Modu Tabanlı ESC, Bölüm 3.1.1’de aktarılan Bozucu Sinyali Tabanlı ESC modelinde küçük bir değişiklik yapılarak ABS sistemi için kullanılabilir. ABS sisteminde Şekil 3.5 ile belirtilen kontrol şemasındaki gibi Kaydırma Modu Tabanlı Ekstremum Arama Metodunu kullanabilmek için (3.10) denklemi tanımlanır [9].

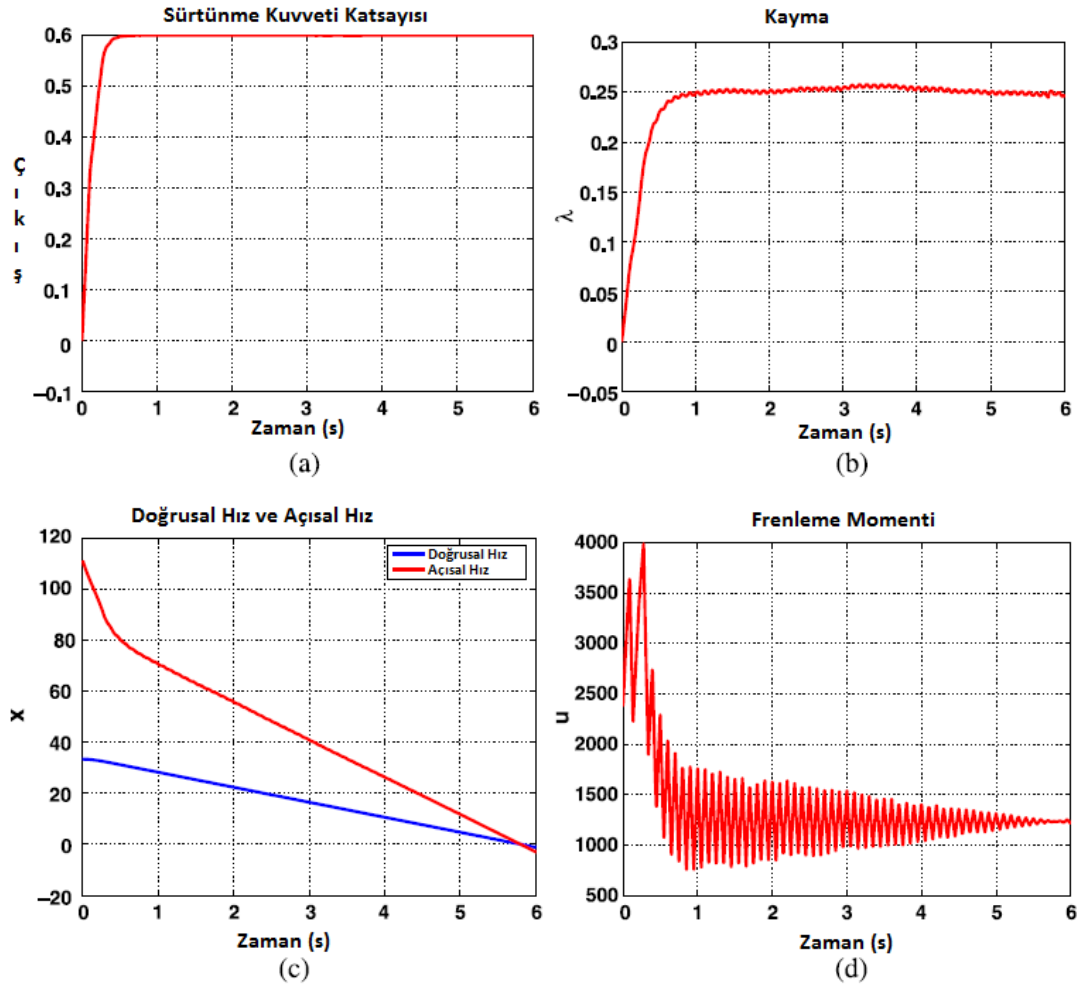
$$\dot{\lambda}_0 = k \text{sign} \sin(\pi s / \alpha) \quad (3.10)$$

Burada α pozitif sabit, s ise $e(t) = y - g(t)$ şeklinde tanımlanan anahtarlama fonksiyonudur. $g(t)$ fonksiyonu ise $\dot{g}(t) = \rho > 0$ şartını sağlayan bir artan fonksiyondur.



Şekil 3.5 : Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile ABS Kontrol Sisteminin Blok Şeması [9].

Kaydırma Modu Tabanlı ESC için [9]'de yapılan simülasyonda $\mu(\lambda)$ fonksiyonu (3.9) numaralı denklemdeki gibi kabul edilmiştir. Parametreleri ise $\alpha = 0.1$, $\rho = 1$, $c = 20$ ve $k = 1.5$ değerlerini almıştır. Bölüm 3.1.1'dekiyle aynı tekerlek modeli ve başlangıç koşulları için yapılan simülasyon sonuçları Şekil 3.6'de verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi frenleme esnasında en yüksek sürtünme kuvvetine ulaşılmış ve araç en kısa zaman ve mesafede durdurulmuştur. Bu yöntemde dikkat çeken unsur ise, Şekil 3.6 (d)'de ortaya çıkmaktadır. Frenleme momenti grafiği ile belirtilen simülasyon sonucunda görüldüğü üzere frenleme esnasında ciddi ölçüde salınım yapan bir frenleme momenti oluşmaktadır. Bu salınımın Kaydırma Tabanlı ESC'nin bir ABS sisteminde gerçekte kullanılması halinde sürüş konforunu olumsuz etkileyeceği açıkça görülmektedir [9, 23].



Şekil 3.6 : Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile ABS Kontrol Sisteminin Simülasyon Sonuçları: (A) Sürtünme Kuvveti Katsayısı; (B) Kayma; (C) Doğrusal Hız ve Açısız Hız; (D) Frenleme Momenti [9].

3.1.3 Sayısal Optimizasyon Tabanlı Ekstremum Arama Metodu ile ABS

(3.1) numaralı denklem incelenince x_1 'in sabitlenmiş bir $\mu(\lambda)$ için u ile kontrol edilemeyeceği ortaya çıkmış oldu. Neyse ki sürtünme kuvveti katsayısı μ , sadece λ 'ya bağlıdır ve λ , x_1 ve x_2 'nin fonksiyonu şeklinde ifade edilebilir. Böylelikle μ , u tarafından kontrol edilebilir. Elde edilecek lineer sistemin girişi u ve çıkışı λ olmak üzere doğrusallaştırılacaktır. Değişkenlerin dönüşümü (3.11) ve (3.12) denklemleriyle verilmiştir [9].

$$\eta = x_1 \quad (3.11)$$

$$\lambda = (x_1 - Rx_2)/x_1 \quad (3.12)$$

Bu dönüşümlerle (3.1) ve (3.2) numaralı denklemler, (3.13) ve (3.14) numaralı denklemlere dönüştürülür.

$$\dot{\eta} = -N\mu(\lambda)/m \quad (3.13)$$

$$\dot{\lambda} = -\left(\frac{R}{Ix_1} + \frac{x_2}{mx_1^2}\right)NR\mu(\lambda) + \frac{R}{Ix_1}(u + Bx_2) \quad (3.14)$$

η , doğrusal hızı ifade ettiği için her zaman fiziksel zorunluluklar sayesinde belirli sınırları içinde kalacaktır. Verilen $x_1(0) > 0$ 'da frenleme momenti (3.15) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilir.

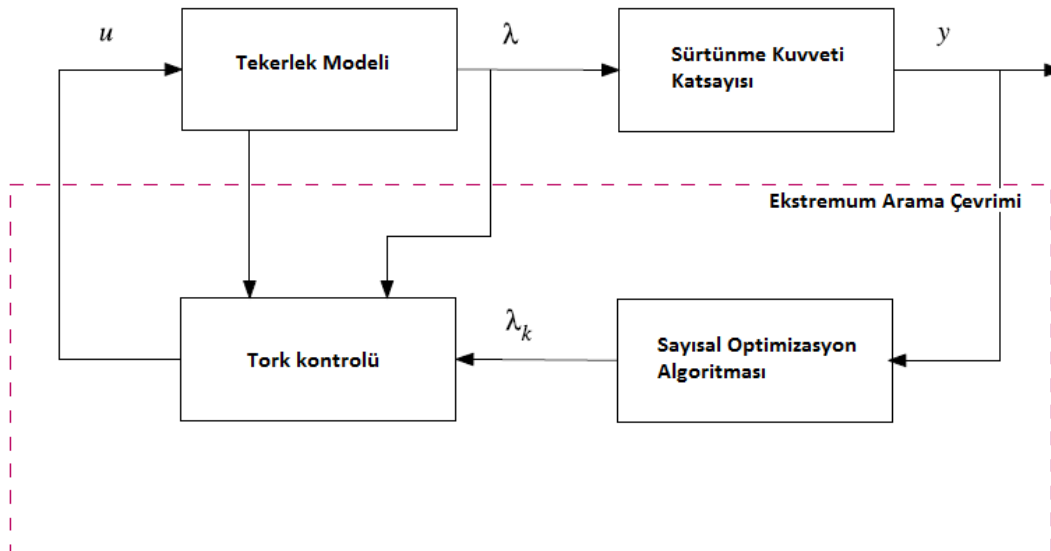
$$u = \frac{Ix_1}{R}(-c\lambda + v) - Bx_2 + \left(\frac{R}{Ix_1} + \frac{x_2}{mx_1^2}\right)IN\mu(\lambda)x_1 \quad (3.15)$$

$\mu(\lambda)$ yerine ölçülebildiğini varsaydığımız $\dot{x}_1$ kullanılınca (3.1) numaralı denklem (3.16) numaralı denklem haline dönüştürülebilir.

$$u = \frac{Ix_1}{R}(-c\lambda + v) - Bx_2 + \left(\frac{R}{Ix_1} + \frac{x_2}{mx_1^2}\right)Im\dot{x}_1x_1 \quad (3.16)$$

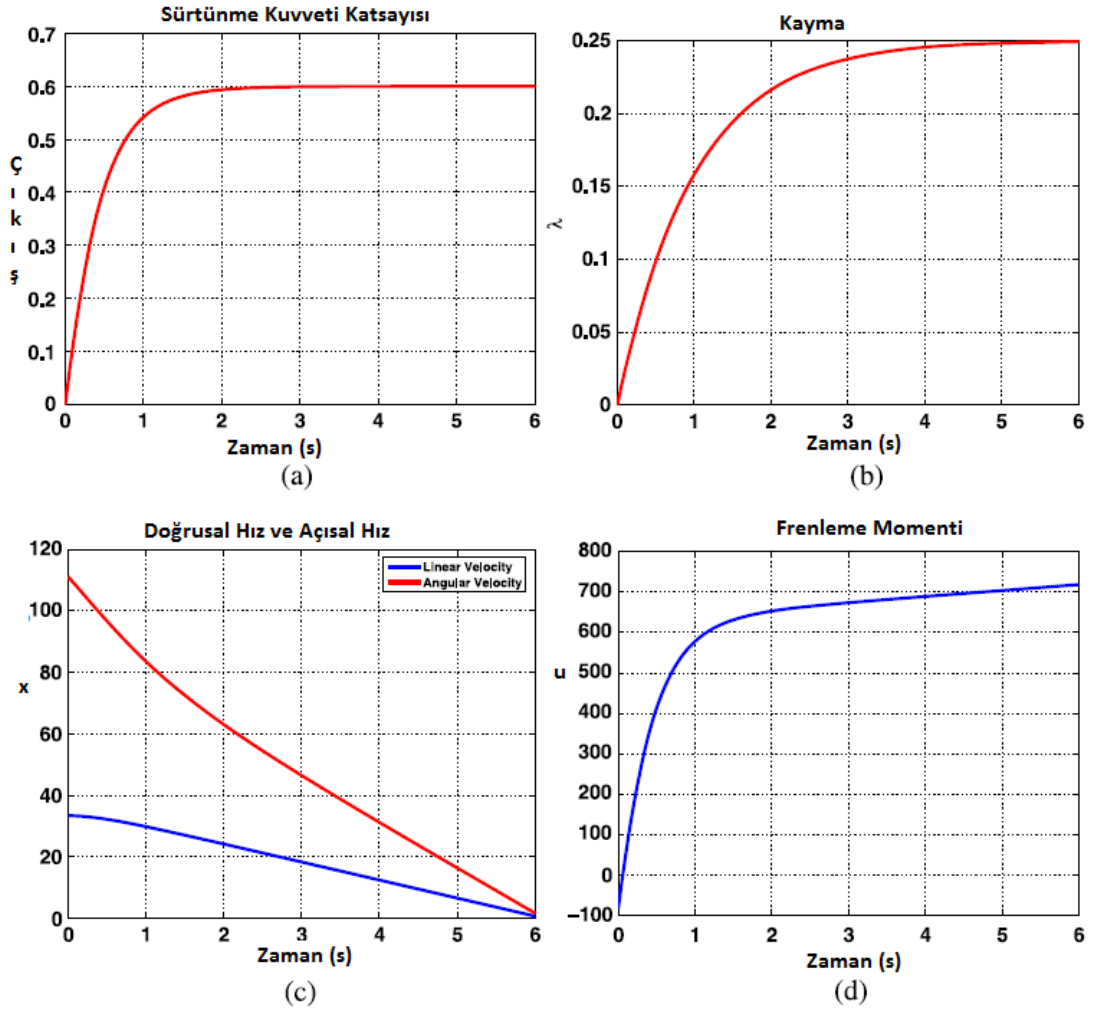
Sonrasında (3.14), (3.17) denklemine dönüştürülür.

$$\dot{\lambda} = -c\lambda + v \quad (3.17)$$



Şekil 3.7 : Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC ile ABS Kontrol Sisteminin Blok Şeması [9].

Şekil 3.7 ile kontrolör şeması verilen Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC simülasyonu yapılırken yine Bölüm 3.1.1’de verilen aynı tekerlek modeli ve başlangıç şartları kabul edilecektir. [9]’da verilen simülasyonda sayısal optimizasyon metodu olarak asimptotik durum düzenleyicisi kullanılmıştır. Doğrusallaştırılmış sistem için herhangi bir λ_k değeri denge noktası olarak yorumlanabilir. Asimptotik kontrolör olarak $v = c\lambda_k$ seçilebilir. Burada λ_k , sayısal optimizasyon algoritmasından yönlendirilmiş düzenleme noktasıdır.



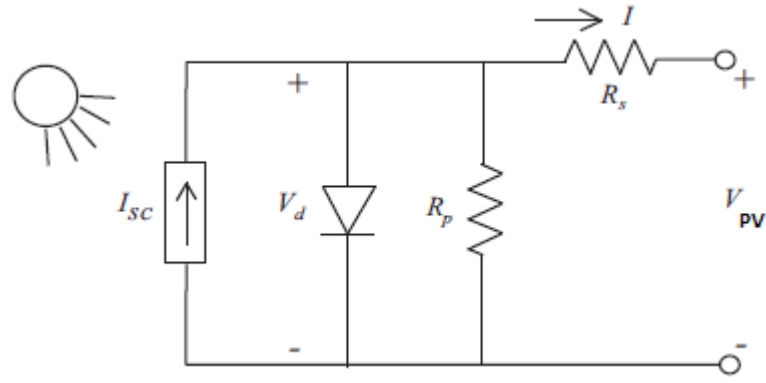
Şekil 3.8 : Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC ile ABS Kontrolörünün Simülasyon Sonuçları: (A) Sürtünme Kuvveti Katsayısı; (B) Kayma; (C) Doğrusal Hız ve Açısal Hız; (D) Frenleme Momenti [9].

Ekstremum Arama Metodunun ABS fren sistemi üzerinde farklı yöntemlerinin incelenmesi, bu yöntemler arasında karşılaştırma yapabilme olanağı sağlamıştır. İlginç bir şekilde Bozucu Sinyali Tabanlı ESC yönteminde $\lambda_0 = \lambda_k$ alındığında Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC ile özdeş olmaktadır. Bunun sebebi, Bozucu Sinyali Tabanlı ESC’nin ABS kontrolünde geri besleme doğrusallaştırıcısı olmasıdır.

Bu durum, Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC ile ABS kontrolünde de aynıdır. Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ve Kaydırma Modu Tabanlı ESC yöntemlerinde eğime ihtiyaç yoktur ancak bozucu sinyali ve kaydırma modu etkilerinden dolayı kararlı halde ek salınımlara yol açmaktadırlar. Sayısal Optimizasyon Tabanlı ESC’de ise önemli ölçüde düşük frenleme momenti ihtiyacıyla diğer ESC yöntemleriyle karşılaştırılabilecek frenleme süreleri elde edilmiştir. Herhangi bir bozucu sinyali ya da kaydırma modu fonksiyonu kullanılmadığı için salınımlar başarıyla önlenebilmiştir [9, 14].

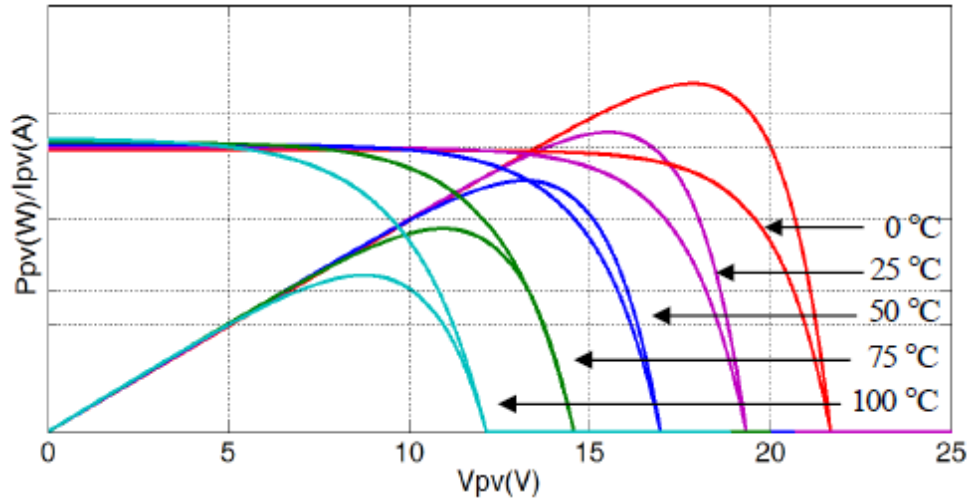
3.2 Ekstremum Arama Metodu ile Güneş Enerji Sistemleri için Maksimum Güç Noktası Takibi

Küresel enerji ihtiyacının giderek daha çevreci ve ekonomik yöntemlerle karşılanması, son dönemlerde yaşanan enerji krizleri ve enerji üretimi kaynaklı çevresel etkiler yüzünden acilen çözülmesi gereken sorunlardan birisi haline dönüşmüştür. Bu doğrultuda eğilim, enerji üretiminin daha çok alternatif enerji kaynaklarıyla sağlanması yönündedir. Bu da, güneş enerji sistemlerinin daha geniş kullanım alanlarına ulaşmasına yol açmaktadır [24]. Alternatif enerji sistemlerinin zorlu ortam koşullarında çalışması gerekliliği, ortam şartlarının olumsuz etkilerinden kaynaklı problemlere sebep olmaktadır. Örneğin güneş enerji sistemlerinin çıkışından alınan güç, sıcaklık ve parlama gibi etkenlerden dolayı düşebilmektedir [18]. Bu güç kaybı, güneş paneli çıkışındaki karakteristik güç-gerilim ve akım-gerilim eğrilerinden izlenebilmektedir. Güneş panellerinin (PV) verebileceği en yüksek güç çıkışına ulaşamaması, bir verimsizlik problemi oluşturmaktadır. Bu problemin çözümü için literatürde “En Yüksek Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking) (MPPT)” yaklaşımları geliştirilmiştir. MPPT için çok sayıda farklı yöntem bulunmaktadır [25]. Buradaki örnekte önceki bölümlerde açıklamaları yapılan ESC metotlarından Eğim Tabanlı ESC ve Kayma Modu Tabanlı ESC teknikleri kullanılarak literatürde incelemesi yapılan MPPT sistemlerine yer verilecek ve ESC yöntemleri arasındaki farklılıklar gösterilecektir. Şekil 3.9’da eşdeğer devresi verilen PV panelinin doğrusal olmayan Akım (IPV) – Gerilim (VPV) ve Güç (PPV) karakteristiğini gösteren grafik Şekil 3.10’da yer almaktadır.



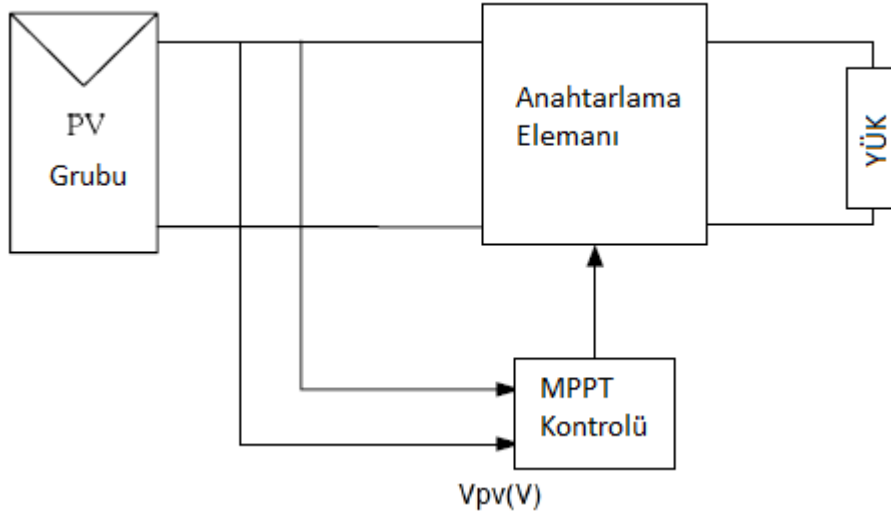
Şekil 3.9 : PV Eşdeğer Devresi [25].

Güneş enerji sistemlerinde verimli güç çıkışı elde etmek için kullanılacak MPPT algoritması için gerekli eğriler Şekil 3.10'daki gibidir. MPPT algoritmasının yer alacağı kontrol sisteminin temel kontrol şeması Şekil 3.11 ile verilmiştir. MPPT amacına ulaşmak için literatürde anahtarlama modlu güç dönüştürücüsü veya kısaca anahtarlama elemanı olarak adlandırılan bir yapı kullanılmaktadır.



Şekil 3.10 : PV Güç-Akım ve Gerilim Karakteristiği [25].

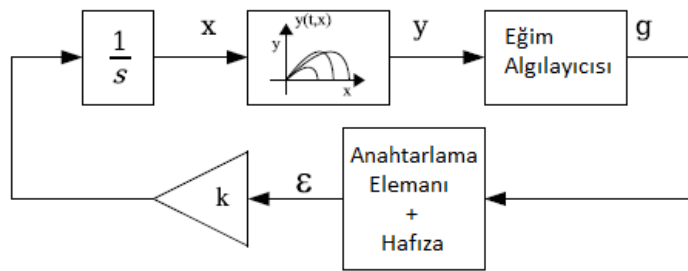
[25]'de yer alan simülasyona dayalı sistem incelemelerinde, $P_{max}= 65W$, $VMPP=17.4V$, $IMPP=3.75A$ $VDC=21.7V$ $ISC=3.99A$ olan bir PV modeli temel alınarak simülasyon uygulanmıştır. Simülasyonda, ilk olarak PV'nin $25^{\circ}C$ 'de $1kW/m^2$ değerindeki düzenli aydınlık altındaki cevabı, ikinci olarak $t=2s$ 'de aydınlık seviyesinin $25^{\circ}C$ 'de $0.6 kW/m^2$ olması durumundaki cevabı farklı ESC teknikleriyle denenmiştir.



Şekil 3.11 : PV MPPT Temel Kontrol Şeması [25].

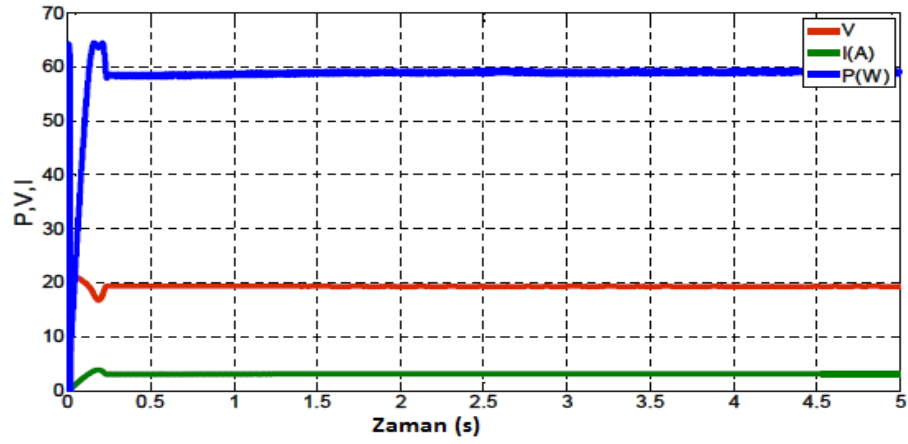
3.2.1 Eğim Tabanlı ESC Tekniği ile MPPT

Eğim tabanlı ESC tekniği, maksimum noktasını bulmak için kullanılacak en kolay ESC tekniğini göstermektedir. Bir eğim algılayıcısı tarafından akım denge noktası tanımlanır, ardından sonraki anda hangi değişikliğin yapılacağı belirlenir ve hafızada saklanan akım sinyali, sonraki andaki anahtarlama elemanı ile değiştirilebilmesi için değerlendirilir. Akım sinyalinin kazanç değeri K ile çarpılması sonucu bir dahili sinyal oluşur ve Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation) (PWM) dizisi oluşturmak adına üçgen dalga formunda bir yapı ile karşılaştırılır [25].

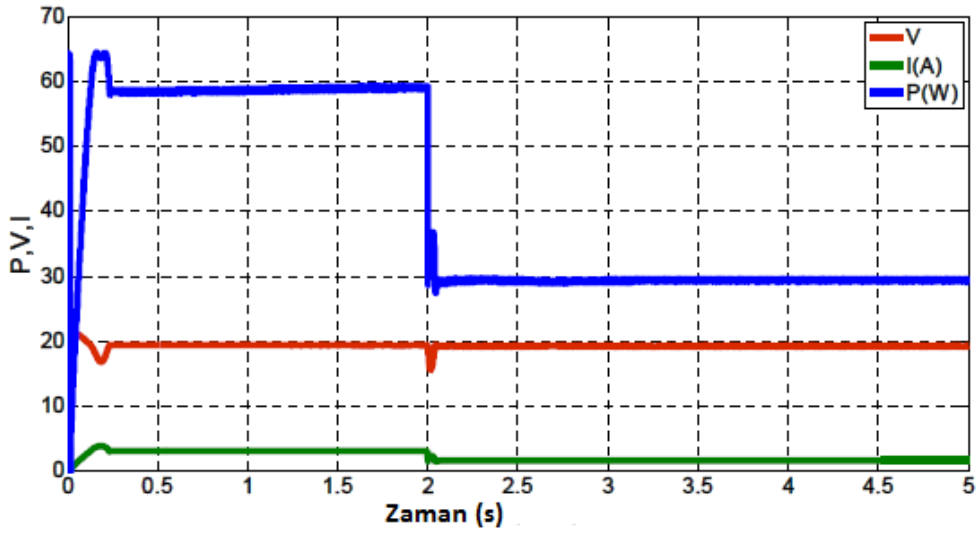


Şekil 3.12 : Eğim Tabanlı ESC ile MPPT Temel Kontrol Şeması [25].

Simülasyondaki senaryo uygulandığında elde edilen sistem tepkileri, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.13 : Eğim Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan Değerindeki PV Sisteminin 25°C’de 1 kW/m² Düzenli Aydınlık Altındaki Zaman Cevabı [25].

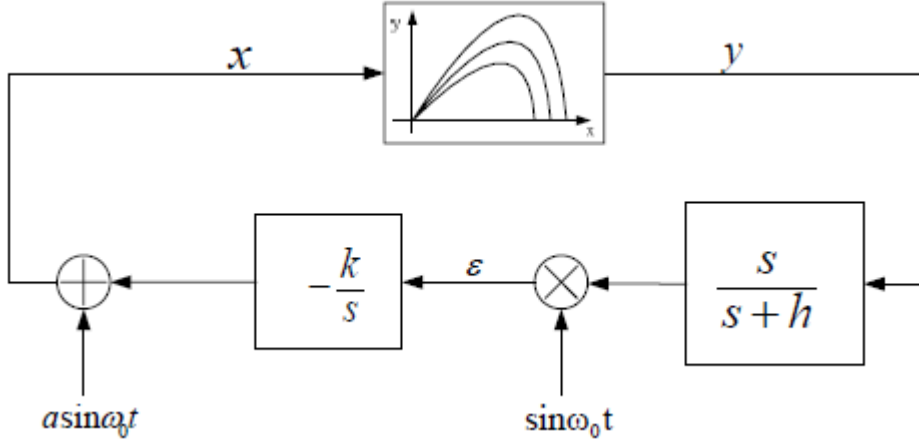


Şekil 3.14 : Eğim Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan PV Sisteminin Aydınlik Seviyesinin T=2s’de 25°C’de 0.6 kW/m² Değerine Düştüğünde Zaman Cevabı [25].

Grafiklerden de anlaşılacağı gibi, Eğim Tabanlı ESC ile MPPT işlevi, düzenli aydınlık altında gerçekleşebilmektedir ancak ani aydınlık değişimlerinde güç, akım ve gerilim seviyelerinde dalgalanma gerçekleşmektedir.

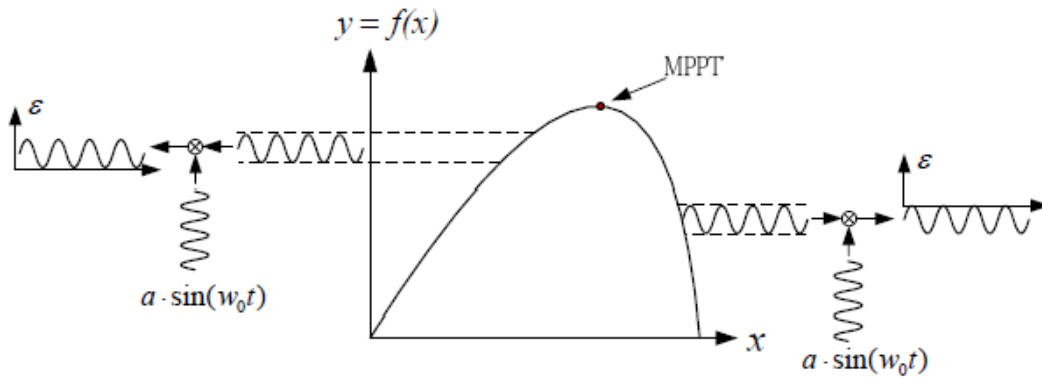
3.2.2 Bozucu Sinyali Tabanlı ESC Tekniği ile MPPT

Bölüm 2.3.1.2’de anlatılan Bozucu Sinyali Tabanlı ESC tekniği, [24] ve [25]’de MPPT için Şekil 3.15’de yer alan kontrol şeması ile uygulanmıştır.



Şekil 3.15 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile MPPT Temel Kontrol Şeması [25].

Kararlı ESC sistemi içerisinde tanımlı küçük miktardaki bozucu sinyali, bütün sistem dinamiğini etkilemektedir. Bu sebeple en yüksek güç noktasını takip etmesi istenen PV sistemine harici sinüzoidal sinyali uygulanır. $y = f(x)$ dışbükey hedef fonksiyonun bir ekstremum noktası bulunduğu varsayılarak MPPT işlevi integral, filtre, toplayıcı, çarpıcı ve sinüs üretici ile gerçekleştirilir

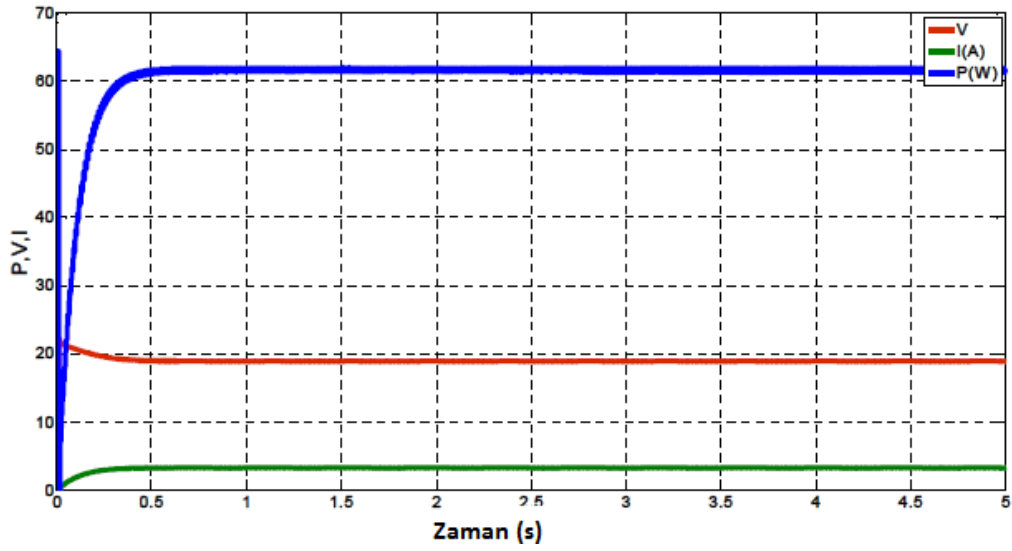


Şekil 3.16 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile MPPT Gösterimi [25].

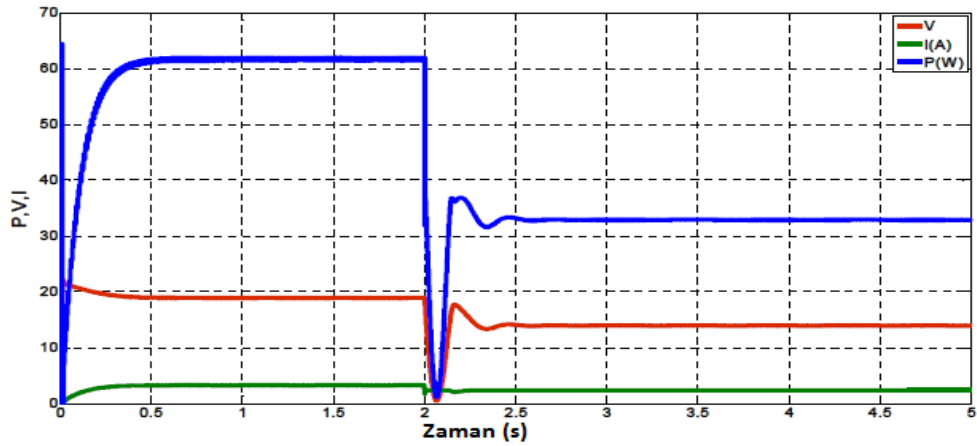
Şekil 3.16’da gösterildiği üzere, küçük sinüzoidal sinyaller, MPPT eğrisi civarında uygulanır. Bozucu sinyalinin frekansı, daha önceden bahsedilen kontrol sistemindeki testere dişi dalganın frekansından daha küçük olmalıdır. ϵ işaretinin pozitif ya da negatif olması, çalışma noktasının MPPT’nin neresinde olduğunu belirler. $y = f(x)$ hedef fonksiyonuna a genliğinde ve ω_0 frekansında küçük bir $a \cdot \sin(\omega_0 t)$ bozucu sinyali uygulandığında hedef fonksiyonu (3.18) denklemindeki gibi olur.

$$y = f(x + a \cdot \sin(\omega_0 t)) \quad (3.18)$$

Simülasyondaki senaryo uygulandığında sistemin verdiği tepki, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 ile gösterilmiştir. Şekil3.17'deki grafikten de görüleceği gibi, düzenli aydınlık seviyesinde istendiği gibi en yüksek güç noktası takip edilmektedir. Ancak, geçici zaman rejiminde sinüzoidal bozucu sinyallerinden kaynaklanan çok küçük salınımlar gözlenebilmektedir. Simülasyonun ikinci ayağı olan $t=2s$ 'de aydınlık seviyesinin $1kW/m^2$ 'den $0.6kW/m^2$ 'ye düşürülmesiyle elde edilen Şekil 3.18'deki grafik, aydınlık seviyesi değişimi sırasındaki sistem cevabını göstermektedir.



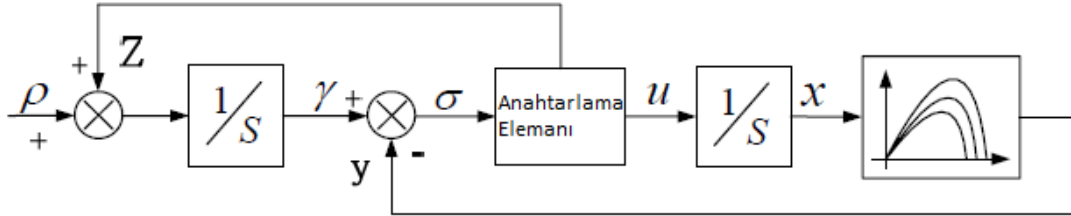
Şekil 3.17 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan Değerindeki PV Sisteminin $25^{\circ}C$ 'de $1 kW/m^2$ Düzenli Aydınlık Altındaki Zaman Cevabı [25].



Şekil 3.18 : Bozucu Sinyali Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan PV Sisteminin Aydınlık Seviyesinin $T=2s$ 'de $25^{\circ}C$ 'de $0.6 kW/m^2$ Değerine Düştüğünde Zaman Cevabı [25].

3.2.3 Kaydırma Modu Tabanlı ESC Tekniği ile MPPT

Kaydırma Modu tabanlı ESC, parametre kararsızlıkları ve gürültülerin çok olduğu doğrusal olmayan sistemlerde güçlü olan bir kontrol yöntemidir [26]. Bu çalışmada PV sisteminde MPPT için Şekil 3.19 ile gösterilen kontrol şeması kullanılmıştır.



Şekil 3.19 : Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile MPPT Temel Kontrol Şeması [26].

Bu yöntem için kaydırma yüzeyi, (3.19) numaralı denklem ile tanımlanmıştır.

$$\sigma = \gamma - y \quad (3.19)$$

Şekil 3.19’da yer alan diğer fonksiyonlar, (3.20), (3.21), (3.22) ve (3.23) numaralı eşitliklerde verilmiştir.

$$u = dx/dt \quad (3.20)$$

$$u = U_0 \cdot \text{sign}(\sigma) \quad (3.21)$$

$$dr/dt = \rho + Z \quad (3.22)$$

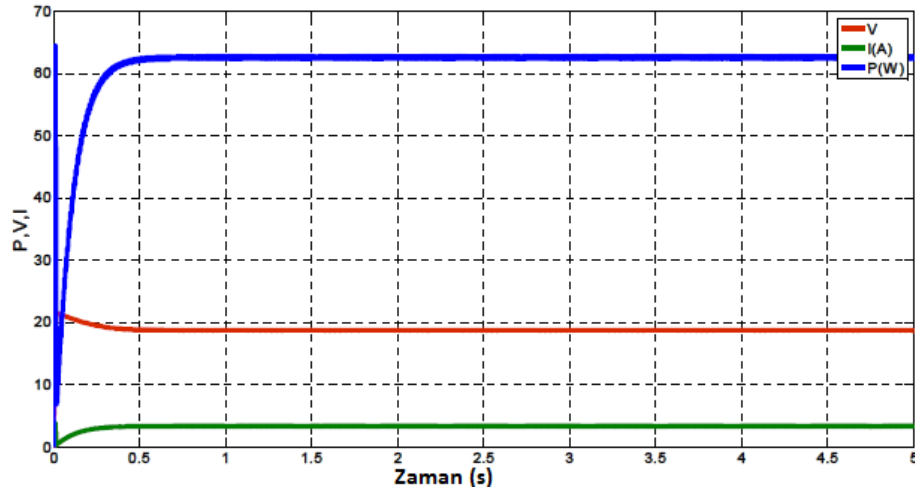
$$Z = -Z_0 \cdot \text{sign}(\sigma) \quad (3.23)$$

Denklemlerde yer alan U_0 ve Z_0 pozitif sabitlerdir. $\text{sign}(\sigma)$ ise aşağıda tanımlanmıştır.

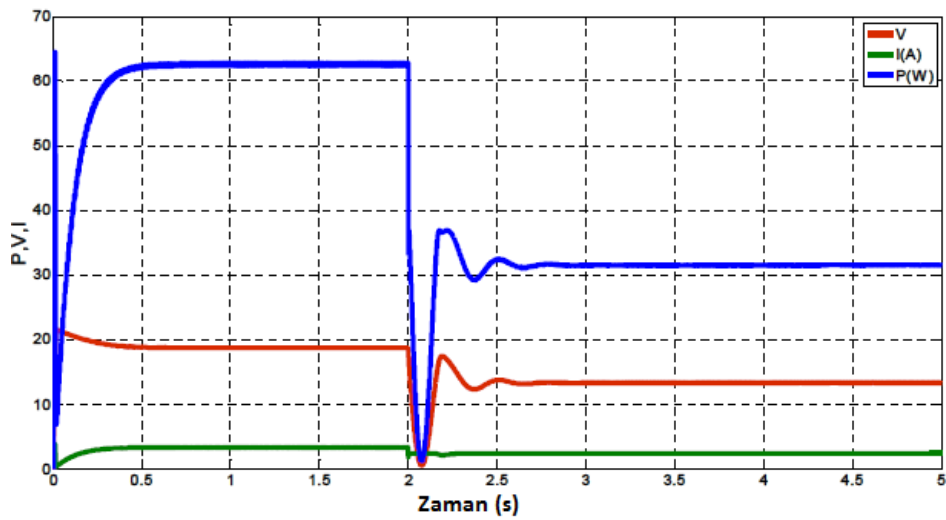
$$\text{sign}(\sigma) = \begin{cases} 1, & \sigma > 0 \\ 0, & \sigma = 0 \\ -1, & \sigma < 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

Sistemdeki eşitlikler belirlendikten sonra [25]’de yapılan düzenlemeler sonucunda simülasyon senaryosunun uygulanmasıyla elde edilen sistem cevabı, Şekil 2.27 ve Şekil 2.28 ile gösterilmiştir. PV Sisteminin 25°C’de 1 kW/m² düzenli aydınlık

altındaki zaman cevabının verildiği Şekil 3.20’deki grafikte görüleceği gibi, yüksek frekanslı anahtarlama gerektiren bozucu sinyali veya eğim arayıcısı bulunmadığından güç kaybı ve devre elemanlarının uğrayabileceği muhtemel hasarlar önlenmiş olur. Şekil 3.21’deki grafikte simülasyonun ikinci ayağı olan PV sisteminin aydınlık seviyesinin $t=2s$ ’de $25^{\circ}C$ ’de 0.6 kW/m^2 değerine düştüğünde zaman cevabı gösterilmiştir. Burada, aydınlık seviyesinin değişme anında kayma yüzeyinin sıfıra yaklaştığı ve sonrasında tekrarda en yüksek güç takibine devam ettiği görülmektedir.

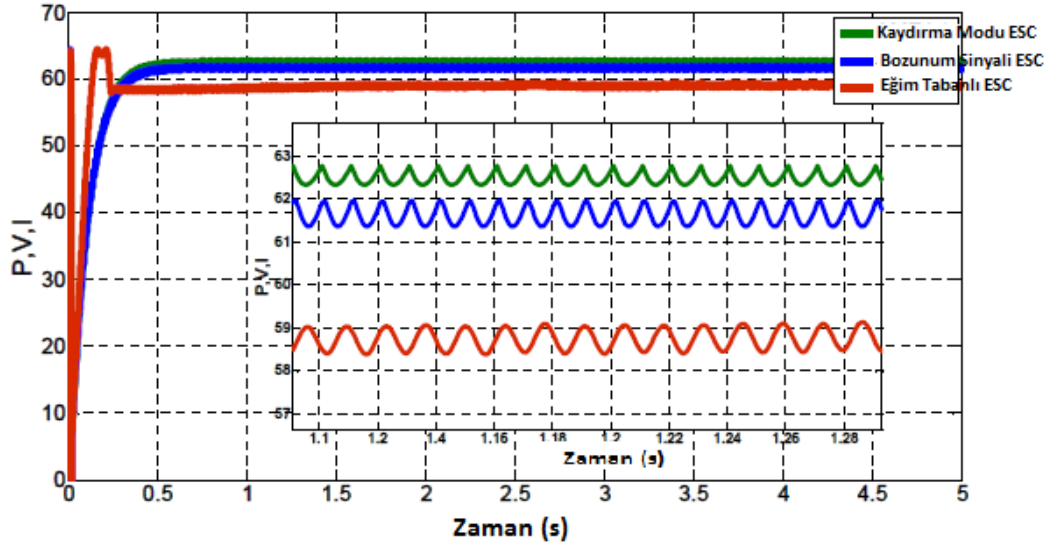


Şekil 3.20 : Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan Değerindeki PV Sisteminin $25^{\circ}C$ ’de 1 kW/m^2 Düzenli Aydınlık Altındaki Zaman Cevabı [25].



Şekil 3.21 : Kaydırma Modu Tabanlı ESC ile MPPT Uygulanan PV Sisteminin Aydınlık Seviyesinin $T=2s$ ’de $25^{\circ}C$ ’de 0.6 kW/m^2 Değerine Düştüğünde Zaman Cevabı [25].

Şekil 3.22 ile verilen [25]'deki PV MPPT için ESC tekniklerinin simülasyonlarının karşılaştırılmasının yer aldığı grafik ile Kaydırma Modu Tabanlı ESC'nin diğer tekniklere göre geçici zaman cevabının daha iyi olduğu, bozucu sinyali veya eğim arayıcısı barındırmadığı için hem kararlı halde daha az salınım olduğu hem de yüksek frekanslı anahtarlardan kaynaklı güç kaybının oluşmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır.



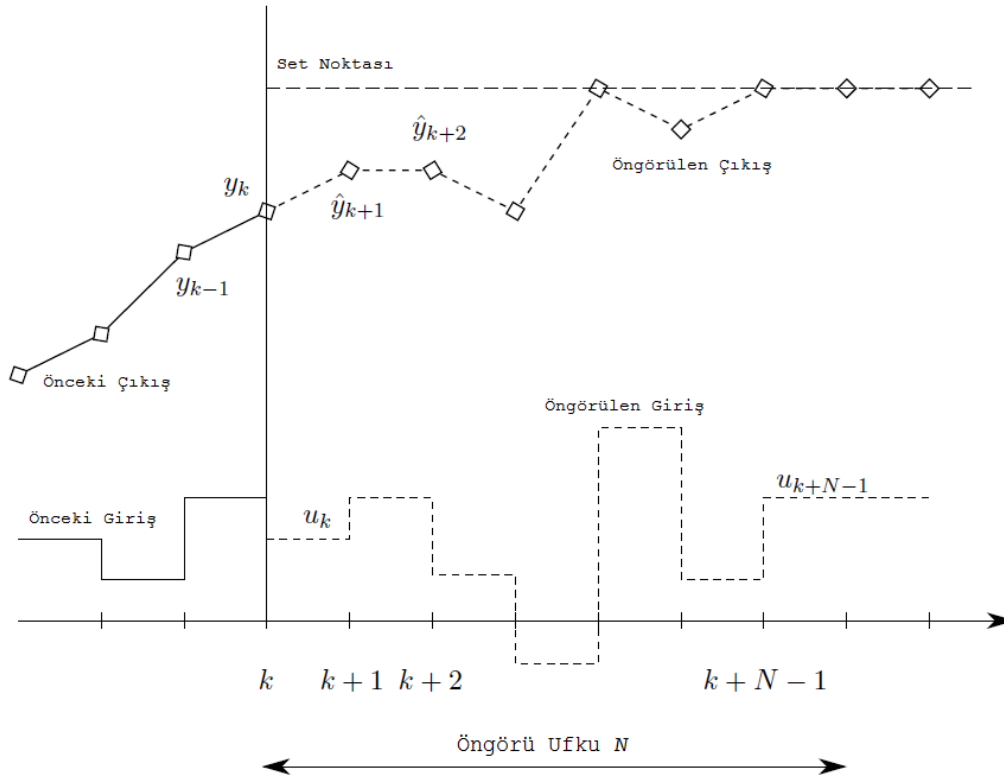
Şekil 3.22 : PV MPPT için Kullanılan ESC Tekniklerinin Grafikselleştirilmesi [25].

4. EKSTREMUM ARAMA METODU İLE MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜN BİRLİKTE KULLANIMI

4.1 Model Öngörülü Kontrol

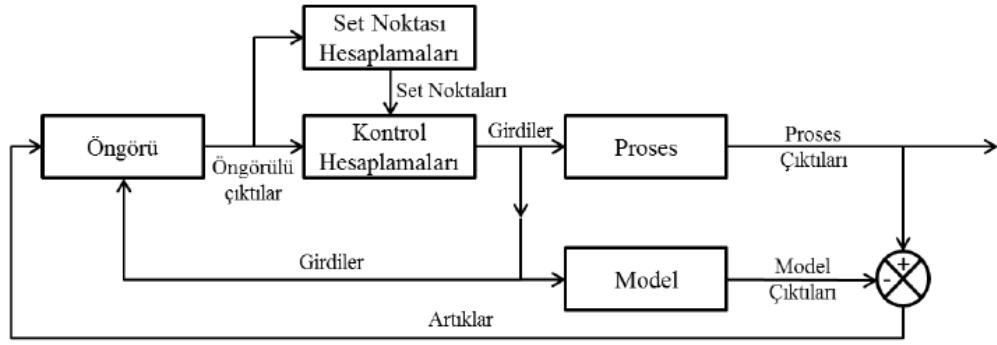
Model öngörülü kontrol (MPC) kapsamında kullanılan modeller, genellikle diğer modellere göre daha karmaşık yapıdadırlar. Bunun nedeni, MPC kontrol stratejisinin karmaşık modellerde diğer kontrol stratejilerine oranla daha başarılı olmasıdır. Bir endüstriyel MPC çalışmasının en zor ve en çok zaman gerektiren kısmı modelleme ve sistem tanılamadır. Ancak model bir kere elde edildikten sonra kontrolörün ayarlanması oldukça kolaydır. MPC uygulamalarında teknik zorlukların ve insan gücü kullanımının oldukça düşük olması, bu kontrol yöntemini cazip kılmaktadır. MPC terimi, esas olarak belirli bir kontrol stratejisine işaret etmez. MPC, sistem modelini kullanarak bir amaç fonksiyonunu minimize etmeyi hedef alan kontrol sinyalini oluşturan çok sayıda kontrol stratejisinin (MAC, DMC, GMC vb.) genel adıdır. Bu yöntemlerin temel özellikleri, içsel model içermeleri, kayan ufuk prensibini temel almaları ve sistemin tahmin edilen cevaplarına göre bir kontrol sinyali hesaplamalarıdır. MPC yöntemleri arasındaki fark, kontrolörün hesaplanması için kullandıkları ölçüt fonksiyonları ve öngörü model tipleridir. MPC modeller, bağımsız değişkenlerde meydana gelen değişimlerin, modellenmiş sistemin bağımlı değişkenlerindeki değişimi öngörürler. Kontrolör tarafından ayarlanamayan bağımsız değişkenler sistemin gürültü modeli olarak kullanılırken, süreçte bulunan diğer değişkenler sistemin kontrol amacını veya süreç kısıtlarını belirler. MPC, süreç modelini, sürecin mevcut dinamik durumunu ve mevcut ölçümleri kullanır. Birçok sistem genelde non-lineer olmasına rağmen, belirli bir çalışma alanı içinde yaklaşık olarak lineer sayılır. Sistemin lineerleştirilmesi sonrasında sürece uygulanacak MPC kontrolü, lineer MPC olarak adlandırılır. Lineer MPC, model ve süreç arasındaki yapısal uyumsuzluklardan kaynaklanan öngörü hatalarını ortadan kaldırmakta oldukça başarılıdır. Buna rağmen gerçek süreç non-lineerliklerinin etkisini gidermekte yeterince başarılı olamayabilirler. Bu durumun üstesinden gelmek için non-lineer modelin kontrol uygulamasına direkt adapte edilmesi yoluyla kullanılan

non-linear MPC tercih edilmektedir. Non-linear model, deneysel veriler ile veya kütle ve enerji denklemleri ile oluşturulabilir



Şekil 4.1 : Model Öngörülü Kontrol Örneği [27].

Model Öngörülü Kontrol (MPC) yönteminde öngörü ufku ve kontrol ufku ile tanımlanmış sınırlı optimal kontrol problemi çözülerek kontrol işaretleri kontrol ufku boyunca oluşturulur ve bu ufkun ilk elemanı sisteme uygulanır. MPC ya da azalan ufuk yaklaşımı, sistem üzerindeki kontrol girişlerinin etkisini değerlendirmek için öngörü modelinden faydalanır. Sonrasında optimal kontrol problemi çözülür ve optimal kontrol dizisinde bulunan ilk kontrol işareti sisteme uygulanır. Her örnekleme anında optimal kontrol problemi yeniden çözülür ve yeni optimal kontrol işareti değerleri güncellenmiş ölçümler kullanılarak sonraki örnekleme anında hesaplanır [27].



Şekil 4.2 : Model Öngörülü Kontrol Blok Şeması [27].

Model Öngörülü Kontrolü (MPC) özetlersek;

- Belirli bir zaman çerçevesinde (Öngörü Ufku) gelecekteki süreç çıkışlarını öngörmek için sistemin oluşturulan bir modelinden yararlanılır. (Sistem modeli kullanılarak Öngörü Ufku boyunca sistemin gelecekteki yanıtları hesaplanır.)
- Ölçüt fonksiyonunu minimize etmek için, kontrol dizisini hesaplar.
- Hesaplanan dizideki ilk kontrol işlemi uygulanır, hareketli ufuk stratejisinin sonucu olarak sonraki örnekleme adımında prosedür tekrarlanır.

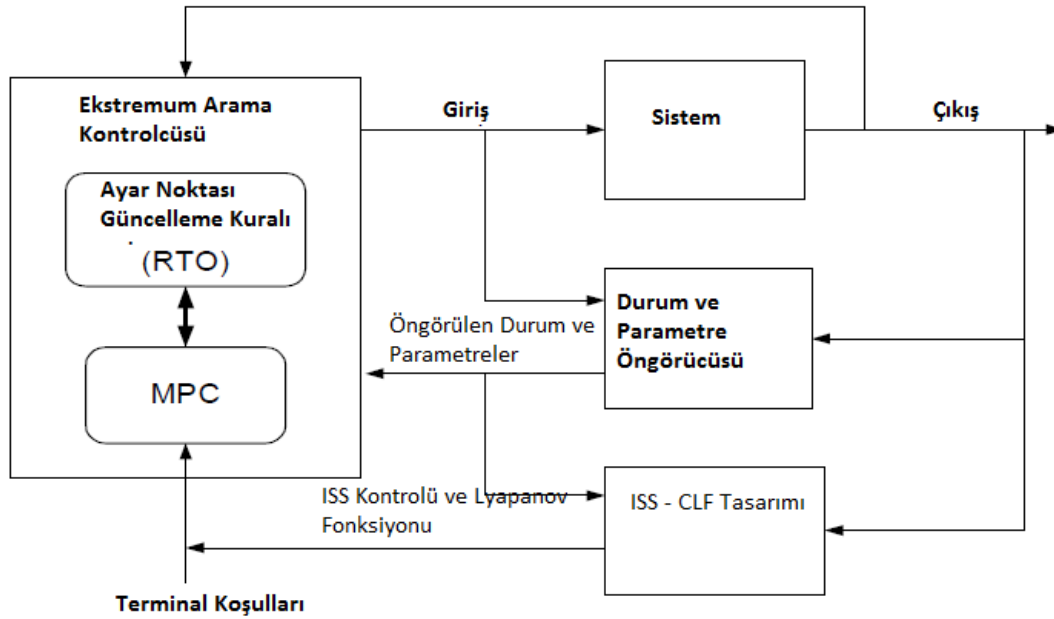
MPC'nin diğer metotlara göre bazı avantajları ise şöyle sıralanabilir;

- Ayarlama basittir ve konsept sezgiseldir.
- Çok değişkenli durum kolayca ele alınmıştır.
- Ölçülebilir bozuklukları telafi etmek için ileri beslemeli kontrol metoda tanıtılmıştır.
- İşlem sınırlarını kolaylıkla kontrol eder ve denetleyici tasarım aşaması sırasında dahil edilebilir.

MPC için bazı dezavantajlar; bilgisayarlı kontrol sistemlerinde denetleyicinin önceden hesaplayamadığı zamanlarda MPC'nin potansiyel olarak yüksek hesaplama verisi içermesi ve işlem için uygun modele bağımlılığıdır. MPC performansı, modelin öngörülerindeki kontrol kararlarına dayalı süreç modeli doğruluğuyla doğrudan ilişkilidir. Özetle, MPC'nin geçerliliği kabul edilir doğruluk modeline ve yeterince hızlı hesaplama kaynaklarının varlığına bağlıdır [27].

4.2 Gerçek Zamanlı Optimizasyon (RTO) ve Model Öngörülü Kontrol

Gerçek zamanlı optimizasyon (RTO), çalışan bir sistemde hedef fonksiyonunu en uygun değere getirmeyi amaçlar. MPC ile bağlantılandığında ise hedef fonksiyonu en uygun değere getirirken MPC'nin sistem koşullarını ve girişlerini kontrol etmesi amaçlanır [8]. RTO ile MPC'nin birlikte kullanıldığı sistem için formülizasyon, iki aşamadan oluşmaktadır. Sistemde bilinmeyen parametrelere dayanan hedef fonksiyonu olduğu varsayılarak ilk aşamada RTO mevcut değerleri alıp parametre hesapları yaparak hedef fonksiyonun en yüksek değerine ulaşmasını sağlar. İkinci aşamada MPC, RTO tarafından hesaplanan hedef değerlere ulaşmak için çıkışı düzenleyen dinamik sonlu ufuk kontrol problemini çözer. Şekil 4.3 ile gösterilen kontrol tasarımı, RTO kontrolörü olarak Ekstremum Arama Metodu kullanıp bilinmeyen optimumun değerlerin dinamik takibini yapar ve hem geçici hem de asimptotik performansı garantiler [27].



Şekil 4.3 : ESC ile MPC Kontrol Blok Şeması [27].

5. ESC YÖNTEMİNİN ELEKTRİK SÜRÜCÜ SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

5.1 SMSM'nin Matematiksel Modeli ve Vektör Denetim İlkesi

Bu tezde anlatılan elektriksel sürücü sistem denklemi ve Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun (SMSM) matematiksel modeli ESC kontrolör tasarımında kullanılmak üzere [28]'ten alıntılanmıştır. Üç fazlı alternatif akım motorların modelleri iki fazlı ($\alpha-\beta$) modele çevrilerek motorun dinamik denklemlerindeki karmaşıklık azaltılır. Stator büyüklüklerinin rotor referans düzleminde ifade edildiği 2 fazlı d-q modeli, serbest uyarımlı doğru akım motor modeline benzemekte olup bu model kullanıldığında motorun denetimi kolaylaştırılmış olur. İyi tasarlanmış vektör denetim teorisi moment ve akı arasında bağımsız denetim sağlamaktadır. Akı sabitse ve senkron eksen takımının d-ekseni üzerine yönlendirilmiş ise, moment akımın q-ekseni bileşeni tarafından denetlenir. SMSM'nin rotor referans çatısındaki matematiksel modeli Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'den aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$V_d = RI_d + \frac{d}{dt}\lambda_d - \omega_r\lambda_q \quad (5.1)$$

$$V_q = RI_q + \frac{d}{dt}\lambda_q + \omega_r\lambda_d \quad (5.2)$$

Burada; R:stator sargı direnci, V_d , V_q : d-q eksenindeki stator gerilimlerini, I_d , I_q : d-q eksenindeki stator akımlarını, L_d , L_q : d-q eksenindeki stator endüktanslarını, λ_d , λ_q : d-q eksenindeki stator akı halkalanmalarını ve ω_r ise rotor hızını temsil etmektedir. Motorun d ve q eksen manyetik akıları sırasıyla denklem (5.3) ve (5.4)'da verilmiştir.

$$\lambda_d = L_d I_d + \lambda_m \quad (5.3)$$

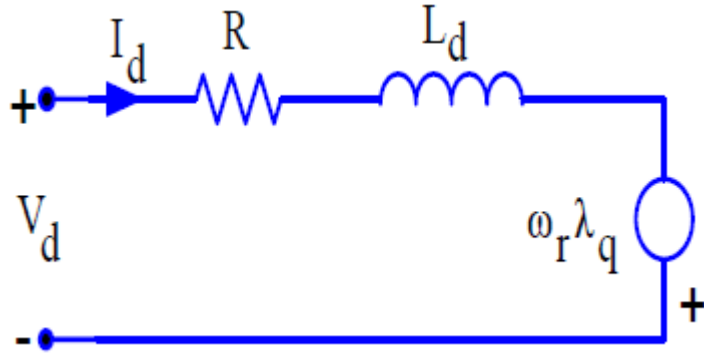
$$\lambda_q = L_q I_q \quad (5.4)$$

λ_m ifadesi sabit mıknatıstan dolayı meydana gelen karşılıklı manyetik akıyı simgelemektedir. L_d ve L_q ise d-q eksen endüktanslarını ifade etmektedir. Motorun üreteceği elektriksel moment ise denklem (5.5)'de verilmiştir.

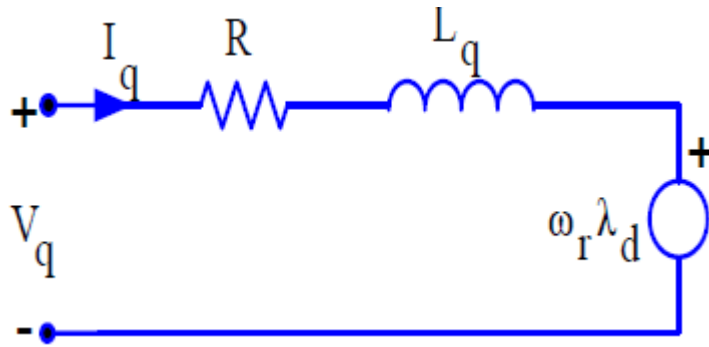
$$T_e = \frac{3}{2}P[\lambda_m I_q + I_q I_d (L_d - L_q)] \quad (5.5)$$

Burada; P, motorun çift kutup sayısını temsil etmektedir. Denkleme bakıldığında motorun üreteceği momentin d-q eksen akımlarına bağlı olduğu görülmektedir. Motorun dinamik denklemi ise T_L : yük moment, B: sürtünme katsayısı ve J: eylemsizlik momenti ile aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$T_e = T_L + j \frac{d}{dt} \omega_r + B \omega_r \quad (5.6)$$



Şekil 5.1 : SSM'nin D-Eksen Eşdeğer Devresi [28].



Şekil 5.2 : SSM'nin Q-Eksen Eşdeğer Devresi [28].

5.2 SMSM Kontrolünde MPC Yönteminin Kullanılması

Model öngörülü kontrol özet olarak kontrol işareti değerinin her örnekleme zamanında gerçek zamanlı olarak hesaplandığı bir optimal kontrol yöntemidir. Model öngörülü kontrol stratejisi, kontrol edilecek sistemin kesin ve tanımlanabilir olan bir modeline dayalıdır. Bu model sayesinde sistemin davranışı öngörü ufku boyunca önceden hesaplanır ve kontrol değişkenlerinin en uygun değerleri belirlenir [29]. MPC'nin elektrik sürücü sistemlerinde uygulanabilmesini sağlayan temel sebepler, sürücülerin neredeyse kesin lineer modelinin hem analitik metotlarla hem de tanımlama teknikleriyle elde edilebilmesi ve sürücü değişkenlerinin sınırlarının sistem dinamikleri üzerinde çok önemli rol oynaması olarak sayılabilir. Yine de MPC'nin elektrik sürücü sistemlerinde kullanımı hala daha tam olarak keşfedilmemiştir [30].

5.3 MPC Yönteminin Temelleri

MPC'de kontrolör, gelecekteki sistem davranışı tahminine göre giriş sırasını belirler. Daha açık bir ifadeyle, kontrolör değer fonksiyonunu minimize eden değerleri seçer. Bu değerleri sistemin ayrık zamanlı durum uzay modelinde kullanır. Sistemin durum uzay modeli ise aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (5.7)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (5.8)$$

Genel formuyla ölçüt fonksiyonu ise aşağıda verilmiştir.

$$J_{N_p} = x(k+N_p)^T Px(k+N_p) + \sum_{j=1}^{N_p} [x(k+j-1)^T Q x(k+j-1) + u(k+j-1)^T R u(k+j-1)] \quad (5.9)$$

Burada $Q=Q^T \geq 0$ durum vektörü ağırlıklandırması, $R=R^T > 0$ kontrol aksiyonu hata gidermesi ve $P=P^T \geq 0$ Öngörü periyodu N_p sonundaki ağırlıklandırma olarak yer alır.

5.4 MPC Yönteminin için Ayrık Zamanlı Sürücü Modeli

Bölüm 5.1'de verilen SMSM d-q eksenindeki matematiksel modeli ile tork ve dinamik denklemleri, aşağıdaki gibi lineer durum uzay modeli olarak tanımlanmıştır.

$$x = [i_d \quad i_q \quad w_r \quad \theta_r]^T \quad (5.10)$$

$$u = [v_d \quad v_q]^T \quad (5.11)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & p w_{r0} & p i_{q0} & 0 \\ p w_{r0} & -\frac{R}{L_q} & -p * (i_{d0} + \frac{\lambda_m}{L_q}) & 0 \\ 0 & \frac{k_t}{J} & \frac{-B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

MPC için yukarıda belirtilen ölçüt fonksiyonu ve sistem modeli kadar giriş, durum ve çıkış değişkenlerinin sınırlarını belirlemek de önemlidir.

$$u_{min} \leq u(n+k) \leq u_{max} \quad (5.16)$$

$$x_{min} \leq x(n+k) \leq x_{max} \quad (5.17)$$

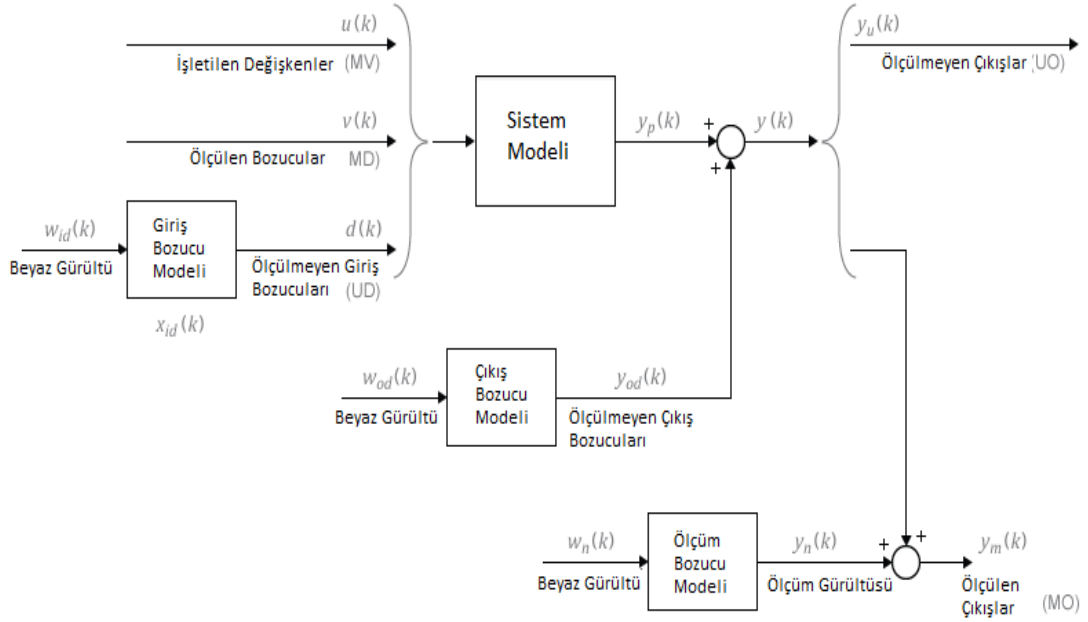
$$y_{min} \leq y(n+k) \leq y_{max} \quad (5.18)$$

Verilen bu eşitliklerle MPC'nin asıl amacı, en düşük kontrol çabasıyla çıkış hatasının sıfırlanmasıdır [31].

5.5 MPC Yönteminin MATLAB/SIMULINK ile Elektrik Sürücü Sistemine Uygulanması

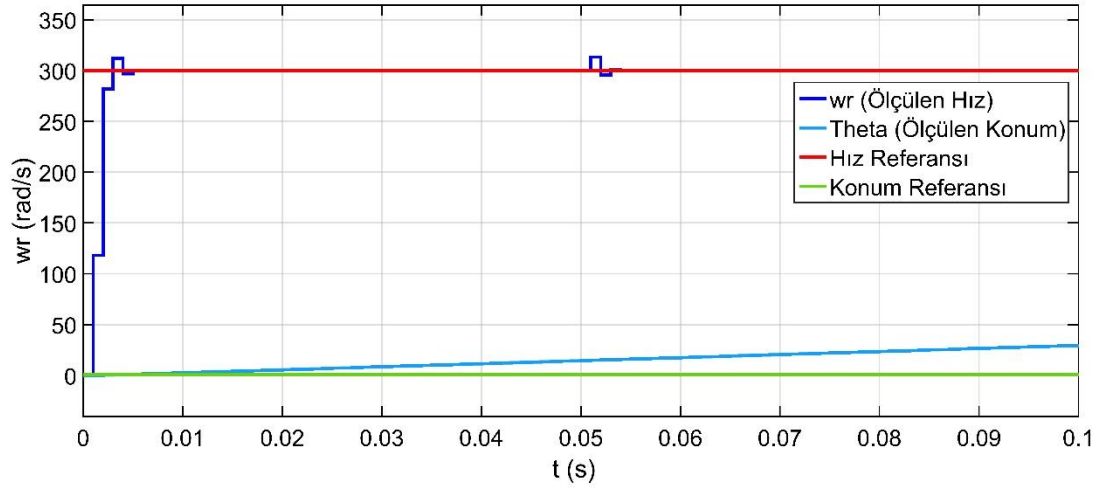
Bu tezde MPC yöntemi detaylı olarak incelenmiş ve MATLAB/SIMULINK yazılımı ile gerçekleştirme çalışması yapılmıştır. Bu gerçekleştirme çalışması için önceki

bölümlerde tarif edilen elektrik sürücü modeli ve kontrolör yapısı kullanılmıştır. Kontrolör yapısı SIMULINK yazılımı üzerinde elektrik sürücü sistemine uygulanırken “Model Predictive Control” kütüphanesinde bulunan “MPC Controller” fonksiyon bloğu kullanılmıştır. Bloğun giriş-çıkış yapısı Şekil 5.3 ile gösterilmiştir. Şekilde kontrolörün genel yapısı gösterilmiştir. Tezde kullanılan sistemde giriş, çıkış ve ölçüm bozucu modelleri kullanılmamıştır.

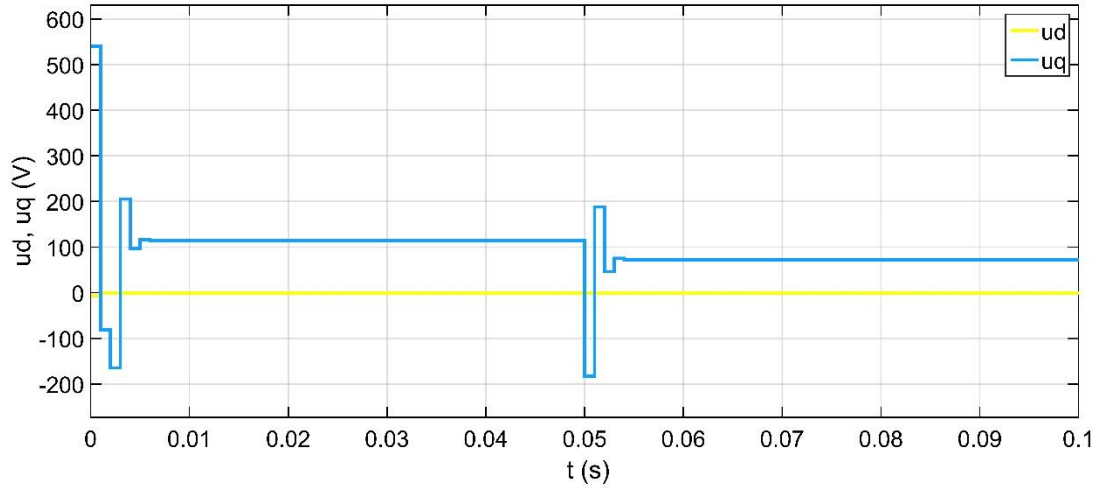


Şekil 5.3 : MATLAB/SIMULINK MPC Bloğunun Giriş-Çıkış Yapısı [32].

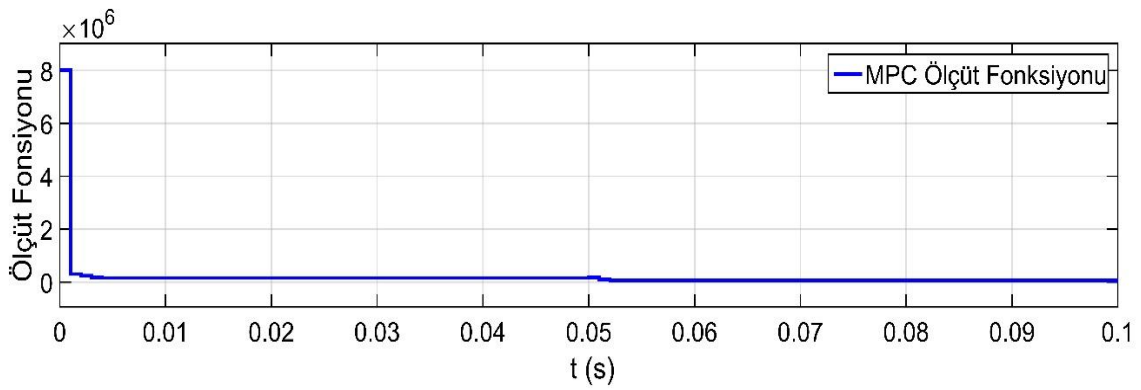
MATLAB/SIMULINK üzerinde [31]’deki motor parametreleriyle incelemesi yapılan sistemde, ayrık zamanlı doğrusal sürücü modeline bir hız referansı verilmiş ve sistemin verilen bu hız referansını takip etmesi amaçlanmıştır. Kontrolör davranışını daha iyi gözlemlemek ve başarımını ölçmek amacıyla sistem kararlı hale geçtikten sonra bir tork girişi uygulanmıştır. Bu denemeler sonucunda kontrolörün davranışı, sistemin ölçülen hız çıkışı, işletilen değişkenlerin değerleri ve ölçüt fonksiyonun grafikleri ile gözlenmiştir.



Şekil 5.4 : MPC ile SMSM Sürücü Modelinin Hız Kontrolü



Şekil 5.5 : SMSM Sürücü Modelinin MPC ile Kontrolü Durumunda Kontrol İşaretleri (MV)



Şekil 5.6 : MPC Kontrolörünün Ölçüt Fonksiyonu

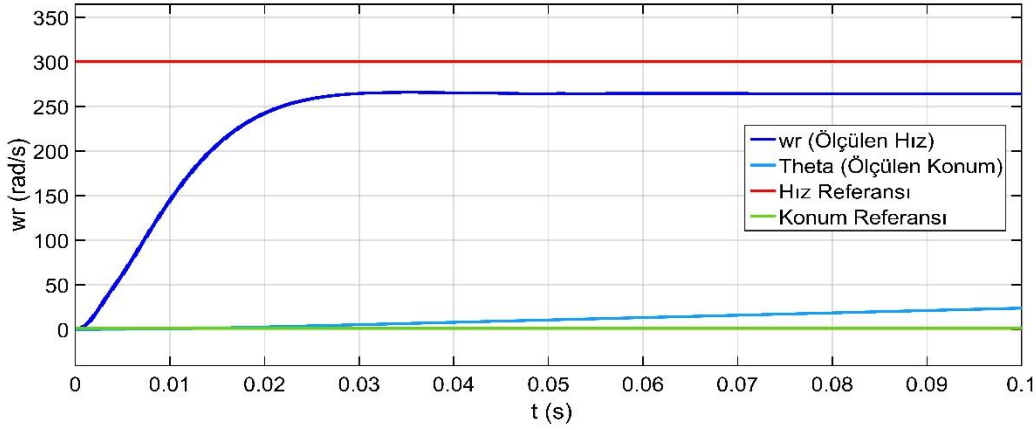
Şekil 5.4'te gözlenebileceği gibi, MPC ile sadece hız kontrolü yapılması amaçlanmıştır. Sistemin bir diğer çıkışı olan rotor konumu üzerinde ağırlıklandırma ayarlaması yapılarak rotor konumunu kontrol etmek için kontrolörün gayret sarf etmemesi sağlanmıştır. Şekil 5.5'te sistemin girişleri olan u_d ve u_q değişkenlerinin verilen sınırlamalar doğrultusunda nasıl kontrol edildiği gözlenmektedir. Şekil 5.6'da ise kontrolörün ölçüt fonksiyonun 0'a yakınsadığı görülmektedir.

Elektrik sürücü sistemlerinde özellikle motorun tahrik ettiği yüke bağlı olarak belirsizlik oluşabilmektedir. Böyle bir durumda sistemde yer alan donanımın zarar görmesini önlemek ve sistemin çalışmasını sağlamak adına kontrolöre önemli bir görev düşmektedir. Sistemde oluşabilecek bu şekildeki bir belirsizlik karşısında MPC kontrolörünün cevabını izleyebilmek amacıyla sistem denklemlerinde yer alan eylemsizlik momenti (J) ifadesi bir δJ ile sürtünme katsayısı (B) ifadesi ise bir δB ile uyarılmış ve sistem denklemlerinde yer alan A ve B matrisleri, aşağıdaki şekilde A' ve B' olarak değişmiştir.

$$A' = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & p\omega_{r0} & p i_{q0} & 0 \\ p\omega_{r0} & -\frac{R}{L_q} & -p * (i_{d0} + \frac{\lambda_m}{L_q}) & 0 \\ 0 & \frac{k_t}{J+\delta J} & \frac{-B+\delta B}{J+\delta J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$B' = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J+\delta J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Sistem modelinde bu şekilde bir değişiklik olduğunda MPC ile hız kontrolü Şekil 5.7'deki gibi olmaktadır.



Şekil 5.7 : MPC ile SMSM Sürücü Modelinde Belirsizlik Olması Durumundaki Hız Kontrolü

5.6 ESC Yönteminin MPC ile Entegre Edilerek MATLAB/SIMULINK ile Elektrik Sürücü Sistemine Uygulanması

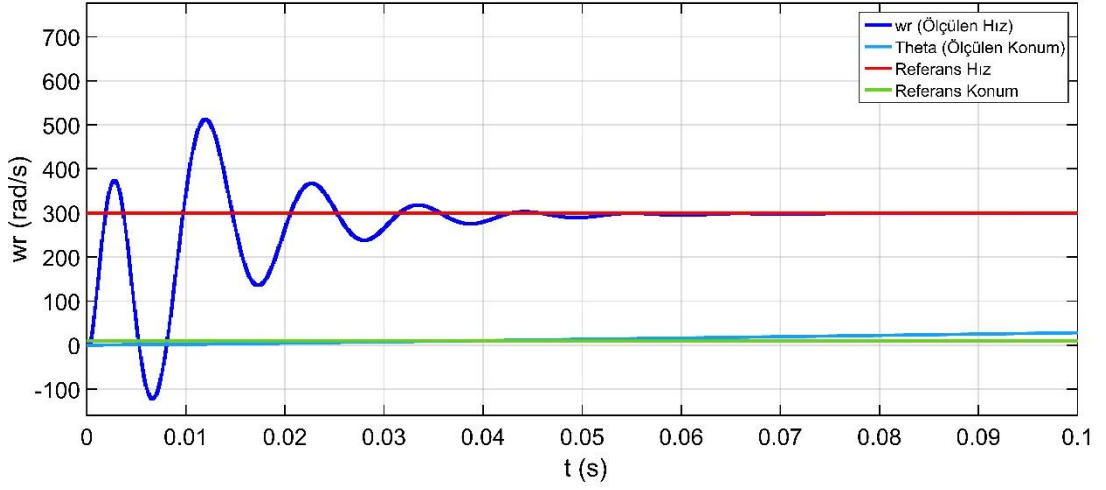
Bu tezde yapılmak istenen, sistemde bir belirsizlik olması durumunda bile durum, giriş ve çıkış kısıtlamaları çerçevesinde doğrusal ayrık zamanlı bir elektrik sürücü sisteminin düzenleme ve takip etme problemlerini çözebilecek bir uyarlamalı kontrolör tasarlamaktır. Bu amaç doğrultusunda, öğrenmeye dayalı optimal kontrol algoritması ESC, bir uyarlamalı MPC kontrolörü ile birleştirilerek Bölüm 5.4'te belirtilen ayrık zamanlı doğrusal SMSM sürücüsüne uygulanmıştır. MATLAB/SIMULINK kullanılarak oluşturulan örnekte temel olarak [33]'de yer alan aşağıdaki gibi bir algoritma izlenmiştir.

- Ölçüt fonksiyonunun en düşük değere indirilmesini sağlayacak bir $\varepsilon_Q > 0$ eşik değeri belirlenir.
- MPC için $\delta T_{MPC} > 0$, ESC için ise $\delta T_{ESC} = N_E \delta T_{MPC}$ olacak şekilde örnekleme zamanları belirlenir. ($N_E > 0$)
- ESC bozucu sinyalleri için genlik ve frekans belirlenir.
- Kontrol ufku boyunca MPC problemi çözülür.
- MPC ölçüt fonksiyonu eğer belirlenen eşik değerini aşarsa, ESC belirlenen örnekleme zamanı ile sistem belirsizliklerinin yeni değerlerini araştırır.

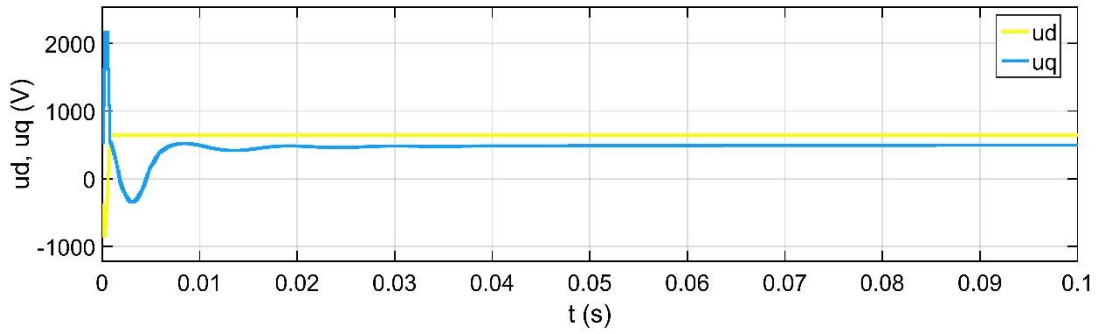
$$z_i(h+1) = z_i(h) + a_i \delta T_{ESC} \sin(\omega_i h \delta T_{ESC} + \pi/2) Q(\Delta) \quad (5.21)$$

$$\Delta_i(h+1) = z_i(h+1) + a_i \sin(\omega_i h \delta T_{ESC} - \pi/2) \quad (5.22)$$

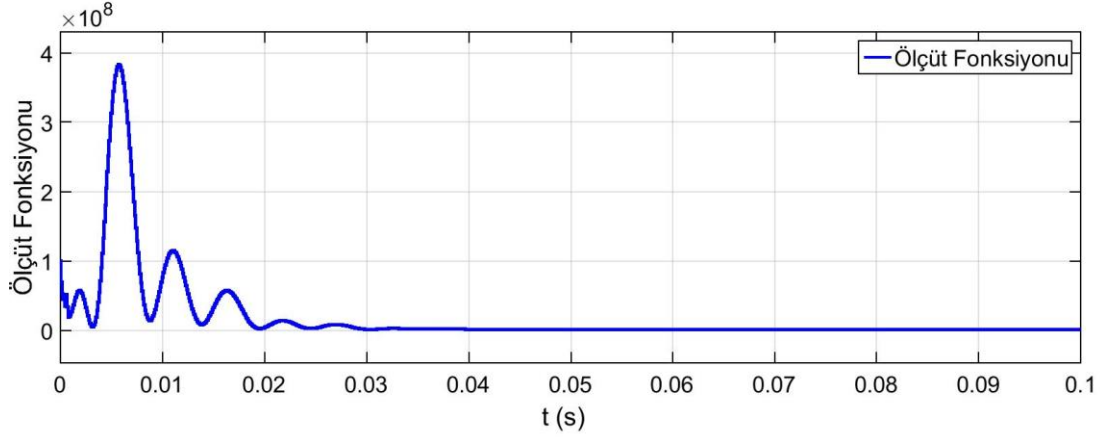
Belirtilen algoritma, MATLAB/SIMULINK üzerinde blok model şeklinde kurulmuş ve denemeler gerçekleştirilmiştir. Uyarlamalı MPC kontrolörü olarak SIMULINK “Model Predictive Control” kütüphanesinde yer alan “Adaptive MPC” fonksiyon bloğu kullanılmıştır. ESC algoritması için ise boş bir “Matlab Function” bloğunun içine ilgili algoritma doğrultusunda yapılan yazılım çalıştırılmıştır. Aşağıdaki grafiklerde SMSM sürücüsüne uygulanan sistemin başarımını izlemek mümkündür.



Şekil 5.8 : MPC&ESC ile SMSM Sürücü Modelinin Hız Kontrolü

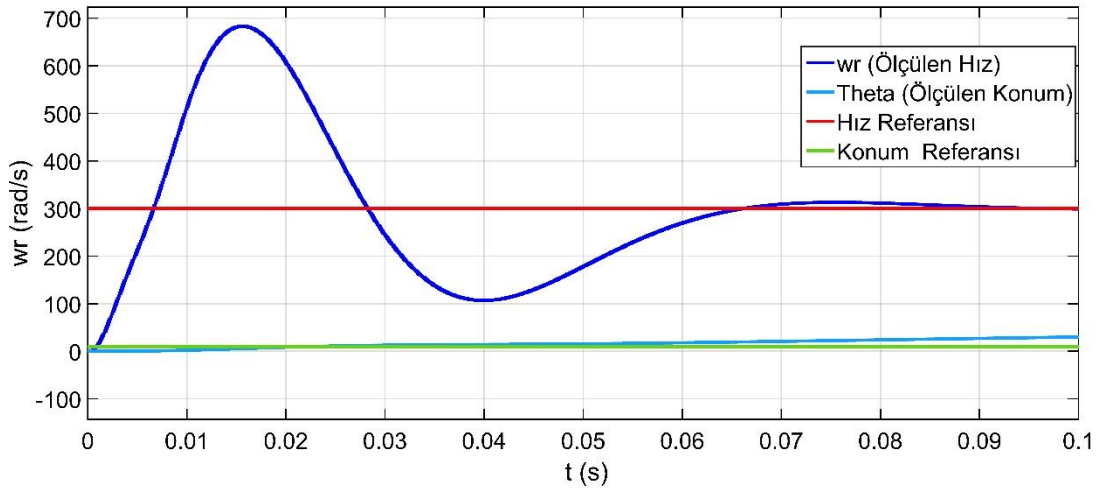


Şekil 5.9 : SMSM Sürücü Modelinin MPC&ESC ile Kontrolü Durumunda Kontrol İşaretleri (MV)



Şekil 5.10 : MPC Kontrolörünün Ölçüt Fonksiyonu

Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 ile verilen grafikler, ESC&MPC kontrolörünün sistemde herhangi bir bozucu etkisi olmadan, normal şartlarda çalışması durumunun başarımını göstermektedir. Bölüm 5.7’de MPC kontrolörü üzerinde incelendiği gibi, sistem denklemlerinde yer alan eylemsizlik momenti (J) ifadesi bir δJ ile sürtünme katsayısı (B) ifadesi ise bir δB ile uyarılmış ve sistem denklemlerinde yer alan A ve B matrisleri, 5.19 ve 5.20 denklemlerindeki şekilde A' ve B' olarak değişmiştir. MPC&ESC kontrolörünün sistem belirsizliklerine karşın hız kontrolündeki başarımı Şekil 5.11’deki grafik ile verilmiştir.



Şekil 5.11 : MPC&ESC ile SMSM Sürücü Modelinde Belirsizlik Olması Durumundaki Hız Kontrolü

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, gerçek zamanlı optimizasyon yaklaşımlarından biri olan ESC kontrol tekniği araştırılmış, farklı yöntemlerinin literatürde yer alan örnekleri incelenmiş ve yöntemlerin başarımı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan araştırmalar, bir elektrik sürücü sisteminin dinamik kontrolünün iyileştirilmesi amacıyla nasıl bir gerçek zamanlı kontrolörün kullanılabileceği sorusuna da cevap aramıştır. ESC'nin farklı yöntemleri incelendiğinde bir sürücü sisteminde tek başına bir ESC yöntemini kullanmanın yeterince etkili olmayacağı düşünülmüş ve başka bir gelişmiş kontrol yöntemi daha araştırılmıştır. Klasik kontrol yöntemlerinin sistemlerdeki ölü zaman giderme probleminde yetersiz kalması ve kısıtlamaların kontrolör tasarımında içerilmesinin zor olmasından dolayı gelişmiş kontrol yöntemlerinden biri olan Model Öngörülü Kontrol de sürücü sistemlerinin gerçek zamanlı optimal kontrolünde kullanılmak üzere bu tez kapsamında incelenmiştir. Model Öngörülü Kontrol ile Ekstremum Arama Metodu birleştirilerek bir kontrolör yapısı tasarlanmıştır. Tasarımda durum geri beslemeli öngörülü kontrol tekniğinden faydalanılmıştır. Tasarlanan bu kontrolör, MATLAB/SIMULINK yazılımı ile bilgisayar ortamında simülasyon çalışması yapılarak incelenmiştir. Simülasyon çalışması kapsamında karşılaştırma yapabilmek için öncelikle yalın bir MPC kontrolörünün SMSM sürücüsü olarak çalışması incelenmiştir. Bu incelemede sistemin doğal çalışması ve bu çalışma esnasında SMSM'ye bağlı olan yükün değişmesi durumunda kontrolörün başarımı incelenmiştir. Buna ek olarak, sistemin doğal çalışması sırasında oluşabilecek beklenmeyen bir belirsizlik durumunda kontrolörün tepkisi de incelenmiştir. Aynı durumlar, daha sonra tez çalışması kapsamında geliştirilen MPC&ESC kontrolörünün başarımı incelenirken de kullanılmıştır. Böylelikle birebir karşılaştırma yapma imkânı ortaya çıkmıştır. Karşılaştırmada yalın MPC kontrolörünün tek başına kullanıldığında yükün değişmesi durumunda oldukça başarılı bir şekilde hız referansını takip edebildiği görülmüştür. Ancak, sistemde beklenmeyen bir bozucu oluşması durumunda ise, bu etkiden dolayı hız referansını yakalayamadığı gözlemlenmiştir. ESC&MPC kontrolöründe ise sistemin yük değişimine karşı oldukça başarılı şekilde tepki gösterdiği ve verilen hız referansını

takip etmede bir sıkıntı yaşamadığı görülmüştür. Bununla birlikte, sistemdeki bozucunun etkisini en uygun çalışma noktasını arayarak çok kısa bir sürede bertaraf edip sistemin çalışmasının istendiği hız referansını yeniden yakalamayı başarmıştır.

Ancak, ESC&MPC kontrolörünün bu denli hızlı şekilde tepki gösterebilmesi için günümüz teknolojisinin getirdiği bazı kısıtlamaların aşılması gerekecektir. Hem MPC kontrolünün hem de ESC kontrolünün ayrı ayrı anlık olarak çok hızlı hesaplama ve işlem yapılmasına ihtiyaç duymasından dolayı bu kontrolörlerin fiziksel olarak gerçekleşmesi çok makul görünmemektedir. Çünkü bu kontrolörlerin beraber kullanılabilmesi için çok hızlı mikro işlemcilerin ısınma problemi yaşamadan çok zorlu ortam koşullarında çalışması gerekli olacaktır. Tez kapsamında incelenen bu çözüm, elektrik sürücüler konusundaki en ilgi çekici araştırma konularından biri haline gelmiştir. Mevcut şartlarda kontrolörlerin yetersiz kaldığı durumlar söz konusu olsa da, bu kontrol metodlarının elektrik sürücü sistemlerinin geleceğinde önemli rol oynayacağı açıktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Liu, Shu-Jun, Krstic, Miroslav.** (2012). Stochastic Averaging and Stochastic Extremum Seeking, Springer-Verlag, London, sf:11-20
- [2] **Guay, M., Moshksar, E., & Dochain, D.** (2014). A constrained extremum-seeking control approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*.
- [3] **Wiederhold, O., Neuhaus, L., King, R., Niese, W., Enghardt, L., Noack, B. R., & Swoboda, M.** (2009). Extensions of extremum-seeking control to improve the aerodynamic performance of axial turbomachines. In *Proceedings of the 39th AIAA Fluid Dynamics Conference*, AIAA (Vol. 4175).
- [4] **Zhang, C., & Ordóñez, R.** (2011). *Extremum-seeking control and applications: a numerical optimization-based approach*. Springer Science & Business Media.
- [5] **Url-1** <<http://ec.europa.eu/energy/en/topics/technology-and-innovation>>, date retrieved 29.09.2015.
- [6] **Url-2** <<http://ec.europa.eu/energy/en/topics/international-cooperation>>, date retrieved 29.09.2015.
- [7] **Leonard, W.** (1996). Control of Electrical Drives, 2nd completely revised and enlarged edition. *Springer—Verlag*, 1, 996.
- [8] **Weiss, W. A. L. T. E. R.** (2014). Integration of Extremum Seeking and Model Predictive Control for Discrete Time Systems.
- [9] **Dinçmen, E.,** (2011), Extremum Seeking Method And Its Applications In Automotive Control, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [10] **Ariyur, K. B., & Krstic, M.** (2003). *Real-time optimization by extremum-seeking control*. John Wiley & Sons.
- [11] **Kunusch, C., & Castanos, F.** (2013, July). On the implementation of an adaptive extremum seeking algorithm for hydrogen minimization in PEM fuel cell based systems. In *Control Conference (ECC), 2013 European* (pp. 2501-2506). IEEE.
- [12] **Sahneh, F. D., Hu, G., & Xie, L.** (2012, July). Extremum seeking control for systems with time-varying extremum. In *Control Conference (CCC), 2012 31st Chinese* (pp. 225-231). IEEE..
- [13] **Zhang, C., & Ordóñez, R.** (2007). Numerical optimization-based extremum seeking control with application to ABS design. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 52(3), 454-467.
- [14] **Calli, B., Caarls, W., Jonker, P., & Wisse, M.** (2012). Comparison of extremum seeking control algorithms for robotic applications.

In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 3195-3202). IEEE.

- [15] **Pan, T., Ji, Z., & Jiang, Z.** (2008). Maximum power point tracking of wind energy conversion systems based on sliding mode extremum seeking control. In *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE* (pp. 1-5). IEEE.
- [16] **Manzie, C., & Krstic, M.** (2009). Extremum seeking with stochastic perturbations. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 54(3), 580-585.
- [17] **Leyva, R., Alonso, C., Queinnec, I., Cid-Pastor, A., Lagrange, D., & Martinez-Salamero, L.** (2006). MPPT of photovoltaic systems using extremum-seeking control. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 42(1), 249-258.
- [18] **Krstic, M., Ghaffari, A., & Seshagiri, S.** (2014). Extremum seeking for wind and solar energy applications. In *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11th World Congress on* (pp. 6184-6193). IEEE.
- [19] **Ghaffari, A., Krstić, M., & Nešić, D.** (2012). Multivariable Newton-based extremum seeking. *Automatica*, 48(8), 1759-1767.
- [20] **Zhang, C., & Ordóñez, R.** (2009). Robust and adaptive design of numerical optimization-based extremum seeking control. *Automatica*, 45(3), 634-646.
- [21] **Tanelli, M., Astolfi, A., & Savaresi, S. M.** (2006). Non-local extremum seeking control for active braking control systems. In *Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2006 IEEE* (pp. 891-896). IEEE.
- [22] **Yau, H. T., & Wu, C. H.** (2011). Comparison of extremum-seeking control techniques for maximum power point tracking in photovoltaic systems. *Energies*, 4(12), 2180-2195.
- [23] **Moura, S. J., & Chang, Y. A.** (2013). Lyapunov-based switched extremum seeking for photovoltaic power maximization. *Control Engineering Practice*, 21(7), 971-980.
- [24] **Olalla, C., Arteaga, M. I., Leyva, R., & El Aroudi, A.** (2007). Analysis and comparison of extremum seeking control techniques. In *IEEE ISIE Conf* (pp. 72-6).
- [25] **Kim, I. S.** (2007). Robust maximum power point tracker using sliding mode controller for the three-phase grid-connected photovoltaic system. *Solar Energy*, 81(3), 405-414.
- [26] **Öz, B.** (2014), Pnömatik Bir Sistemin Nonlineer Modellenmesi Ve Model Öngörülü Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [27] **Adetola, V. A.** (2008). Integrated real-time optimization and model predictive control under parametric uncertainties.

- [28] **Açıkgöz, H., Keçecioğlu, Ö. F., & Şekkeli, M.** Vektör Denetim Yöntemi Uygulanan Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Bulanık Mantık Denetleyici ile Hız Denetimi. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK2013)*, 26-28.
- [29] **Godoy, B. I., Braslavsky, J. H., & Agüero, J. C. (2008).** A Simulation Study on Model Predictive Control and Extremum Seeking Control for Heap Bioleaching Processes*. In *Proc. IFAC World Congress*.
- [30] **Bolognani, S., Bolognani, S., Peretti, L., & Zigliotto, M. (2009).** Design and implementation of model predictive control for electrical motor drives. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 56(6), 1925-1936.
- [31] **Kassem, A. M., & Hassan, A. A. (2012).** Performance improvements of a permanent magnet synchronous machine via functional model predictive control. *Journal of Control Science and Engineering*, 2012, 7.
- [32] **Url-3** <<http://www.mathworks.com/help/mpc/gs/mpc-modeling.html>>, date retrieved 29.09.2015.
- [33] **Benosman, M., Di Cairano, S., & Weiss, A. (2014).** Extremum Seeking-based Iterative Learning Linear MPC. *arXiv preprint arXiv:1409.2123*.

EKLER

EK A: SMSM Sistem Parametreleri ve MPC Kontrolörünün Temel Ayarlarının Bulunduğu MATLAB programı

```
clear
clc

%%Electrical Model
p=2;
Rs=1.6;
Ld=6.37e-3;
Lq=6.37e-3;
lambda= 0.819;
T=0.0001;
%%Mechanical Model
Jm=0.001854;
Bv=5.396e-5;
kt=1.5*lambda*p;
id=0;
iq=1;
wr0=1;

%%State Space Equations

A=[ (-Rs/Ld)      p*wr0      p*iq      0;
    (-p*wr0)  (-Rs/Lq)  -p*(id+lambda/Lq)  0;
      0         kt/Jm    (-Bv/Jm)         0;
      0         0        1                 0];

Ad=[ (-Rs/Ld)      p*wr0      p*iq      0;
     (-p*wr0)  (-Rs/Lq)  -p*(id+lambda/Lq)  0;
       0         kt/Jm    (-Bv/Jm)         0;
       0         0        1                 0];

B=[1/Ld 0 0 0;
   0 1/Lq 0 0;
   0 0 1/Jm 0]';

C= [0 0 1 0;
    0 0 0 1];

D=zeros(2,3);

sys2=ss(Ad,B,C,0);

Disc2=c2d(sys2,T,'zoh');

MPC1=mpc(Disc2,T,PredictionHorizon, ControlHorizon);
```

```
%% MPC Variables
```

```
PredictionHorizon=10;  
ControlHorizon=5;
```

```
Disc2=setmpcsignals(Disc2,'MV',[1 2],'MD',[3],'MO',[1 2]);  
Weights=struct('ManipulatedVariables',[0.1  
0.1],'ManipulatedVariablesRate',[0.1 0.1],'OutputVariables',[1 0]);  
ManipulatedVariables=struct('Min',[-220 20],'Max',[220 20]);  
OutputVariables=struct('Min',[-Inf -1500],'Max',[Inf 1500]);  
set(MPC1,'Weights',Weights,'ManipulatedVariables',  
ManipulatedVariables,...  
'OutputVariables',OutputVariables);
```

EK B: ESC&MPC kontrolöründe Kullanılan ESC Algoritmasının Yer Aldığı Fonksiyon

```
function [zb_n, zj_n, kx, Ax, Bx, Cx, Dx, delta_j,  
delta_b,delta_b_dyn, delta_j_dyn] = fcn(zb, zj,kx_e, Q_past,  
delta_b_e,delta_j_e, delta_j_dyn_e,delta_b_dyn_e)
```

```
%% Electrical Model
```

```
p=2;  
Rs=1.6;  
Ld=6.37e-3;  
Lq=6.37e-3;  
lambda= 0.819;
```

```
%%Mechanical Model
```

```
Jm=0.001854;  
Bv=5.396e-5;  
kt=1.5*lambda*p;  
id=0;  
iq=1;  
wr0=1;
```

```
%% ESC Parameters
```

```
alpha_b=1e-4;  
wb=1.9;  
alpha_j=1e-4;  
wj=0.9;  
Q_eps=0.005;
```

```
%% Sample Time
```

```
T=0.0001;
```

```
%% Function determination
```

```
coder.extrinsic('ss');  
coder.extrinsic('c2d');  
coder.extrinsic('mpc');  
coder.extrinsic('setmpcsignals');  
coder.extrinsic('dssdata');
```

```
%% ESC Algorithm
```

```

kx=kx_e+1;
if Q_past>Q_eps;
zb_n=zb+alpha_b*10*T*sin(wb*kx*10*T+pi/2)*Q_past;
delta_b_dyn=zb_n+alpha_b*sin(wb*kx*10*T-pi/2);

zj_n=zj+alpha_j*10*T*sin(wb*kx*10*T+pi/2)*Q_past;
delta_j_dyn=zj_n+alpha_j*sin(wj*kx*10*T-pi/2);
else
zb_n=zb;
zj_n=zj;
delta_b_dyn=delta_b_dyn_e;
delta_j_dyn=delta_b_dyn_e;
end

if kx==10;
    kx=0;
delta_b=delta_b_dyn;
delta_j=delta_j_dyn;
else
delta_b=delta_b_e;
delta_j=delta_j_e;
end

%% State Space Equations
AA=[ (-Rs/Ld)      p*wr0      p*iq      0;
      (-p*wr0)    (-Rs/Lq)   -p*(id+lambda/Lq)  0;
      0            kt/(Jm+delta_j)  (-Bv+delta_b/(Jm+delta_j))  0;
      0            0            1            0];

BB=[1/Ld 0 0 0;
    0 1/Lq 0 0;
    0 0 1/(Jm+delta_j) 0]';

CC= [0 0 1 0;
     0 0 0 1];

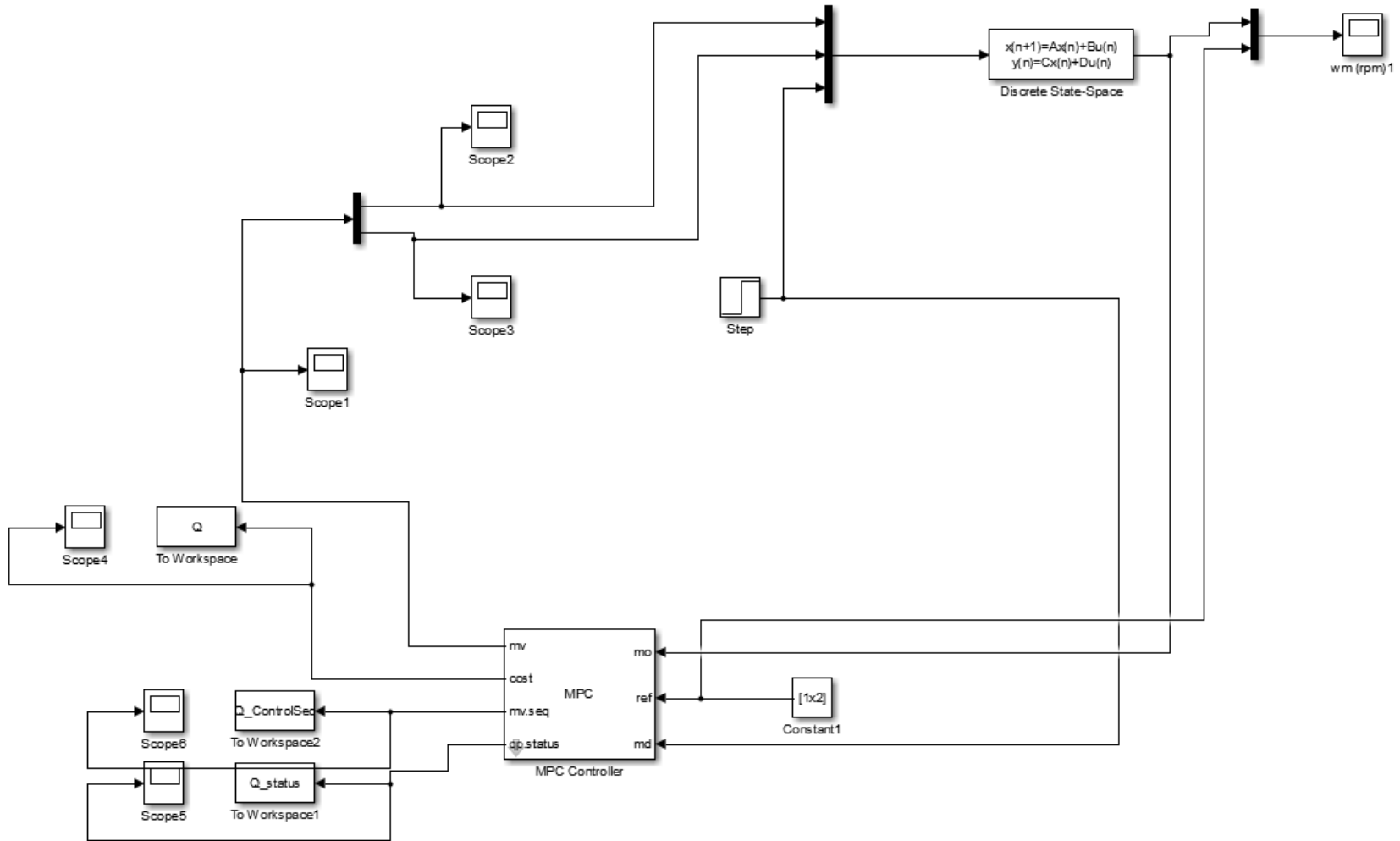
DD=zeros(2,3);

sys_MES=ss(AA,BB,CC,DD);
Disc_MES=c2d(sys_MES,T,'zoh');

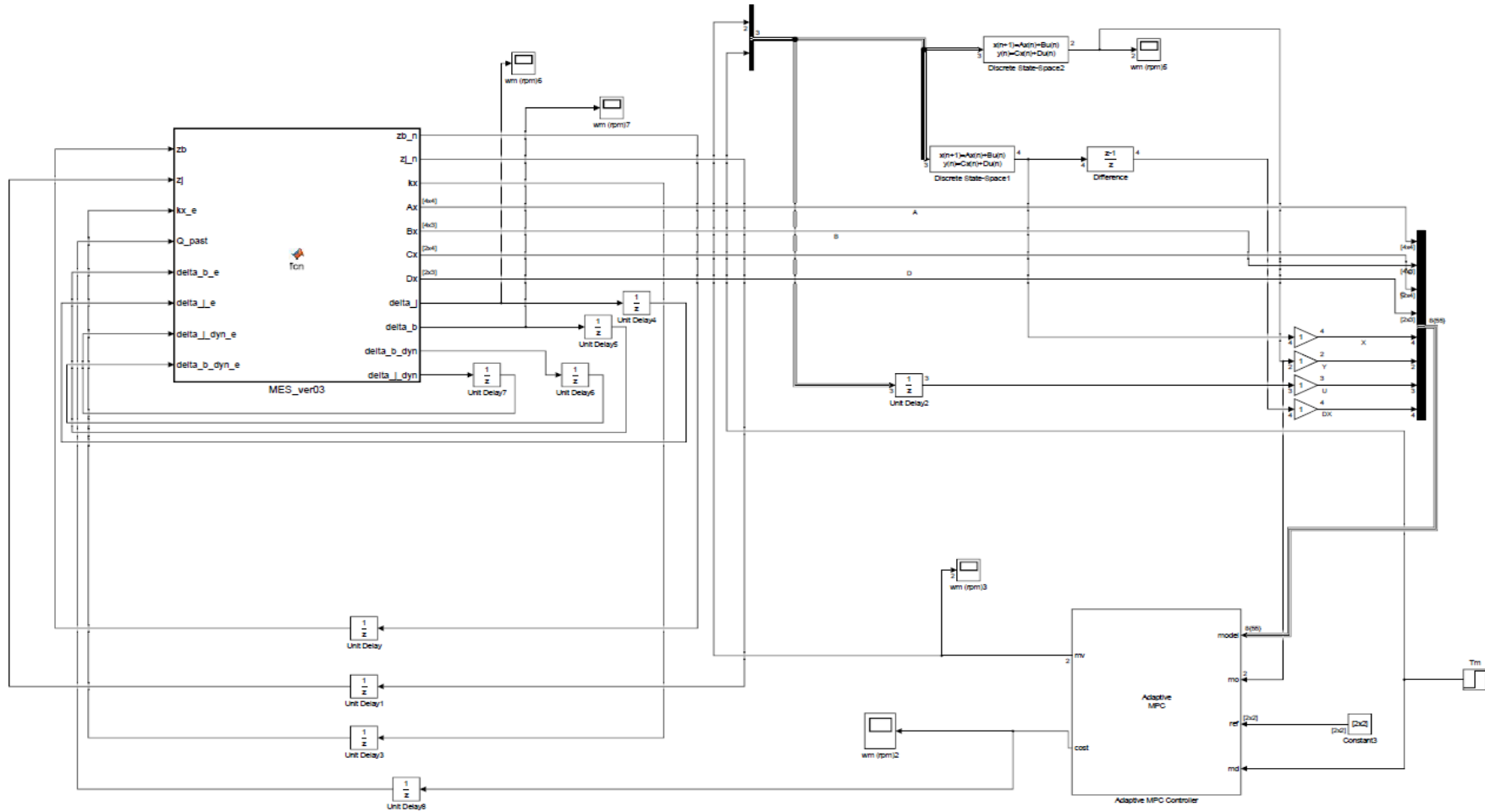
Ax=zeros(4,4);
Bx=zeros(4,3);
Cx=zeros(2,4);
Dx=zeros(2,3);
[Ax,Bx,Cx,Dx,Ex] = dssdata(Disc_MES);

```


EK C: MPC Kontrolörü MATLAB/SIMULINK Diyagramı



EK D: ESC&MPC Kontrolörü MATLAB/SIMULINK Diyagramı



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Mehmet Zafer ONAT
Doğum Tarihi ve Yeri : Batman, 1985
E-posta : zafer_onat@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2008, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **09.2009 – 06.2011** **AKAR Asansör**
Ar-Ge Elektrik Sorumlusu
- **06.2009 – 06.2012** **Zorlu Enerji/GAZDAŞ**
Otomasyon Uzmanı
- **06.2012 – 10.2014** **Schneider Electric Türkiye**
Uygulama Tasarım Uzmanı
- **10.2014 – (halen)** **Siemens Türkiye**
Ürün Uzmanı