

# Elektrikli Araçlarda Enerji Verimliliği Artırımı



Deniz KAPTAN

Y. Elektrik Elektronik Mühendisi  
Yıldız Teknik Üni. Fen Bilimleri Enst.  
Kontrol ve Otomasyon Müh. ABD  
denizkaptan1989@gmail.com

## Özet

Elektrikli araçları (EA) araştırma ve geliştirme konusu; çevreyi koruma ve ulaşımda enerji verimli araçların kullanımı için yıllardır devam etmektedir. Elektrik sisteminin, EA'nın çekiş sistemini direkt etkilemesi nedeniyle; hem mekanik hem de elektrik sistemleri ihtiva eden entegre modelleme gereklidir. Bu bildiride; Li-Ion batarya ve sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) seçilerek, EA'nın elektrik ve mekanik alt sistemlerini içeren bir Matlab modeli geliştirilmiştir. PI Kontrolörü ve Bulanık Mantık Kontrolörlüyle (BMK) sistem kontrol edilerek EA'nın batarya şarj durumu (BŞD) ve hız tepkisi gibi performans parametreleri, belirlenen benzetim çalışması senaryosuna göre karşılaştırılmış ve enerji verimliliği artırımı amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli araçlar (EA), sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM), bulanık mantık kontrol (BMK), batarya şarj durumu (BŞD)

## Abstract

Research and development processes of electric vehicles (EVs) has continued for many years for protecting environment and for usage of energy efficient vehicles at the transportation. Since the electrical systems directly affect the traction of an EV, integrated modeling considering both the mechanical and electrical systems is necessary. In this announcement, a Matlab model of the EV containing the electrical and mechanical subsystem is developed by choosing Li-Ion battery and permanent magnet synchronous motor. Performance parameters such as SOC of the battery and the speed response

of the EV are compared by controlling the system using PI and FLC controllers in accordance with the specified simulation scenario and energy efficiency increase is aimed.

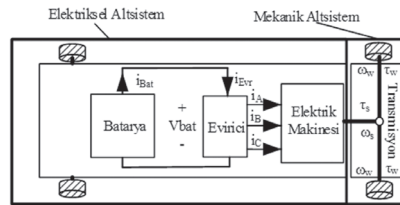
**Key words:** Electric vehicles (EV), permanent magnet synchronous motor (PMSM), Fuzzy logic control (FLC), state of charge (SOC) of the battery

## 1. Giriş

Günümüzde de, EA'ların yaygın kullanımını sınırlayıcı faktörler; uzun şarj süresi ve araçların kısa menzil mesafeleridir [1]. Bu sınırlayıcı faktörler ve EA'ların karmaşık kontrol yapıları nedeniyle, verimliliği artırmak ve bu karmaşık yapıyla başa çıkmak için genellikle akıllı kontrol veya bulanık mantık kontrol yöntemleri kullanılmaktadır [1].

## 2. Bir Elektrikli Araçın Mekanik ve Elektriksel Sistemlerinin Entegre Modeli

Bu bildiride, yapılan hesaplamalar ve benzetim çalışmalarının odak noktası olarak Şekil 1'de gösterildiği gibi batarya-evirici

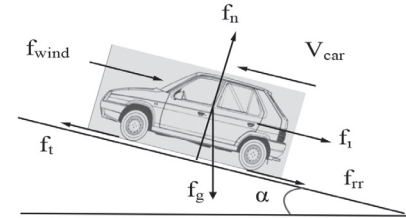


(invertör)-motor-transmisyon olarak oluşan yapı ele alınmıştır.

Şekil 1 Basitleştirilmiş EA modeli

### 2.1 Mekanik Altsistem

Araç elektrik motorunun üstesinden gelmesi gereken kuvvetler; yerçekimi, rüzgar, dönme direnci ve eylemsizlik etkisi kuvvetleridir (Şekil 2) [2].



Şekil 2 Kuvvet Modeli

Araçın çekiş kuvveti, aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir:

$$f_r = \frac{M_{car} V_{car}}{h} + \frac{M_{car} g \sin(\alpha)}{f_g} + \frac{\text{sign}(V_{car}) M_{car} g \cos(\alpha) C_{rr} + \text{sign}(V_{car} + V_{wind})^{\frac{1}{2}} \rho_{air} C_{drag} A_{front} (V_{car} + V_{wind})^2}{f_{wind}} \quad (1)$$

Kuvvet denkleminin parametreleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1 Kuvvet Modeli Parametreleri

Sembol	Parametre	Birim
$f_T$	Araçın çekiş kuvveti	[N]
$f_t$	Araçın eylemsizlik kuvveti	[N]
$f_{rr}$	Araçın dönme direnci kuvveti	[N]
$f_g$	Araçın yerçekimi kuvveti	[N]
$f_n$	Araçın dikey (tepki) kuvveti	[N]
$f_{wind}$	Rüzgar direncine bağlı kuvvet	[N]
$\alpha$	Sürüş açısı	[deg]
$M_{car}$	Araçın kütlesi	[kg]
$V_{car}$	Araçın hızı	[m/s]
$V_{car}$	Araçın ivmesi	[m/s <sup>2</sup> ]
$g$	Yerçekimi ivmesi	[m/s <sup>2</sup> ]
$P_{air}$	20°C'de kuru hava yoğunluğu	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_{rr}$	Tekerlerle dönme direnci katsayısı	[-]
$C_{drag}$	Aerodinamik sürünme katsayısı	[-]

<b>A<sub>Front</sub></b>	Aracın ön yüzey alanı	[m <sup>2</sup> ]
<b>V<sub>WIND</sub></b>	Karşıdan esen rüzgar hızı	[m/s]

Araç aktarma milindeki ve tekerleklerdeki tork (Çizelge 2) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir [2].

$$T_T = f_T r_w \quad (2)$$

$$P_T = f_T V_{car} \quad (3)$$

$$T_w = \frac{T_T}{2} \quad (4)$$

$$W_w = \frac{V_{car}}{r_w} \quad (5)$$

Çizelge 2 Mekanik altsistem parametreleri

Sembol	Parametre	Birim
$T_T$	Çekiş torku	[Nm]
$T_w$	Tekerlek torku	[Nm]
$r_w$	Tekerlek yarıçapı	[m]
$T_s$	Elektrik makinası milindeki tork	[Nm]
$W_s$	Elektrik makinası şaftının dönel hızı	[rad/s]
$W_w$	Tekerleklerin dönel hızı	[rad/s]
$P_T$	Çekiş kuvveti	[W]
$P_s$	Elektrik makinasının milindeki güç	[W]
$G_{total}$	Toplam dişli oranı (vites kutusu ve diferansiyel dahil)	[-]

Aynı şekilde, elektrik motoru milindeki tork veya diğer bir ifadeyle motora binen yük torku ( $T_L$ ), aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir:

$$\tau_s = \begin{cases} \frac{\tau_r}{\eta_{ts} G_{total}}, & P_T < 0 \\ \frac{\tau_r}{\eta_{ts} G_{total}}, & P_T > 0 \end{cases} \quad (6)$$

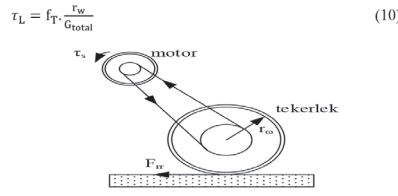
$$W_s = G_{total} W_w = G_{total} \frac{V_{car}}{r_w} \quad (7)$$

$$\eta_{ts} = \%100 \text{ ve } P_T > 0 \text{ olduğu varsayılırsa}$$

$$\tau_s = \frac{\tau_r}{G_{total}} = \frac{f_T r_w}{G_{total}} = f_T \frac{r_w}{G_{total}} \quad (8)$$

$$P_s = \tau_s W_s = \tau_s G_{total} \frac{V_{car}}{r_w} \quad (9)$$

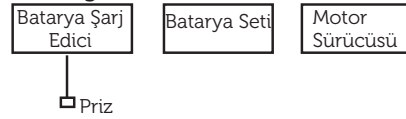
Bu eşitlikler incelendiğinde, mekanik altsistem ve elektrik motoru birleşimi Şekil 3'deki ve Eşitlik (10)'daki gibi basitçe ifade edilebilir.



Şekil 3 Elektrik motoru ve aktarma organları birleşiminin basitleştirilmiş modeli [1]

## 2.2 Elektriksel Altsistem

Elektrikli aracın elektriksel altsistemi genellikle enerji depolama sistemi ve motor sürücü sisteminden oluşmaktadır. Şekil 4 bir elektrikli aracın elektriksel altsisteminin genel bir konfigürasyonunu göstermektedir [3].



Şekil 4 Elektriksel altsistem

Sistem, Şekil 1'deki model baz alınarak düşünüldüğü için batarya, invertör ve elektrik motoru çözümlerinden sistemin verimliliğine katkı sağlayıcı olanlar aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

### a. Batarya

Yüksek güç, yüksek enerji, uzun kullanım ve uzun şarj ömrü gibi elektrikli araç bataryalarında istenilen özellikler göz önüne alındığında; Li-ion batarya aşağıda belirtilen (Çizelge 3) dört batarya içerisinde en etkin olandır [3].

Çizelge 3 Elektrikli araç bataryalarının özellikleri [3]

Batarya Tipi	Spe-sifik Enerji (Wh/kg)	Spe-sifik Güç (W/kg)	Enerji Verimliliği (%)	Şarj ömrü
Lead-acid	35-50	150-400	80	500-1000
NiMH	60-80	200-400	70	1000-2000
Sodium-sulfur	150-240	230	85	1000
Li-ion	90-160	200-350	>90	>1000

### b. İntertör

Kaynak tiplerine göre iki tip invertör mevcuttur: İlki, Akım Kaynaklı İntertör (AKİ) ve diğeri ise Gerilim Kaynaklı İntertör (GKİ)'dür. Daha geniş bir bant

genişliği sağlaması ve akım harmoniklerinin eliminasyonunda etkin özelliklere sahip olması nedeniyle GKİ; hareket kontrol uygulamalarında AKİ'ye göre daha kullanışlıdır [4]. İntertörlerin kontrolü, içerisinde geçen akımı kontrol edilerek sağlanmaktadır. Bu kontrol için genellikle Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde DGM yöntemlerinden en etkin olanının, Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) olduğu görülmektedir. İntertörler konusunda diğer bir önemli husus ise içerisindeki anahtarlama elemanlarıdır. Günümüz modern anahtarlama elemanları incelendiğinde; IGBT, MOSFET'e göre yüksek akım uygulamalarında daha iyi özelliklere sahiptir. Bahsedilen bu özellikler ışığında IGBT anahtarlama, UV-DGM akım kontrollü, gerilim kaynaklı bir invertör seçilmiştir.

### c. Elektrik Motoru

Elektrikli araçlarda, AC motor olarak popüler seçenekler indüksiyon makineleri ve sabit mıknatıslı senkron makinelerdir. İndüksiyon makineleri düşük maliyet ve bakım gerektirmeyen çalışma seçeneği sunarlar; ancak büyüklükleri ve ağırlıkları yüksek hızlarda çalışmalarını kısıtlar. Sabit mıknatıslı senkron makineler yüksek güç yoğunluğu sunarlar; fakat daimi mıknatısların artan maliyetleri gelecekte bir engel teşkil edebilir. Yakın zamanda, elektrikli araç uygulamaları için, yüksek güç yoğunlukları ve düşük üretim maliyetleri nedeniyle anahtarlama relüktans makineleri (ARM) üzerinde çalışılmaktadır. Fakat, ARM'lerin akustik gürültü ve tork dalgalanması gibi dezavantajları vardır [3]. Bu incelemenin ardından, çekiş motoru olarak sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) seçilmiştir. SMSM'de kendi içerisinde içten mıknatıslı (İSMSM) ve yüzeyden mıknatıslı (YSMSM) olmak üzere iki değişik motor tipine sahiptir. Yüksek hızlarda kullanımda İSMSM'in YSMSM'den daha etkin özelliklere sahip olması dolayısıyla ve elektrikli araçlarında aynı şekilde yüksek motor devri gerektirmesi dolayısıyla bu çalışma için çekiş motoru olarak



torun şaft torku,  $T_s$  veya  $T_L$ ) ve motorun şaft gücü ( $P_s$ ) araç düz yoldayken 17 Nm ve 7116 W iken, araç rampadayken 166.7 Nm ve 68 kW olur. Görüleceği üzere, aracın çekişi için 151.8 Nm ve 1458.9 Nm'lik tork değerleri gerekirken, bu tork değerleri aracın aktarma organı sayesinde elektrik motoruna 17 Nm ve 166.7 Nm'lik torklar olarak yansıtılır.

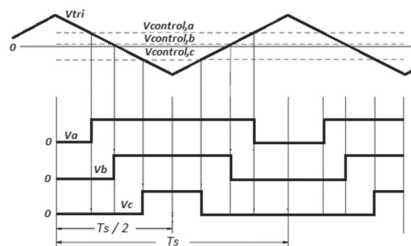
#### 4.2 Elektriksel Altsistem Parametreleri ve Benzetim Modeli

Bu bölümde önemli olan nokta SMSM, GKİ ve bataryanın mekanik yükü çekebilmeleri için büyüklüklerinin belirlenmesidir. Bir önceki bölümde çekiş kuvvetinin maksimum değeri 68 kW olarak bulunmuştu. Bu değerden yola çıkılarak 100 kW'lık bir motor seçilmiştir. (Çizelge 5)

Çizelge 5 100 kW'lık bir PMSM'nin parametreleri [6]

Sembol	Parametre	Miktar ve Birim
$L_d$	d-ekseni indüktansı	0.17 mH
$L_q$	q-ekseni indüktansı	0.29 mH
$A_{pm}$ or $A_f$	Akı	0.071Wb
$R_s$	Stator-sarım direnci	0.0083 Ohm
P	Kutup sayısı	8 [-]
$J_m$	Eylemsizlik momenti katsayısı	0.089 kg. m <sup>2</sup>
$B_m$	Viskoz sürünme katsayısı	0.005 $\cong$ 0 Nm/rad/s

Motorun çalışması için gerekli olan  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  sinüs gerilimleri, Şekil 10'da gösterildiği üzere  $V_{tri}$  sinyalinin  $V_{control}$  sinyalleriyle karşılaştırılıp invertör anahtarlama sinyallerinin oluşturulmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 10 Invertör anahtarlama

$V_{control}$  kontrol gerilimleri;  $V_{tri}$  (sabit anahtarlama frekanslı üçgen sinyalinin büyüklüğü) sinyaliyle orantılı şekilde, faz gerilimlerinden aşağıdaki şekilde ifade edilir [7]:

$$\frac{v_{control,a}}{V_{tri}} = \frac{v_a - v_k}{V_{dc}/2}$$

$$\frac{v_{control,b}}{V_{tri}} = \frac{v_b - v_k}{V_{dc}/2}$$

$$\frac{v_{control,c}}{V_{tri}} = \frac{v_c - v_k}{V_{dc}/2}$$

burada

$$v_k = \frac{\max(v_a, v_b, v_c) + \min(v_a, v_b, v_c)}{2} \text{ dir.}$$

UVDGM'nin benzetim modeli için eşitlik (11)'den faydalanılmıştır. Benzetim çalışmasında invertörün giriş gerilimi  $V_{dc} = 600$  V ve üçgen sinyalinin büyüklüğü  $\hat{V}_{tri} = 5$  olarak seçilmiştir.

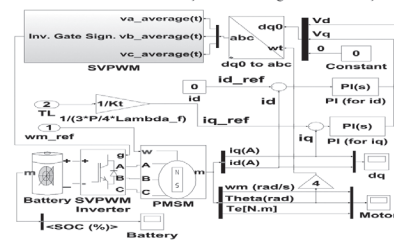
Buna göre bataryanın büyüklüğü de 600 V olur. Ayrıca batarya BŞD değeri ilk durumda % 80 olarak varsayılmıştır.

#### 5. Elektrikli Araç Sistemleri için Önerilen Kontrolör Yapıları ve Bu Çalışmadaki Örnek Sistemin Benzetim Çalışması

Yapılan benzetim çalışmalarında, SMSM'li bir EA sisteminin motor hızı yerine torku kontrol edildiğinde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülerek bu çalışmada yalnızca tork kontrolü ele alınmış ve iki değişik tork kontrolörü tasarlanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kontrolör tasarımı ve sistemin benzetim çalışması; MATLAB Simpowersystem ve Powerlib kütüphanelerindeki batarya, motor, invertör blokları kullanılarak yapılmıştır.

##### 5.1 PI Tork Kontrolörü

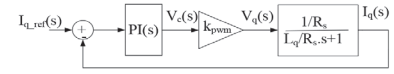
$i_d = 0$  Kontrol Yöntemi'ne göre, PI tork kontrolörlü elektriksel alt sistemin benzetim modeli Şekil 11'deki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 11 PI Tork Kontrolörlü Elektriksel Altsistem Benzetim Modeli

Bu modeldeki PI kontrolör KP ve Ki sabitlerini hesaplamak üzere Şekil 12'deki kapalı döngü kontrolör yapısı oluşturulmuştur. Şekil

12'deki kontrolör yapısı q döngüsü akımına yöneliktir; ancak  $L_q$  değeri  $L_d$  ile değiştirilince d döngüsü KP ve Ki değerleri de aynı şekilde hesaplanabilir.



Şekil 12 Kapalı döngü kontrolör yapısı

Bu döngünün açık döngü transfer fonksiyonu:

$$G_{I,OL}(s) = \underbrace{\left[ k_{PI} + \frac{k_{II}}{s} \right]}_{PI\text{-Controller}} \underbrace{k_{PWM}}_{inv.} \underbrace{\frac{1/R_s}{1 + \tau_e s}}_{motor}$$

şeklinde. Burada

$$k_{PWM} = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} \text{ ve } \tau_e \text{ is } \frac{L_q}{R_s} \text{ 'dir.}$$

Frekans bölgesi kontrol yönteminde PI sabitleri aşağıdaki iki kriter kullanılarak bulunur.

$$|G_{I,OL}(s)|_{s=j\omega_{ci}} = 1 \quad \omega_{ci}: \text{köşe frekansı} \quad (13)$$

$$\angle G_{I,OL}(s)|_{s=j\omega_{ci}} = -180^\circ + \phi_{pm} \quad (\phi_{pm}: \text{faz marjı}) \quad (14)$$

Bu iki kriter eşitlik (12)'ye uygulanınca q döngüsü sabitleri

$$k_{PI} = \frac{k_{II}}{\omega_{ci}} \tan\left(-180^\circ + \phi_{pm} + \tan^{-1}\left(-\frac{R_s}{L_q \omega_{ci}}\right)\right) \quad (15)$$

$$k_{II} = \omega_{ci} \sqrt{\frac{L_q^2 \omega_{ci}^2 + R_s^2}{1 + \left(\tan\left(-180^\circ + \phi_{pm} + \tan^{-1}\left(-\frac{R_s}{L_q \omega_{ci}}\right)\right)\right)^2}} \quad (16)$$

şeklinde elde edilir. Bahsedildiği üzere bu iki eşitlikteki  $L_q$  değeri  $L_d$  ile değiştirildiğinde d döngüsü sabitleri de aynı şekilde hesaplanır. Bu hesaplamalar için oluşturulan Matlab m- dosyasının bir bölümü Çizelge 6 verilmiştir.

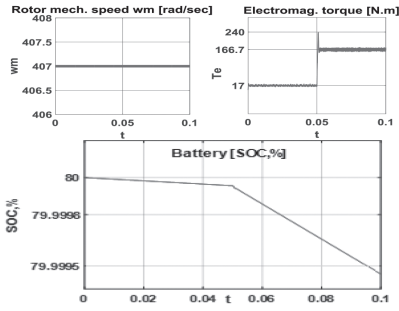
Çizelge 6 Matlab m-dosyası

```
% PMSM Parameters
Rs=0.0083; Lq=0.00029; Ld=0.00017; Jeq=0.089;
P=8;
Lambda_f=0.071; B=0;
ke=Lambda_f/(sqrt(2)) % Motor Voltage Constant
kt=3/2*P/2*Lambda_f % Motor Torque Constant
% PI in iq current
Wci=10000 %crossover freq. of iq loop in rad/s
(It is 1/10 of inverter loop)
PMI=60 %phase margin
kii=Wci*sqrt((Rs)^2+(Lq*Wci)^2)/sqrt((tan(-pi+PMI*atan(-Rs/(Lq*Wci))))^2+1)
kpi=(kii/Wci)*tan(-pi+PMI*atan(-Rs/(Lq*Wci)))
```

Benzetim çalışması kesikli (discrète) zamanda  $T_s = 5 \times 10^{-6}$  sn'lik örnekleme zamanıyla gerçekleştirilince Şekil 13'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Benzetim çalışması sonucuna göre, rotor mekanik hızı, referans değer 407 rad/s'yi herhangi bir sapma veya dalgalanma olmadan takip etmektedir. Elektromanyetik tork değerinde ise geçiş anında büyük bir sapma meydana gelmektedir. Batarya SOC değeri ise

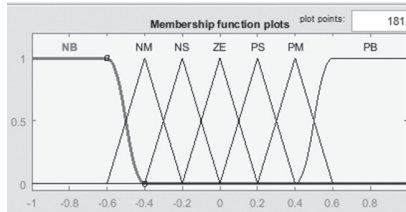
% 79.9995'in altına düşmektedir.



Şekil 13 PI Tork Kontrolörlü Elektriksel Altsistemin Benzetim Çalışması Sonuçları

## 5.2 Mamdani Tipinde Bulanık Mantık Tork Kontrolörü

Bu kontrol yönteminde, giriş değişkenleri; tork hatası (e) ve tork hatasındaki değişim (ce)'in değer evreni [-1 1] Nm aralığı olarak belirlenmiştir. Çıkış değişkeni iqrref'nin değer evreni ise [-1, 1] Amper aralığıdır. Her değer evreni, yedi tane üyelik fonksiyonuna bölünmüş ve 49 tane kural oluşturulmuştur: Negative Big (NL), Negative Medium (NM), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS), Positive Medium (PM) ve Positive Big (PL) [8] (Şekil 14 ve Çizelge 7).

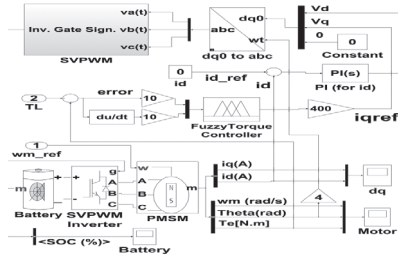


Şekil 14 Bulanık Giriş ve Çıkış Değişkenleri için Üyelik Fonksiyonları

Çizelge 7 Kural Tablosu

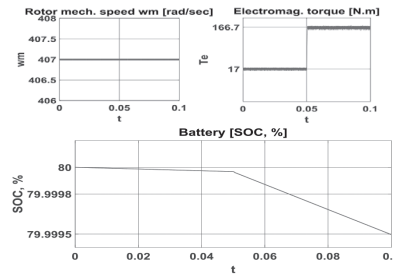
E <sub>CE</sub>	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL		NL	NL	NL	NM	NS	Z
NM	NL	NL	NL	NM	NS	Z	PS
NS	NL	NL	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PL	PL
PM	NS	Z	PS	PM	PL	PL	PL
PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL

Ardından bulanık tork kontrolörlü elektriksel altsistem Şekil 15'deki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 15 Bulanık Mantık Tork Kontrolörlü Elektriksel Altsistem Benzetim Modeli

Benzetim çalışması kesikli (discrete) zamanda  $T_s = 5 \times 10^{-6}$  sn'lik örnekleme zamanıyla gerçekleştirilince Şekil 16'daki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 16 Bulanık Mantık Tork Kontrolörlü Elektriksel Altsisteminin Benzetim Çalışması Sonuçları

PI tork kontrolör çalışmasında olduğu gibi bu çalışmada da rotor mekanik hızındaki dalgalanma miktarı sıfır olarak elde edilmiştir. Elektromanyetik tork grafiğinde ise önceki çalışmada 0.05. sn'de meydana gelen büyük sapma ortadan kalkmış ve istenilen 17 Nm ve 166.7 Nm referans değerleri daha etkin bir biçimde takip edilmektedir. Bu kontrol yönteminin diğer önemli sonucu ise batarya şarj durumunda elde edilmiştir. PI kontrol yönteminde BŞD değeri % 79.9995'in altına düşmekteyken, bu kontrol yönteminde % 79.9995 değerini göstermekte ve bu da daha az enerji harcandığı anlamına gelmektedir.

## 6. Sonuçlar

Yapılan benzetim çalışmalarına göre, en iyi performans sonuçları bulanık mantık tork kontrol yapısında elde edilmiştir. Literatürde birçok kaynakta bulunan 49 kuralı bulanık mantık kontrol yapısı, tork kontrolör döngüsü içerisinde kullanıldığında, SMSM tarafından üretilen elektromanyetik tork eğrisindeki büyük salınım değeri elimine edilmiş ve referans

değer daha iyi bir biçimde takip edilmiştir. Ayrıca BŞD değerindeki azalmanın diğer kontrolör yapısına göre daha az olması sağlanmıştır.

## 7. Kaynaklar

- [1] Huang Q., Li J., and Chen Y., "Control of Electric Vehicle", University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, (2010), 163-192;
- [2] Schaltz E., Edited by: Soyulu, S, Electrical Vehicle Design and Modeling, Intech, Aalborg University Denmark, Rijeka, CROATIA, (2011).
- [3] Mantravadi S. R. P., Modeling, Simulation & Implementation of Li-Ion Battery Powered Electric and Plug-In Hybrid Vehicles, August 2011, a Master Thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron, Ohio, (2011).
- [4] Shahat A.E., Shewy H.E., "Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System for Mechatronics Applications", IJRRAS, (2010).
- [5] Prasad E., Suresh B., Raghuveer K. "Field Oriented Control of PMSM Using SVPWM Technique", Global Journal of Advanced Engineering Technologies, Vol1, Issue2, (2012), 39-45.
- [6] Gwangmin P., Seonghun L., Sungho Jin, Sangshin Kwak "Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehicle powertrains", Expert Systems with Applications, (2014), 41:2595-2607.
- [7] Mohan N., Advanced Electric Drives Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink, Wiley, New Jersey, (2014).
- [8] Chakraborty M., "Comparative Analysis of Speed Control of PMSM using PI-Controller and Fuzzy Controller", International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 7, 103-108, (2013).